

Steuerung und Überwachung einer Zeitprojektionskammer mit GEM-Auslese

Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)
der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von
Dipl. Phys. David Kaiser
aus
Emmerich am Rhein

Bonn 2013

Angefertigt mit Genehmigung der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

1. Gutachter: Prof. Dr. Reinhard Beck
2. Gutachter: Prof. Dr. Klaus Desch

Tag der Promotion: 03. Februar 2014
Erscheinungsjahr: 2014

Zusammenfassung

Für ein tieferes Verständnis der starken Wechselwirkung und des Aufbaus der Nukleonen untersucht das CBELSA/TAPS-Experiment im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB/TRR 16 „Elektromagnetische Anregung subnuklearer Systeme“ das Anregungsspektrum der Baryonen mit Hilfe von Meson-Photoproduktion.

Um das physikalische Programm zu unterstützen und zu erweitern, soll der bestehende Innendetektor in den kommenden Jahren durch eine Zeitprojektionskammer (Time Projection Chamber - TPC) ersetzt werden. Die Möglichkeit, Spuren geladener Teilchen in der TPC mit hoher Präzision in allen drei Raumrichtungen zu rekonstruieren, erlaubt unter anderem den Nachweis von geladenen Reaktionskanälen, die mit dem Crystal-Barrel-Detektor bisher nicht untersucht werden konnten, oder die Bestimmung der Teilchenart aus dem spezifischem Energieverlust.

Ein erster TPC-Prototyp mit GEM-Folien zur Ladungsverstärkung vor der Ausleseebene und den passenden Abmessungen für das CBELSA/TAPS-Experiment wurde in Kollaboration mit der TU München, dem Detektorlabor der GSI in Darmstadt und dem Stefan-Meyer-Institut der Universität Wien gebaut und im Rahmen des FOPI-Experiments an der GSI erfolgreich bei mehreren Strahlzeiten getestet. Zudem wurden systematische Studien an einer kleineren Test-TPC mit Hilfe einer TestBench mit exzellenter externer Spurdefinition durchgeführt.

Da die genaue Kenntnis der Elektronendriftgeschwindigkeit in der TPC für die präzise Rekonstruktion der Teilchenspuren von großer Bedeutung ist, wurden detaillierte Simulationen zur Driftgeschwindigkeit und deren Abhängigkeit von äußeren Parametern, wie Driftspannung, Druck, Gaszusammensetzung oder Temperatur, durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Simulationen zeigen, dass eine konstante Überwachung der untersuchten Parameter für eine sinnvolle Verwendung der simulierten Driftgeschwindigkeit notwendig ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zu diesem Zweck, sowie für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb der beiden TPCs und der Detektoren auf der TestBench, die dafür notwendige Hardware, eine datenbankbasierte Steuerungssoftware sowie eine graphische Benutzeroberfläche aufgebaut und entwickelt. Mit dieser sogenannten SlowControl konnten bei den durchgeführten Strahlzeiten und Testmessungen zahlreiche Parameter - zum Beispiel Spannungen, Ströme, Gasfluss oder Temperaturen - mit der erforderlichen Genauigkeit gesteuert, überwacht und gespeichert werden. Die SlowControl-GUI zeichnete sich dabei durch eine Darstellung der Messwerte in Echtzeit und eine einfache Bedienbarkeit aus.

Aus den Zeitspektren der mit der GEM-TPC aufgezeichneten Daten konnte zudem die tatsächliche Driftgeschwindigkeit der Elektronen im Driftvolumen extrahiert und mit den theoretischen Vorhersagen der Simulation verglichen werden. Hierdurch konnte der Fehler bei der Rekonstruktion der z -Komponente minimiert und die weitere Analyse der Daten verbessert werden.

Abstract

Control and supervision of a Time Projection Chamber with GEM readout

To get a deeper understanding of the structure of nucleons and the strong interaction binding the constituents inside, the CBELSA/TAPS experiment investigates the resonance spectrum of baryons by meson photoproduction within the scope of the SFB/TRR 16 "Subnuclear Structure of Matter".

In order to support and expand the physical program, the existing Inner Detector will be replaced by a Time Projection Chamber (TPC) within the next few years. This allows for the detection of charged reaction channels, which can't be measured with the CBELSA/TAPS experiment up to now, as well as for particle identification from the specific energy loss.

A first prototype with GEM foils for charge amplification in front of the readout plane and suitable size for the CBELSA/TAPS experiment was built in collaboration with the TU Munich, the detector laboratory of the GSI in Darmstadt and the Stefan-Meyer-Institute of the University Vienna. The TPC has been commissioned successfully within the FOPI experiment at the GSI during several test beam campaigns. Additionally, systematic studies have been carried out with a smaller Test-TPC using a TestBench providing an accurate external track definition.

As the electron drift velocity in the TPC volume is a crucial parameter for the exact track reconstruction, detailed simulations of the drift velocity and its dependency on external parameters, such as drift voltage, pressure, gas flow or temperature, have been carried out. The results of these simulations recommend a constant monitoring of all examined parameters to allow a reasonable use of the simulated drift velocities.

For this purpose, and to ensure a safe and stable operation of the TPCs and the other detectors on the TestBench, the required hardware, the control software based on a data base and a graphical user interface were designed and constructed as the main part of this work. With this so-called SlowControl, it was possible to measure, control and store several parameters - e.g. voltages, currents, temperatures or gas flows - with high precision during the beam times and test measurements carried out. The SlowControl-GUI features a good handling and a display of the measured values in real-time.

From the data recorded with the GEM-TPC, the actual drift velocities of the electrons within the detector volume have been extracted and compared with the theoretical predictions of the simulation. Hence, the error in the reconstruction of the z component was minimized thus, improving further analysis of the data.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Physikalische Motivation	1
1.2	Das CBELSA/TAPS-Experiment	6
1.2.1	ELSA	6
1.2.2	CBELSA/TAPS-Aufbau	7
1.2.3	Erweiterung des bestehenden Aufbaus	16
2	Eine Zeitprojektionskammer für das CBELSA/TAPS-Experiment	21
2.1	Anforderungen	22
2.2	Funktionsweise einer Zeitprojektionskammer	22
2.3	Grundlegende Physik zum Betrieb einer Zeitprojektionskammer	26
2.3.1	Energieverlust geladener Teilchen	26
2.3.2	Ladungstransport in Gasen	28
2.3.3	Ladungsverstärkung	30
2.4	Test-TPC und TestBench	31
2.5	GEM-TPC-Prototyp für das FOPI- und das CBELSA/TAPS-Experiment	36
2.6	Inbetriebnahme der GEM-TPC im FOPI-Experiment	37
2.7	Kalibration	41
2.8	Der Prototyp im CBELSA/TAPS-Experiment	41
2.9	Der Magnet für das CBELSA/TAPS-Experiment	42
3	Simulationen zur Driftgeschwindigkeit	47
3.1	Simulationssoftware	47
3.2	Simulierte Gasgemische	48
3.3	Longitudinale Diffusion	50
3.4	Transversale Diffusion	51
3.5	Driftgeschwindigkeit	52
3.5.1	Temperaturabhängigkeit	55
3.5.2	Druckabhängigkeit	55
3.5.3	Abhängigkeit von der Gaszusammensetzung	56
3.5.4	Verwendbarkeit der Simulationsergebnisse	57
4	SlowControl-Hardware	63
4.1	Hardware-Komponenten für die GEM-TPC	63
4.1.1	Hochspannung	63
4.1.2	Temperaturüberwachung und -regelung	65
4.1.3	Gassystem	68

4.2	Hardware-Komponenten für die TestBench	70
4.2.1	Hochspannung	70
4.2.2	Niederspannung	70
4.2.3	Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)	71
4.2.4	Gassystem	72
4.3	SlowControl-Server und Netzwerkinfrastruktur	75
5	SlowControl-Software	77
5.1	Datenbank	77
5.1.1	Konfigurationstabellen	78
5.1.2	Datentabellen	78
5.1.3	Befehls-Queue-Tabelle	79
5.1.4	Fehlertabelle	79
5.1.5	Logbuch	79
5.2	Daemon	80
5.2.1	Initialisierung	80
5.2.2	Hauptroutine	81
5.2.3	Kommunikation mit der Datenbank	83
5.2.4	Schnittstellenklassen	83
5.3	Web-Oberfläche	87
5.4	Graphische Benutzeroberfläche (SlowControl-GUI)	88
5.5	Run-Datenbank	90
5.5.1	Datenbank	90
5.5.2	Graphische Benutzeroberfläche	92
6	Leistungsfähigkeit der SlowControl	93
6.1	Hochspannung	93
6.2	Temperatur	94
6.3	Druck	95
6.4	Konzentration der Driftgase	96
6.5	Einfluss auf die Verwendbarkeit der Simulationsergebnisse	96
7	Bestimmung der Driftgeschwindigkeit	99
7.1	Rekonstruktion der Daten	99
7.2	Bestimmung der Driftgeschwindigkeit aus den Daten	101
7.2.1	Selektion der Einträge	102
7.2.2	Bestimmung über die gesamte Länge der GEM-TPC	102
7.2.3	Alternative Bestimmung über die Targetposition	105
7.3	Diskussion der Ergebnisse	108
7.3.1	Stabilität der Driftgeschwindigkeit	109
7.3.2	Temperaturabhängigkeit	110
7.3.3	Positionsabhängigkeit	111
7.3.4	Abhängigkeit von Druck und Gaszusammensetzung	112
7.4	Weitere Analysen der Daten	113
8	Zusammenfassung und Ausblick	117
A	Platinendesign	119

B Kalibrationstabellen	122
C Benutzerhandbücher	123
C.1 Web-Oberfläche	123
C.2 Graphische Benutzeroberfläche für die GEM-TPC	130
C.3 Graphische Benutzeroberfläche für die TestBench	140
C.4 Graphische Benutzeroberfläche der Run-Datenbank	145
D Quellcode	149
D.1 Hauptprogramme der beiden Daemon	149
D.2 Schnittstellenklassen der Hardwarekomponenten	162
D.3 SPS-Anweisungsliste	170
E Driftgeschwindigkeiten	176
Abbildungsverzeichnis	201
Tabellenverzeichnis	204
Literaturverzeichnis	205

Nur scheinbar hat ein Ding eine Farbe, nur scheinbar ist es süß oder bitter; in Wirklichkeit gibt es nur Atome im leeren Raum.

(Demokrit)

1 Einleitung

1.1 Physikalische Motivation

Seit ihren Anfängen in der Antike versucht die Physik alle Vorgänge in der Natur mit Hilfe von einfachen Gesetzmäßigkeiten zu beschreiben und zu erklären. Die Untersuchung der kleinsten Bausteine der uns umgebenden Materie sowie deren Wechselwirkungen untereinander ist das zentrale Ziel der Kern- und Teilchenphysik.

Die von den griechischen Naturphilosophen Leukipp und Demokrit überlieferte Vorstellung, die gesamte Natur setze sich aus kleinsten, unteilbaren Einheiten, den Atomen¹, zusammen, hatte bis in das späte 19. Jahrhundert Bestand. Mit der Entdeckung der Elektronen durch Joseph John Thomson (1897, [1]), der Protonen durch Ernest Rutherford (1919, [2]) sowie der Neutronen durch James Chadwick (1932, [3]) musste die Annahme der Unteilbarkeit der Atome jedoch aufgegeben werden.

Die massereichen Nukleonen (Protonen und Neutronen) bilden nach heutiger Auffassung den Atomkern, der mit einer Größe von 10^{-15} m deutlich kleiner ist als das Atom (10^{-10} m), aber dennoch fast die gesamte Masse des Atoms in sich trägt. Der Kern ist von einer Hülle aus leichten Elektronen umgeben, deren Bewegungen um den Kern erstmals 1913 durch das Bohrsche Atommodell [4] beschrieben wurden.

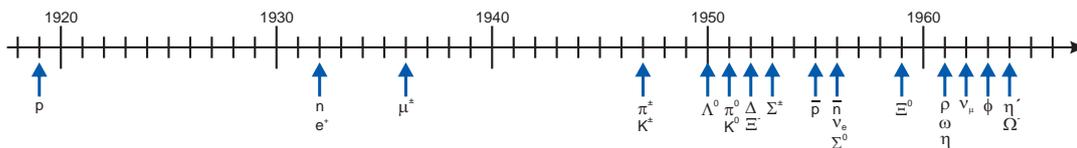


Abbildung 1.1: Zwischen 1917 und 1965 wurde eine Vielzahl von Teilchen in verschiedenen Experimenten entdeckt.

Mit der Konstruktion immer komplexerer Experimente konnten im Laufe der Zeit aber noch zunehmend kleinere Teilchen entdeckt werden. Während es bei den Elektronen bisher keine Hinweise auf eine weitere innere Struktur gibt, sind unter anderem die Ergebnisse von Messungen der magnetischen Momente von Proton und Neutron (erstmalig durch Otto Stern, 1933, [5, 6]) nicht mit einer Punktförmigkeit der Nukleonen vereinbar. Eine Gruppe um Enrico Fermi entdeckte 1951 bei der Streuung von geladenen Pionen an Protonen die sogenannte Δ (1232)-Resonanz [7]. Diese Resonanz lässt sich nur mit der Anregung innerer Freiheitsgrade erklären. Weitere Hinweise auf eine innere Struktur ergaben sich zum Beispiel aus der Bestimmung der elektrischen und magnetischen

¹átomos (gr.) - unteilbar, (unteilbare) Person

Formfaktoren der Nukleonen aus dem Streuquerschnitt durch R.W. McAllister und R. Hofstädter [8] oder L.N. Hand, D.G. Miller und R. Wilson [9].

Um diese Ergebnisse und die Vielzahl an neu entdeckten Teilchen (siehe Abbildung 1.1) erklären zu können, führten Murray Gell-Mann [10] und George Zweig [11, 12] Anfang der 1960er Jahre unabhängig voneinander die Quarks als neue elementare Bausteine ein. Alle stark wechselwirkenden Teilchen, die sogenannten Hadronen, sollten aus diesen Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen mit drittelzahliger Ladung zusammengesetzt sein, wobei die Baryonen aus drei Quarks (z. B. Protonen $p = uud$, Neutronen $n = udd$, Δ^{++} (1232) = uuu) und die Mesonen aus einem Quark-Antiquark-Paar (z. B. $\pi^+ = u\bar{d}$, $K^0 = \bar{s}d$) bestehen. Waren damals nur drei Quarks bekannt (up-, down- und strange-Quark), so wird heute von insgesamt sechs verschiedenen Quarks (siehe Abbildung 1.2) und ebenso vielen Antiquarks ausgegangen. Der Spin von $\frac{1}{2}$ sowie eine Punktförmigkeit der Quarks konnten durch die Bestimmung der Strukturformfaktoren in tiefinelastischen Leptonen-Streuexperimenten, beispielsweise durch S. Stein 1975 [13], experimentell bestätigt werden. Auf eine weitere Unterstruktur in den Quarks gibt es bis heute keine Hinweise.

		Drei Generationen der Materie (Fermionen)			
		I	II	III	
Masse		2,3 MeV	1,275 GeV	173,5 GeV	0
Ladung					0
Spin		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Name		u up	c charm	t top	\tilde{a} Photon
Quarks		4,8 MeV	95 MeV	4,18 GeV	0
		-	-	-	0
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
					g Gluon
Leptonen		<2,0 eV	<0,19 MeV	<18,2 MeV	91,2 GeV
		0	0	0	0
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
					Z^0 (schwache Kraft)
		0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
		-1	-1	-1	± 1
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
		e Elektron	μ Myon	τ Tau	W^\pm (schwache Kraft)

Abbildung 1.2: Übersicht über alle Elementarteilchen mit ihren Massen und ihren Ladungen, die als Vielfaches der Elementarladung eines Elektrons ($e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) angegeben sind. Werte nach [14].

Da Quarks als Fermionen dem Pauli-Prinzip unterliegen, welches eine symmetrische Gesamtwellenfunktion für Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen verbietet und somit ein Δ^{++} mit symmetrischer Spin- und Quark-Wellenfunktion beispielsweise nicht existieren dürfte, schlug Oscar W. Greenberg in [15] die Einführung eines zusätzlichen Freiheitsgrades vor, die Farbladung. Diese kann bei Quarks die Werte rot, blau und grün, bei Antiquarks entsprechend antirot, anti-blau und anti-grün annehmen. Auch die Eichbosonen der starken Wechselwirkung, die Gluonen, welche die Wechselwirkung zwischen den Quarks vermitteln, tragen eine eigene Farbladung. Im Gegensatz zu den Austauschpartikeln der elektromagnetischen Wechselwirkung, den Photonen, können diese Gluonen somit auch untereinander wechselwirken.

In der Natur konnten bisher ausschließlich farbneutrale Hadronen beobachtet werden. Insbesondere wurden noch keine freien Quarks nachgewiesen. Der Versuch, ein einzelnes Quark aus einem farbneutralen System zu entfernen, benötigt so viel Energie, dass spontan ein neues Quark-Antiquark-Paar entsteht. Dieses Phänomen wird als *Confinement*² bezeichnet. Je kleiner die Abstände zwischen den Quarks jedoch werden, desto freier können sich diese bewegen, so dass sich von einer „asymptotischen Freiheit“ sprechen lässt [16].

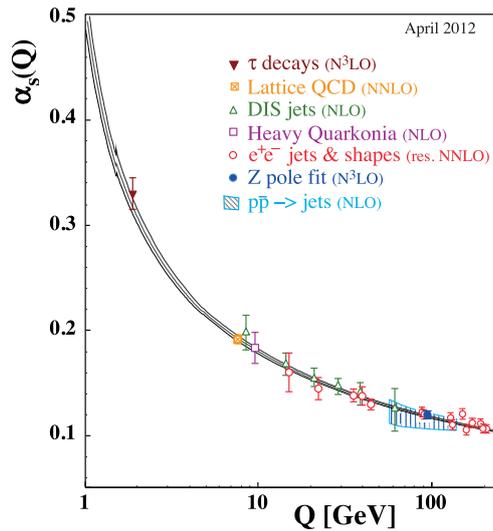


Abbildung 1.3: Aktuelle Messungen der „laufende“ Kopplungskonstanten α_s der starken Wechselwirkung aufgetragen gegen den Impulsübertrag Q [14].

Die starke Wechselwirkung wird in der Quantenchromodynamik (QCD) durch die energieabhängige Kopplungskonstante α_s beschrieben. Für hohe Energieüberträge wird α_s klein (siehe Abbildung 1.3), so dass die QCD über störungstheoretische Ansätze lösbar ist und Resultate liefert, die gut mit experimentellen Ergebnissen übereinstimmen. Für kleine Energien, also dem Energiebereich des Nukleons, wird α_s jedoch zu groß für eine störungstheoretische Berechnung. Eine Lösung der QCD lässt sich hier nur durch andere Ansätze, wie Gitter-QCD oder chirale Störungstheorien, und mit einem hohen Rechenaufwand erreichen.

Auch Modelle können noch nicht alle Eigenschaften hinreichend gut vorhersagen, sondern beschreiben lediglich Teilaspekte. Das statische Konstituentenquarkmodell von Gell-Mann und Zweig sagt beispielsweise den Aufbau der Hadronen aus Quarks genau voraus, liefert jedoch keine vollständige Erklärung für die tatsächliche Masse der Teilchen, für die Wechselwirkung zwischen den Quarks oder für ihre Dynamik.

Um ein tieferes Verständnis dieses Energiebereiches zu erhalten sowie die bestehenden Modelle zu erweitern und zu verbessern, ist die Vermessung des Spektrums und der Eigenschaften von angeregten Baryonen ein wichtiger experimenteller Ansatz. Das Konzept, Baryonen mit hochenergetischen Projektilen anzuregen und die Endzustände dieser Reaktionen zu bestimmen, wurde aus der atomaren Spektroskopie übernommen, bei der ab Mitte des 20. Jahrhunderts die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen Kern und Elektronenhülle mit Hilfe von Emissions- und Absorptionsspektren untersucht

²confinement (engl.) - Gefangenschaft

wurde. Bei der atomaren Spektroskopie lassen sich scharfe, eindeutige Absorptions- oder Emissionslinien beobachten (Abbildung 1.4), die einen direkten Aufschluss über die Energiedifferenzen der Anregungszustände der Elektronen erlauben und hierdurch zum Verständnis der elektromagnetischen Wechselwirkung beitragen. Im Anregungsspektrum der Baryonen ist dies nicht so einfach, da sich die einzelnen Resonanzen aufgrund ihrer großen Breite überlagern und interferieren. Nur die dominantesten Resonanzen lassen sich als Überhöhungen im totalen Wirkungsquerschnitt erkennen (Abbildung 1.5).



Abbildung 1.4: Emissionsspektrum von Argon [17].

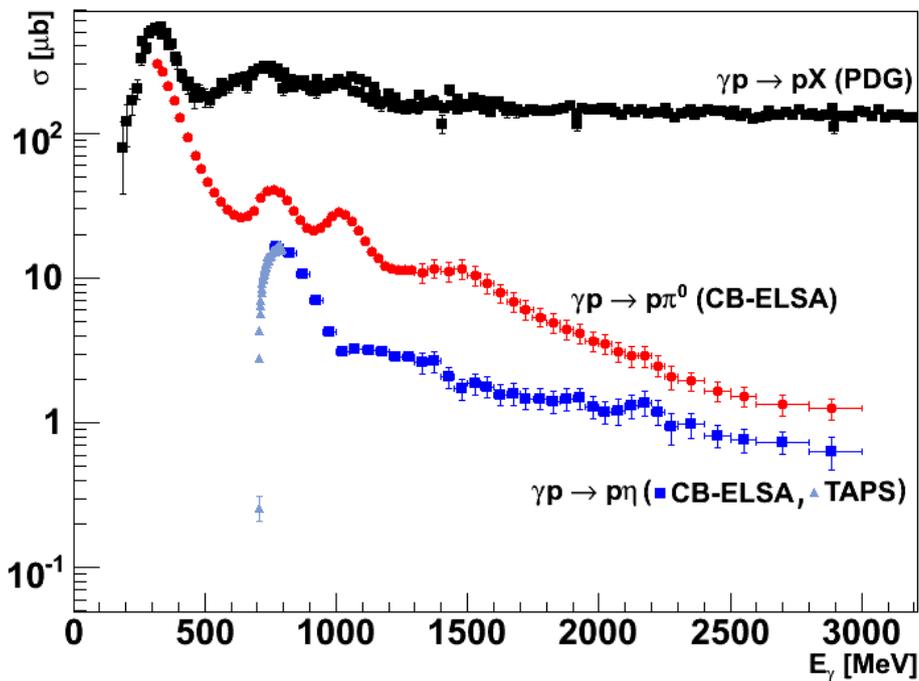


Abbildung 1.5: Totaler Wirkungsquerschnitt für die Photoproduktion am Proton (schwarz, [18]), verglichen mit den Wirkungsquerschnitten für die Photoproduktion von π^0 - (rot, [19]) und η -Mesonen (blau, [20]).

Um die Vielzahl an Resonanzen, die von den verschiedenen Modellen, wie zum Beispiel [21], vorausgesagt werden, in einem Spektrum wie in Abbildung 1.5 identifizieren zu können, sind neben dem totalen Wirkungsquerschnitt weitere Informationen notwendig. Einzelne Resonanzen tragen beispielsweise unterschiedlich stark zu bestimmten Zerfallskanälen bei, wie in Abbildung 1.6 verdeutlicht wird.

Diese Beiträge werden im CBELSA/TAPS-Experiment mit Hilfe von Photoproduktionsreaktionen untersucht, wobei neutrale Endzustände wie $N\eta$, $N\eta'$, $N\pi$ oder $N\pi^0\pi^0$ von besonderem Interesse sind. Sowohl η als auch π^0 zerfallen mit hoher Wahrscheinlichkeit in mehrere Photonen, auf die der eingesetzte Crystal-Barrel-Detektor besonders sensitiv ist. Mittels einer Partialwellenanalyse (PWA), zum Beispiel der Bonn-Gatchina-

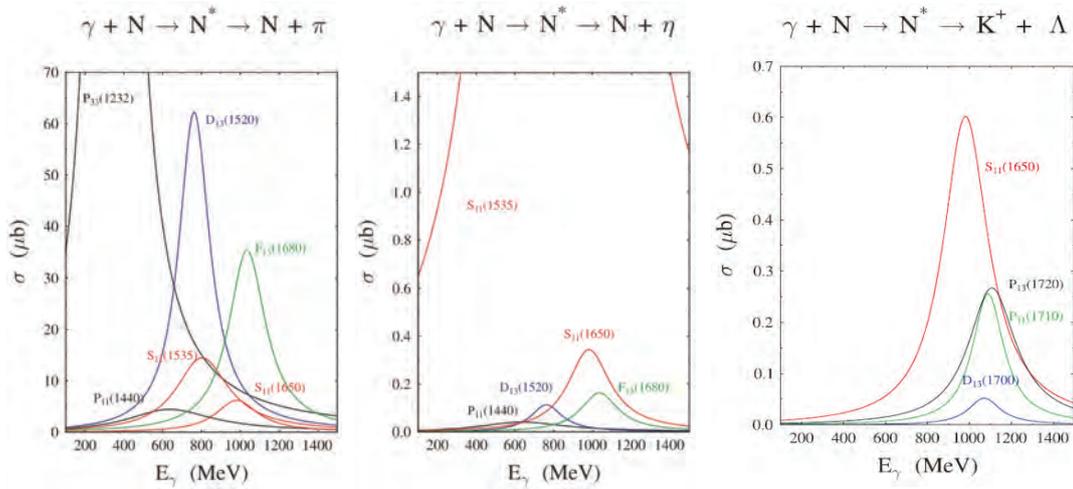


Abbildung 1.6: Resonanzbeiträge (Breit-Wigner-Verteilungen) für die Reaktionskanäle $\gamma N \rightarrow N\pi$, $\gamma N \rightarrow N\eta$ und $\gamma N \rightarrow K^+ \Lambda$ [22].

Partialwellenanalyse [23], lassen sich aus den betrachteten Reaktionen die beitragenden Resonanzen und deren Quantenzahlen bestimmen.

In den Lösungen der PWA können jedoch Mehrdeutigkeiten auftreten, die sich erst durch die Messung von Polarisationsobservablen reduzieren lassen. Mit diesen ist es möglich, den Wirkungsquerschnitt ($\frac{d\sigma}{d\Omega}$) für die Photoproduktion einzelner pseudoskalarer Mesonen durch Strahl-, Target- und Rückstoßpolarisation zu parametrisieren. Da beim CB-ELSA/TAPS-Experiment Messungen mit Strahl- und Targetpolarisation durchgeführt werden können, ergibt sich die folgende Parametrisierung des Wirkungsquerschnitts [24]:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{d\sigma}{d\Omega} |_{unpol} \cdot (& 1 - P_{\gamma}^{lin} \Sigma \cos 2\phi \\ & - P_{\gamma}^{lin} P_x H \sin 2\phi + P_{\gamma}^{circ} P_x F \\ & - P_{\gamma}^{lin} P_y P \cos 2\phi + P_y T \\ & + P_{\gamma}^{lin} P_z G \sin 2\phi - P_{\gamma}^{circ} P_z E) . \end{aligned}$$

Dabei ist P_{γ}^{lin} der Grad der Linearpolarisation und P_{γ}^{circ} der Polarisationsgrad bei zirkular polarisierten Photonen. P_x , P_y und P_z geben die Targetpolarisation in die drei Raumrichtungen an.

Zusammen mit der Rückstoßpolarisation ergeben sich für die Photoproduktion einzelner

		Target			Rückstoß			Target+Rückstoß			
		x	y	z	-	-	-	x	z	x	z
Strahl		-	-	-	x'	y'	z'	x'	x'	z'	z'
unpolarisiert	σ	-	T	-	-	P	-	$T_{x'}$	$-L_{x'}$	$T_{z'}$	$L_{z'}$
linear polarisiert	Σ	H	-P	-G	$O_{x'}$	-T	$O_{z'}$	$-L_{z'}$	$T_{z'}$	$-L_{x'}$	$-T_{x'}$
zirkular polarisiert	-	F	-	-E	$-C_{x'}$	-	$-C_{z'}$	-	-	-	-

Tabelle 1.1: Mögliche Polarisationsobservablen für die Photoproduktion einzelner pseudoskalarer Mesonen durch Kombination aus Strahl-, Target- und Rückstoßpolarisation [24].

pseudoskalarer Mesonen insgesamt 16 mögliche Polarisationsobservablen. Diese sind in Tabelle 1.1 aufgelistet und in [24] näher erläutert. Für ein sogenanntes „vollständiges Experiment“, welches eine eindeutige Zerlegung in Partialwellen ermöglicht, sind bei geschickter Wahl acht Polarisationsobservablen notwendig (beispielsweise σ , Σ , T, P, E, G, $O_{x'}$, $C_{x'}$ [25]). Mit dem CBELSA/TAPS-Experiment wurden bereits die Observablen σ , Σ , T, P, E, G und H gemessen [26, 27, 28, 29, 30].

1.2 Das CBELSA/TAPS-Experiment

Das CBELSA/TAPS-Experiment ist ein Fixed-Target-Experiment³, mit dem die Eigenschaften von Baryonresonanzen mit Hilfe von Meson-Photoproduktion untersucht werden. Der Photonenstrahl wird aus einem primären Elektronenstrahl an einem Bremsstrahlungstarget erzeugt. Der Primärstrahl wird von der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA des Physikalischen Instituts der Universität Bonn bereitgestellt.

1.2.1 ELSA

ELSA ist in der Lage, einen nahezu kontinuierlichen Strahl sowohl unpolarisierter als auch longitudinal polarisierter Elektronen bis zu einer Energie von 3,5 GeV zu liefern [31]. Abbildung 1.7 zeigt einen Grundriss der gesamten Anlage.

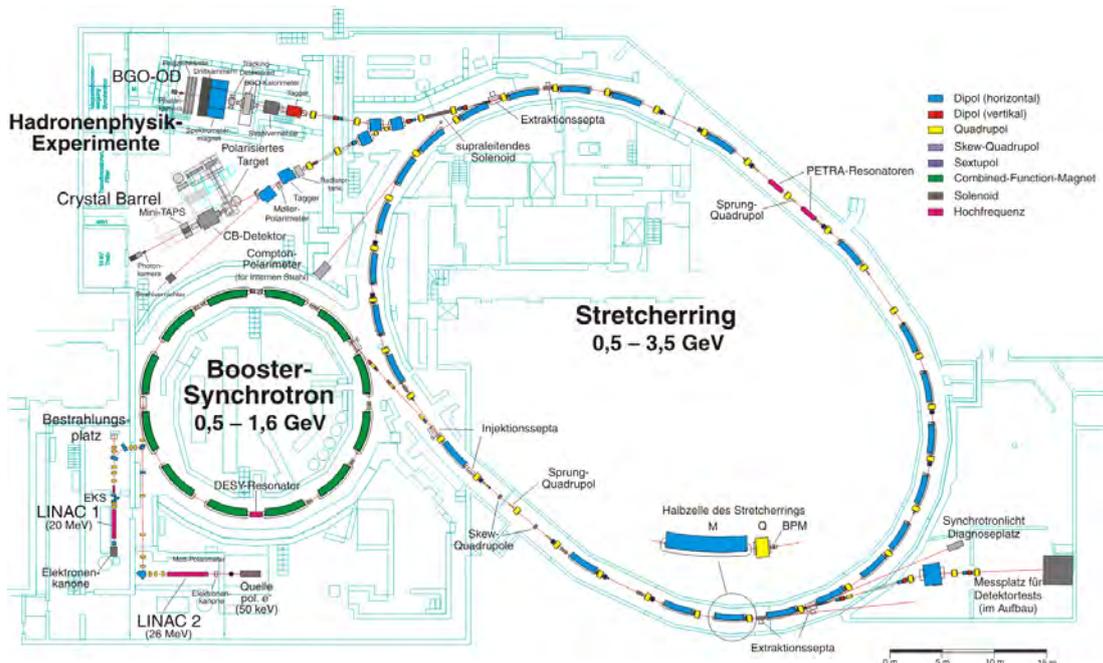


Abbildung 1.7: Übersicht über die Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA des Physikalischen Instituts der Universität Bonn [32].

³Fixed-Target-Experiment - Experiment mit fest installiertem Target, das mit einem hochenergetischen Teilchenstrahl angeregt wird

Die Elektronen können in zwei verschiedenen Quellen erzeugt und mit Hilfe nachgeschalteter Linearbeschleuniger auf 22 MeV (LINAC⁴ 1) beziehungsweise 26 MeV (LINAC 2) beschleunigt werden. Die Quelle am LINAC 2 erzeugt wahlweise longitudinal polarisierte Elektronen mit einem Polarisationsgrad von ca. 80 % oder unpolarisierte Elektronen. Aus den Linearbeschleunigern werden die Elektronen in das Booster-Synchrotron injiziert, in dem sie auf Energien von 500 MeV bis 1,6 GeV beschleunigt und in den Stretcherring gefüllt werden. Dort werden die Elektronen mehrerer Boosterfüllungen akkumuliert, auf Energien von bis zu 3,5 GeV weiter beschleunigt und nach und nach zum Experiment extrahiert. So steht für eine Zeit von bis zu 60 s ein kontinuierlicher Elektronenstrahl mit wohldefinierter Energie und Strömen von 400-800 pA zur Verfügung, welcher an einen der beiden Experimentierplätze des BGO-OD-Experiments [33] oder des CBELSA/TAPS-Experiments übergeben werden kann. Zusätzlich gibt es einen weiteren Strahlplatz zur Durchführung von Detektortests direkt mit dem Elektronenstrahl.

1.2.2 CBELSA/TAPS-Aufbau

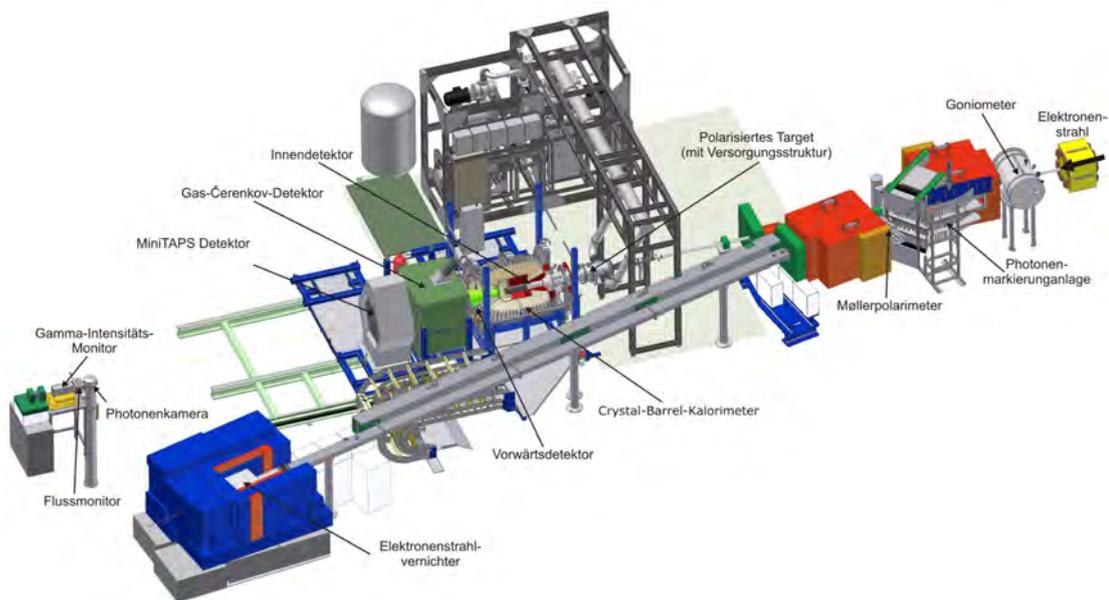


Abbildung 1.8: Der vollständige CBELSA/TAPS-Aufbau [34].

Abbildung 1.8 zeigt einen Überblick über das CBELSA/TAPS-Experiment, wie es 2004 im Rahmen des Sonderforschungsbereichs Transregio 16 „Elektromagnetische Anregung subnuklearer Systeme“ an seinem jetzigen Experimentierplatz aufgebaut wurde.

a) Bremsstrahlungstargets und Møllerpolarimeter

Zur Erzeugung hochenergetischer Photonen trifft der aus dem Stretcherring extrahierte Elektronenstrahl im Experimentierbereich zunächst auf ein Bremsstrahlungstarget. Ein

⁴LINAC - LINear ACcelerator (engl.) - Linearbeschleuniger

Teil der Elektronen wird im Coulombfeld der Atomkerne abgebremst. Der Energieverlust der Elektronen wird dabei in Richtung des ursprünglichen Strahls als hochenergetische Photonen abgestrahlt, welche im Experiment genutzt werden. Um sowohl unpolarisierte als auch zirkular und linear polarisierte Photonen erzeugen zu können, stehen in einem Goniometer verschiedene Bremsstrahlungstargets zur Verfügung (siehe Abbildung 1.9). Neben einem Chromox-Schirm und einem horizontalen beziehungsweise vertikalen Draht zur Strahlendiagnose lassen sich amorphe Kupferfolien verschiedener Dicke ($12\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m}$, $150\ \mu\text{m}$ und $300\ \mu\text{m}$) und ein um drei Achsen drehbarer Diamant in den Strahlengang fahren [35]. Durch die Gitterstruktur des Diamanten wird bei Bestrahlung mit unpolarisierten Elektronen ein linear polarisierter Photonenstrahl, bei den Kupferfolien ein unpolarisierter Photonenstrahl erzeugt.

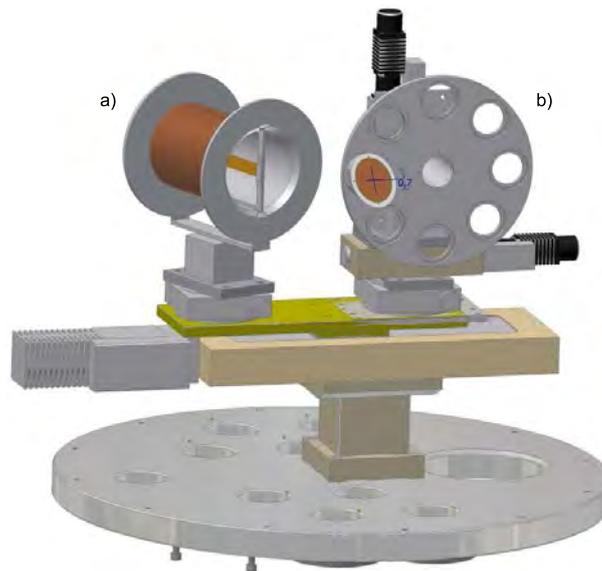


Abbildung 1.9: Zeichnung des Møllertarget (a) und des Goniometer mit den verschiedenen Bremsstrahlungstargets (b) [34].

Für die Produktion zirkular polarisierter Photonen wird ein longitudinal polarisierter Elektronenstrahl benötigt, welcher auf ein amorphes Target trifft. Um gleichzeitig den Polarisationsgrad des Elektronenstrahls messen zu können, wird hierfür das Møllertarget verwendet, welches sich neben den Bremsstrahlungstargets im Goniometertank befindet und aus einer Vacoflux⁵-Folie mit einer Dicke von $20\ \mu\text{m}$ besteht. Die umgebende Feldspule magnetisiert die Folie und richtet die Spins der Elektronen in der Folie aus. Wird ein polarisiertes Strahlelektron an einem Elektron aus der Folie gestreut, verlassen beide Elektronen das Target in Vorwärtsrichtung und werden anschließend von Bleiglasdetektoren in Koinzidenz nachgewiesen. Der Wirkungsquerschnitt dieser Møllerstreuung hängt von der Orientierung der Polarisation der Spins der Elektronen ab, so dass bei einer wechselnden Polarisationsrichtung der Strahlelektronen eine Asymmetrie in den Zählraten messbar ist. Aus dieser Asymmetrie lässt sich der Polarisationsgrad des Elektronenstrahls bis auf eine Genauigkeit von 2% bestimmen. Eine ausführliche Beschreibung dieser Methode zur Polarisationsbestimmung ist in [35] zu finden.

⁵Vacoflux - Eisen-Cobalt-Vanadium-Legierung

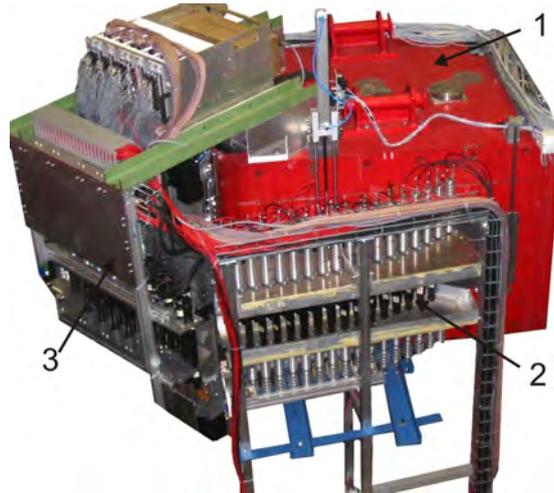


Abbildung 1.10: Die Photonenmarkierungsanlage mit dem Taggermagnet (1), den 96 szintillierenden Latten (2) und der Halterung für die 480 szintillierenden Fasern (3).

b) Photonenmarkierungsanlage

Für eine vollständige Beschreibung der hadronischen Reaktionen im Target ist die genaue Kenntnis der Energie der Photonen E_{Photon} notwendig. Diese kann jedoch nicht direkt gemessen, sondern muss aus den Elektronenergien vor (E_{Strahl}) und nach ($E_{gebremst}$) dem Bremsstrahlungsprozess berechnet werden:

$$E_{Photon} = E_{Strahl} - E_{gebremst} .$$

Die Energie E_{Strahl} ist durch die Elektronenergie in ELSA auf 1 MeV genau bekannt [36]. $E_{gebremst}$ lässt sich über die Ablenkung der Elektronen in einem homogenen Magnetfeld bestimmen:

$$E_{gebremst} = e \cdot B \cdot r \cdot c \quad \text{für} \quad pc \gg m_e c^2 .$$

B bezeichnet in diesem Fall die Magnetfeldstärke des Taggingmagneten⁶, c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und r den Radius der Bahn der abgelenkten Elektronen. Elektronen verschiedener Energien werden bei konstantem Magnetfeld unterschiedlich stark abgelenkt: Je größer die Energie, desto geringer ist der Krümmungsradius. Wie Abbildung 1.10 zeigt, ist hinter dem Taggingmagneten die Photonenmarkierungsanlage mit ihren 96 szintillierenden Latten (1 cm dick und 1-4 cm breit) aufgebaut. Details hierzu sind in [37] zu finden. Die Latten sind in zwei Lagen so angeordnet, dass ein senkrecht einfallendes Elektron auf genau zwei Latten trifft. Der abgedeckte Bereich entspricht ca. 2,1 % bis 82,5 % der Elektronenstrahlenergie E_{Strahl} , bei einer Energieauflösung von 0,1 % $\cdot E_{Photon}$ bis 6 % $\cdot E_{Photon}$ sowie einer maximalen Taggingrate von ca. 10 MHz. Das Bremsstrahlungsspektrum folgt einer $1/E_{Photon}$ -Verteilung, weshalb mehr Photonen bei niedrigen Energien, also hohen Elektronenergien, erzeugt werden. Um die Energieauflösung in diesem Bereich zu verbessern, befinden sich hier zusätzlich 480 szintillierende Fasern mit einem Durchmesser von 2 mm, die einen Energiebereich von

⁶to tag (engl.) - markieren

16,6%· E_{Strahl} bis 87,1%· E_{Strahl} abdecken und eine Energieauflösung von 0,1%· E_{Strahl} bis 0,4%· E_{Strahl} erreichen. Die Fasern werden ebenso wie die Latten mit Photomultipliern ausgelesen, die Photonenmarkierungsanlage kann daher ein schnelles Triggersignal⁷ für das Gesamtexperiment liefern.

c) Elektronenstrahlvernichter

Aufgrund der geringen effektiven Dicke der Bremsstrahlungstargets von $0,84 \cdot 10^{-4}$ bis maximal $4,2 \cdot 10^{-3}$ Strahlungslängen X_0 , emittiert nur ein geringer Teil der Elektronen Bremsstrahlungsphotonen [35]. Der größte Teil der Elektronen im Strahl erfährt somit keine Energieänderung, wird durch den Taggingmagneten und einen zweiten Ablenkmagneten um insgesamt $15,2^\circ$ von der ursprünglichen Richtung abgelenkt und trifft auf einen massiven Eisenblock ($50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, 470 kg). Die Elektronen verlieren dort durch Vielfachstreuung ihre Energie, bis sie absorbiert werden. Durch Kernreaktionen können die hochenergetischen Elektronen im Strahlvernichter schnelle Neutronen erzeugen. Damit weder Neutronen noch α -, β - oder γ -Strahlung oberhalb der vom Strahlenschutz erlaubten Grenzwerte nach außen dringen, ist der Strahlvernichter mit einem Mantel aus 70 t Stahl umgeben. Der einlaufende Strahlstrom wird mit einem Faraday-Becher in einem Bereich von 1 pA bis 500 nA gemessen.

d) Polarisiertes Target

Um Doppelpolarisationsexperimente durchführen zu können, ist neben einem polarisierten Photonenstrahl auch ein polarisiertes Target notwendig. Für die Untersuchung von Nukleonresonanzen wäre ein Target aus reinem Wasserstoff ideal. Dieser lässt sich jedoch nicht polarisieren, so dass aufgrund der guten Polarisierbarkeit verbunden mit einer langen Relaxationszeit Butanol ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$) als Targetmaterial verwendet wird. Das Targetmaterial befindet sich in einem Teflonzylinder mit einer Länge und einem Durchmesser von 2 cm. Dieser ist in der Spitze eines Kryostaten⁸ untergebracht.



Abbildung 1.11: Kryostat und Halterung des polarisierten Targets.

Die Ausrichtung der Spins der Nukleonen erfolgt durch die Dynamische Nukleonpolarisation (DNP). Die Elektronen des Wasserstoffs werden mit Hilfe eines 2,5 T starken

⁷trigger (engl.) - Abzug, Auslöser; startet die Datenaufnahme

⁸Kryostat - Kühlanlage für Temperaturen bis zu einigen mK

Magnetfeldes in Strahlrichtung ausgerichtet. Der Transfer der Spinausrichtung der Elektronen auf die Protonen erfolgt im Anschluss daran durch Einstrahlen von Mikrowellen geeigneter Frequenz. Auf diese Weise kann ein Polarisationsgrad der Protonen von bis zu 90 % erreicht werden. Nach der Polarisierung, welche bei einer Temperatur von 150 mK stattfindet, wird das Targetmaterial auf 30-50 mK heruntergekühlt und die Spins in ihrer Ausrichtung „eingefroren“. Eine Spule im Kryostaten erzeugt ein magnetisches Haltefeld von 0,4 T, um den Polarisationsgrad für eine maximale Zeitdauer mit hohem Grad zu gewährleisten [38]. Dieser „Frozen Spin Mode“ ist notwendig, da der Polarisationsmagnet während der Datennahme nicht zum Einsatz kommen kann, ohne den Messbereich der Detektoren stark einzuschränken.

Neben dem „Frozen-Spin Target“ stehen noch weitere Targets zur Verfügung. Mit einem 1,5 cm langen Kohlenstofftarget mit 2 cm Durchmesser lassen sich Untergrundmessungen für das Butanol-Target und Messungen an gebundenen Protonen und Neutronen durchführen. Das Flüssig-Wasserstoff- beziehungsweise Deuterium-Target in einer 5,1 cm langen Kapton-Zelle (siehe Abbildung 1.12) eignet sich für Messungen an unpolarisierten Protonen und Neutronen [39].

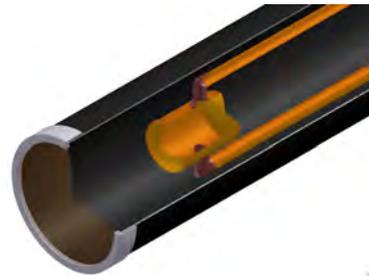


Abbildung 1.12: Zeichnung der Kapton-Zelle des Flüssig-Wasserstoff-Targets [34].

e) Crystal-Barrel-Detektor

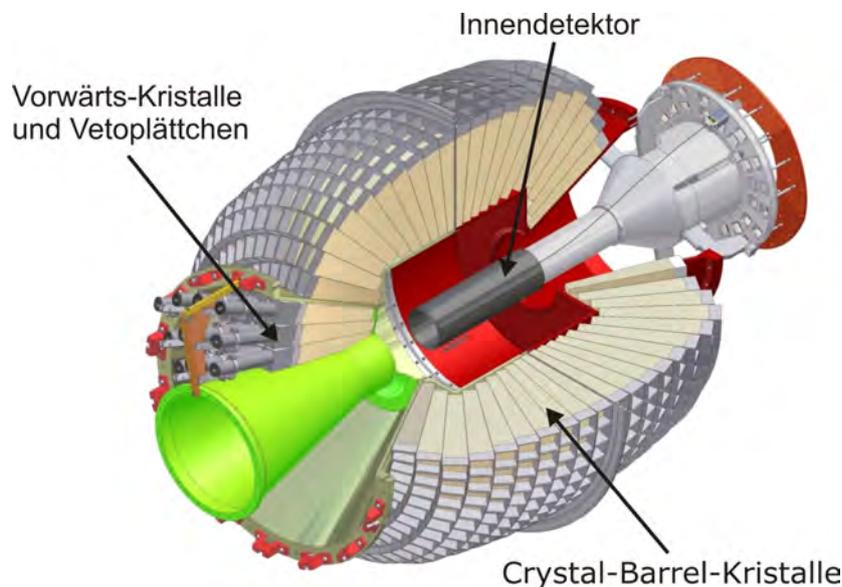


Abbildung 1.13: Der Crystal-Barrel-Detektor mit Innen- und Vorwärtsdetektor [34].

Um das polarisierte Target herum bildet der Crystal-Barrel-Detektor die zentrale Komponente des CBELSA/TAPS-Experiments. Als totalabsorbierendes, elektromagneti-

sches Kalorimeter dient der Detektor dazu, die Energie der im Target erzeugten neutralen Reaktionsprodukte zu bestimmen, wobei er auf den Nachweis von Photonen mit einer Energie von bis zu 2 GeV optimiert ist. Die 1230 fassförmig in 21 Ringen angeordneten CsI(Tl)-Kristalle⁹ des Detektors decken einen Polarwinkelbereich θ von 30°-156° und einen Azimutwinkel ϕ von 360° in 6°-Schritten ab.

Die verwendeten Kristalle haben eine Länge von 30 cm. Bei einer Strahlungslänge von 1,86 cm in CsI(Tl) deponieren 2-GeV-Photonen nahezu ihre gesamte Energie in den Kristallen. Trifft ein Photon einen der Kristalle, erzeugt er durch Paarbildung und Bremsstrahlung einen elektromagnetischen Schauer, der sich kegelförmig auf die benachbarten Kristalle ausweitet und nicht nur in einem einzigen Kristall ein Signal generiert. Solche als Cluster¹⁰ bezeichneten Anhäufungen werden mit Hilfe des Fast-Cluster-Encoders (FACE) identifiziert und einem einzelnen, detektierten Photon zugewiesen [40]. Mit dem Crystal-Barrel-Detektor lässt sich somit eine Winkelauflösung von unter 1,5° sowie eine energieabhängige, relative Energieauflösung von 5,5 % für niedereenergetische Teilchen beziehungsweise 2,5 % für Teilchenenergien über 1 GeV erreichen [41].



Abbildung 1.14: Foto eines Kristalls (3) des Crystal-Barrel-Kalorimeters mit Photodiodenauslese (1), Wellenlängenschieber (2) und Ummantelung (4).

Die Auslese der Kristalle erfolgt über Photodioden. Diese sind mit einem Wellenlängenschieber an die Rückseite der Kristalle gekoppelt (siehe Abbildung 1.14). So ist sichergestellt, dass sich die Wellenlänge des Lichts im optimalen Bereich für die Diode befindet und kein Licht in den Kristall zurück gestreut wird.

Zur Überwachung der Langzeitstabilität und zur relativen Energieeichung ist jeder Kristall über einen Lichtwellenleiter mit einem Lichtpulsersystem verbunden. Verschiedene Filter ermöglichen es, die Intensität der dort generierten Lichtpulse zu variieren, so dass sich die Deposition verschiedener Energien simulieren lässt [42].

f) Vorwärtsdetektor

Da es sich bei dem CBELSA/TAPS-Experiment um ein Fixed-Target-Experiment handelt, ist die Teilchenrate in Vorwärtsrichtung aufgrund des Lorentzboosts deutlich erhöht. Die vorderen drei Ringe des Crystal-Barrel-Kalorimeters wurden daher auf eine Auslese mit Photomultipliern umgerüstet [43, 44]. Die 90 umgebauten CsI(Tl)-Kristalle erlauben eine hohe Ereignisrate und decken einen Polarwinkelbereich von 11,2°-27,5° und einen Azimutwinkel von 360° ab. Vor den Kristallen sind in zwei Lagen 180 Szintillationsplättchen angebracht. Diese werden von Vielfachphotomultipliern ausgelesen und dienen zur Identifizierung geladener Teilchen. Der Vorwärtsdetektor ist somit in der Lage, geladene und ungeladene Reaktionsprodukte mit hoher Effizienz und einer für die erste Triggerstufe geeigneten Geschwindigkeit zu detektieren.

⁹CsI(Tl) - mit Thallium dotiertes Cäsium-Jodid

¹⁰cluster (engl.) - Anhäufung

g) MiniTAPS-Detektor

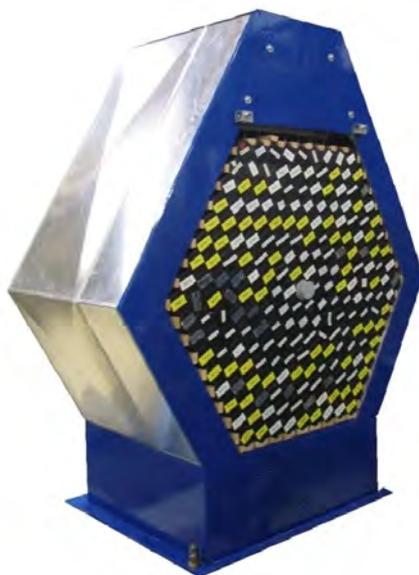


Abbildung 1.15: Der MiniTAPS-Detektor mit seinen 216 BaF₂-Kristallen.

Der Winkelbereich von 1°-12° wird vom Vorwärtsdetektor nicht abgedeckt. Diese Lücke wird vom MiniTAPS-Detektor geschlossen. Dieser besteht aus 216 hexagonalen, mit Photomultipliern ausgelesenen BaF₂-Kristallen¹¹. Durch die kleine Signaldauer im Kristall von 0,9 ns ist der Detektor in der Lage, die hohen Teilchenraten in Vorwärtsrichtung zu verarbeiten.

Ähnlich wie beim Vorwärtsdetektor befindet sich vor jedem der Kristalle ein 5 mm dickes Szintillationsplättchen, welche über wellenlängenschiebende Fasern und Photomultiplier ausgelesen werden. Dies ermöglicht auch hier eine Unterscheidung zwischen geladenen und ungeladenen Teilchen.

h) Innendetektor

Der Innendetektor umgibt das Target (siehe Abbildung 1.8) und erlaubt die Identifizierung geladener Reaktionsprodukte [45, 46]. Er setzt sich aus 513 szintillierenden Fasern mit einem Durchmesser von 2 mm und einer aktiven Länge von 40 cm zusammen, die mit Vielfachphotomultipliern ausgelesen werden. Die Fasern sind in Vorwärtsrichtung mit aluminisierter Mylarfolie¹² verspiegelt und in Rückwärtsrichtung mit optischem Zement an Lichtleiter gekoppelt, welche die Lichtpulse zu den Photomultipliern leiten. Die Fasern sind zylinderförmig in drei Lagen angeordnet, wobei die innere Lage schraubenförmig um -24,5° und die mittlere um +25,7° gegenüber der äußeren, parallel zur Strahlachse verlaufenden Lage verdreht sind (siehe Abbildung 1.16). Durch diese Geometrie ist es möglich, den Durchstoßpunkt eines geladenen Teilchens durch die Zylinderoberfläche des Innendetektors auf 0,5 mm senkrecht zur Strahlachse und

¹¹BaF₂ - Bariumfluorid

¹²Mylar - Markenname für eine Folie aus Polyethylenterephthalat (PET)



Abbildung 1.16: Der Innendetektor (links) sowie die drei gegeneinander verdrehten Szintillatorlagen (rechts) [34].

1,6 mm in Richtung der Strahlachse zu rekonstruieren. Jede der drei Lagen ist auf einen Kohlefaserzylinder geklebt, so dass die Abstände der Fasermittelpunkte der einzelnen Lagen zur Strahlachse 5,8 cm, 6,1 cm und 6,5 cm betragen.

Während neutrale Teilchen den Detektor nahezu ohne Wechselwirkung passieren können, deponieren ionisierende Teilchen typischerweise mehr als 400 keV pro Lage und werden mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,86 % in mindestens einer Lage nachgewiesen. Für eine Rekonstruktion des Durchstoßpunktes muss das Teilchen in mindestens zwei Lagen ein Signal erzeugt haben. Die Nachweiswahrscheinlichkeit beträgt hierfür 98,25 %. Die Zeitauflösung des Detektors liegt bei etwa 2 ns [47].

i) Gas-Čerenkov-Detektor

Aufgrund der kleineren Reichweite der starken Wechselwirkung ist der Wirkungsquerschnitt für hadronische Reaktionen im Target im Vergleich zu dem elektromagnetischer Reaktionen um einen Faktor 1000 geringer. Durch Compton-Streuung und Paarproduktion wird insbesondere beim Einsatz des Butanoltargets eine große Anzahl Elektronen und Positronen erzeugt, die zwar Signale in den Detektoren generieren, mit den zu untersuchenden Reaktionen jedoch nicht in Verbindung stehen.

Um diesen elektromagnetischen Untergrund bereits während der Datennahme zu identifizieren, zu unterdrücken und somit den Anteil hadronischer Ereignisse in den aufgenommenen Daten zu erhöhen, ist zwischen dem Vorwärts- und dem MiniTAPS-Detektor ein Gas-Čerenkov-Detektor installiert [48]. In dem als Medium verwendeten Kohlenstoffdioxid (CO_2) erzeugen Elektronen und Positronen ab einer Schwellenenergie E_s von 17,43 MeV Čerenkov-Licht und können somit nachgewiesen werden. Geladene Pionen, die leichtesten erwünschten Reaktionsprodukte, würden erst ab einer Energie von $E_s = 4,7$ GeV, und damit oberhalb der maximal erreichbaren Energie des Beschleunigers, ein Signal erzeugen.

Das Gas ist in dem in Abbildung 1.17 gezeigten Aluminiumkubus mit den Maßen $1\text{ m} \times 1,2\text{ m} \times 1,2\text{ m}$ eingeschlossen und deckt einen Winkelbereich von 0° - $12,8^\circ$ ab. Im Inneren fokussiert ein elliptisch geformter Spiegel das Čerenkov-Licht auf einen Photomultiplier, so dass Elektronen und Positronen mit einer Wahrscheinlichkeit von $(99,72 \pm 0,45)\%$ detektiert werden. Die Zeitauflösung liegt bei 1,2 ns [47].



Abbildung 1.17: Gas-Čerenkov-Detektor.

j) Detektoren zur Photonenflussbestimmung

Den Abschluss der Photonenstrahlachse bilden zwei Detektoren zur Bestimmung des Photonenflusses, welcher für die absolute Bestimmung der Wirkungsquerschnitte und zur Normierung verschiedener Strahlzeiten notwendig ist.

Der Gamma-Intensitäts-Monitor (GIM) besteht aus 16 PbF_2 -Kristallen¹³, die sich in einer 4×4 -Anordnung vor dem Photonenstrahlvernichter befinden und mit Photomultipliern ausgelesen werden [49]. Da die Photomultiplier bei hohen Teilchenraten in Sättigung gehen und somit nicht mehr alle Photonen individuell detektieren, wird der GIM durch den Flussmonitor (FluMo) ergänzt [50]. Der FluMo besteht aus einem Szintillationsdetektor als Veto­zähler, einem Kupferkonverter und zwei weiteren, in Koinzidenz geschalteten Szintillationsdetektoren (siehe Abbildung 1.18). Am Konverter erzeugen Photonen mit einer bekannten Wahrscheinlichkeit Elektron-Positron-Paare, welche in den Szintillationsdetektoren registriert werden. Nach vorheriger Eichung mit dem GIM ist es somit möglich, den Fluss auch bei hohen Raten präzise zu bestimmen.

k) Trigger

Um die Menge der aufzuzeichnenden Daten zu reduzieren und die spätere Datenanalyse zu vereinfachen, wird die Auslese der Detektoren über einen FPGA¹⁴-basierten Trigger gesteuert [51]. Mit den Signalen der Photonenmarkierungsanlage, des Innendetektors, der Vorwärts-Kristalle und -Vetoplättchen, des Gas-Čerenkov-Detektors sowie

¹³ PbF_2 - Bleifluorid

¹⁴FPGA - **F**ield **P**rogrammable **G**ate **A**rray (engl.) - frei programmierbarer Logikschaltkreis

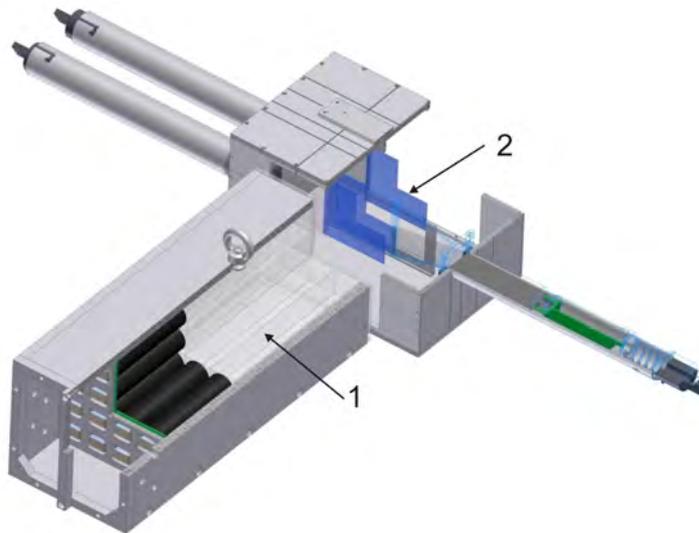


Abbildung 1.18: Zeichnung des Gamma-Intensitätsmonitors (1) und des Flussmonitors (2) [34].

der MiniTAPS-Kristalle wird in einer ersten Triggerstufe innerhalb von 280 ns entschieden, ob ein Ereignis Signaturen für erwünschte Ereignisse enthält. Wenn dies der Fall ist, wird in der zweiten Triggerstufe innerhalb von 10 μs geprüft, ob die geforderte Anzahl an Clustern im Crystal-Barrel-Detektor detektiert wurde. In diesem Fall werden alle Detektoren ausgelesen und die Daten gespeichert. Andernfalls werden alle Detektoren zurückgesetzt, damit ein neues Ereignis aufgenommen werden kann.

Die Aufteilung auf zwei Triggerstufen ist notwendig, da die Signale der CsI(Tl)-Kristalle im Crystal-Barrel-Kalorimeter eine große Anstiegszeit haben und die Weiterverarbeitung und Auswertung dieser Signale durch die Elektronik bis zu 6 μs dauern kann.

1.2.3 Erweiterung des bestehenden Aufbaus

In den nächsten Jahren sind für das CBELSA/TAPS-Experiment zwei wesentliche Umbauten geplant:

- a) Um Reaktionen mit komplett neutralen Endzuständen, wie zum Beispiel



mit größerer Effizienz detektieren zu können, wird der Crystal-Barrel-Detektor in die erste Triggerstufe integriert.

- b) Der Austausch des Innendetektors durch einen Spurdetektor ermöglicht unter anderem den Nachweis von Reaktionen, die mit einem elektromagnetischen Kalorimeter wie dem Crystal-Barrel-Detektor bisher nicht gemessen werden konnten, beispielsweise



a) Triggerfähigkeit des Crystal-Barrel-Kalorimeters

Die Auslese der Kristalle mit Photodioden ist mit $6\ \mu\text{s}$ langsam und verhindert bisher die Berücksichtigung des Crystal-Barrel-Detektors in der ersten Triggerstufe. Durch Umrüstung der Kristalle auf eine Auslese mit Avalanche-Photodioden (APDs) und eine Verbesserung der zugehörigen Ausleseelektronik wird es ermöglicht, ausreichend schnelle Signale für diese erste Triggerstufe zu generieren [52, 53]. Neben der Verringerung der Totzeit des Experiments durch den Wegfall der zweiten Triggerstufe, wird hierdurch die Triggerakzeptanz für komplett neutrale Kanäle nahezu auf den gesamten Winkelbereich erweitert (siehe Abbildung 1.19).

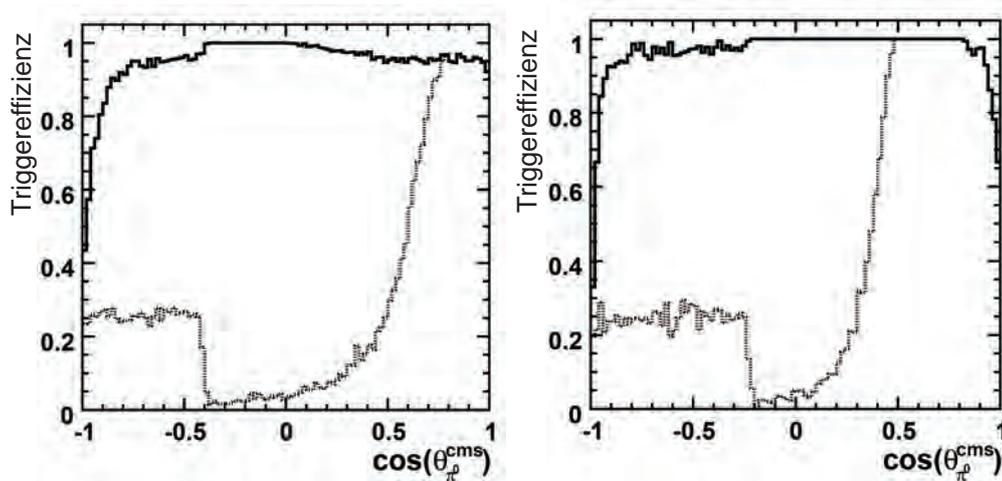


Abbildung 1.19: Simulation der Triggereffizienz für die Reaktion $\gamma n \rightarrow n \pi^0$ für Photonenergien von 700 MeV (links) beziehungsweise 2 GeV (rechts). Die gestrichelte Linie gibt die derzeit mögliche, die durchgezogene Linie die nach dem Umbau erwartete Effizienz an [54].

In Tests unter realistischen Experimentbedingungen mit einem Block aus 3×3 umgebauten CsI(Tl)-Kristallen wurde eine Zeitauflösung von weniger als 3 ns für Photonenergien über 100 MeV erreicht, bei einer Energieauflösung im Bereich der alten Photodiodenauslese [55]. Auf die Endfläche der Kristalle wurden jeweils zwei APDs des Typs HAMAMATSU S11048(X3) geklebt und die restliche Endfläche mit hochreflektierender Folie zur Steigerung der Lichtausbeute bedeckt. Die neu entwickelte Elektronik umfasst neben einem ladungsempfindlichen Vorverstärker, einer temperatursensitiven Steuerung der Hochspannungsversorgung für die APDs und einem Linedriver¹⁵ für die Signalübertragung, die sich noch im Gehäuse der Kristalle befinden (siehe Abbildung 1.20), auch neue zeit- beziehungsweise energieoptimierte Signalfilter, Diskriminatoren, sADC¹⁶-Auslese und ein neues, LED betriebenes Lichtpulsersystem.

Der Umbau des gesamten Crystal-Barrel-Detektors wird Anfang 2014 beginnen, nachdem alle Bauteile geliefert, zusammgebaut und getestet wurden.

¹⁵linedriver (engl.) - Leitungsverstärker

¹⁶sADC - sampling Analog to Digital Converter (engl.) - abtastender Analog-zu-Digital-Wandler



Abbildung 1.20: Neue entwickelte und im Gehäuse der Kristalle untergebrachte Elektronik (1-3) und Avalanche-Photodioden (4).

b) Spurdetektor

Der Einsatz einer Zeitprojektionskammer (TPC¹⁷) als Spurdetektor im Inneren des Crystal-Barrel-Detektors bringt für das CBELSA/TAPS-Experiment mit einer verbesserten Winkelauflösung, der Möglichkeit neue Reaktionskanäle durch Messung geladener Endzustände zu untersuchen oder der Bestimmung der Teilchenart aus dem Impuls und dem spezifischen Energieverlust des Teilchens einige Vorteile gegenüber dem bisher verwendeten Innendetektor (siehe Kapitel 2 und [56, 57]) oder alternativen Spurdetektoren, wie Draht- oder Spiraldriftkammern (siehe [56]).

In Kollaboration mit der TU München, dem Detektorlabor der GSI in Darmstadt und dem Stefan-Meyer-Institut der Universität Wien wurde daher ein TPC-Prototyp gebaut (siehe Abbildung 1.21), der mit GEMs¹⁸ zur Ladungsverstärkung in der Gasphase arbeitet und von seinen Abmessungen genau den Anforderungen des CBELSA/TAPS-Experiments und des FOPI-Experiments an der GSI entspricht (Kapitel 2.5). Im FOPI-Experiment wurde der Prototyp bereits erfolgreich bei mehreren Strahlzeiten als zentraler Spurdetektor verwendet.

Für systematische Studien an einer kleinen Test-TPC wurde eine TestBench¹⁹ aufgebaut, die mit vier paarweise angeordneten Szintillationsdetektoren, zwei planaren GEM-Detektoren und zwei Siliziumstreifendetektoren eine exzellente externe Spurdefinition bietet (siehe Kapitel 2.4 und [56]).

¹⁷TPC - Time Projection Chamber (engl.)

¹⁸GEM - Gas Electron Multiplier (engl.) - Gaselektronenvervielfacher

¹⁹bench (engl.) - Arbeitstisch

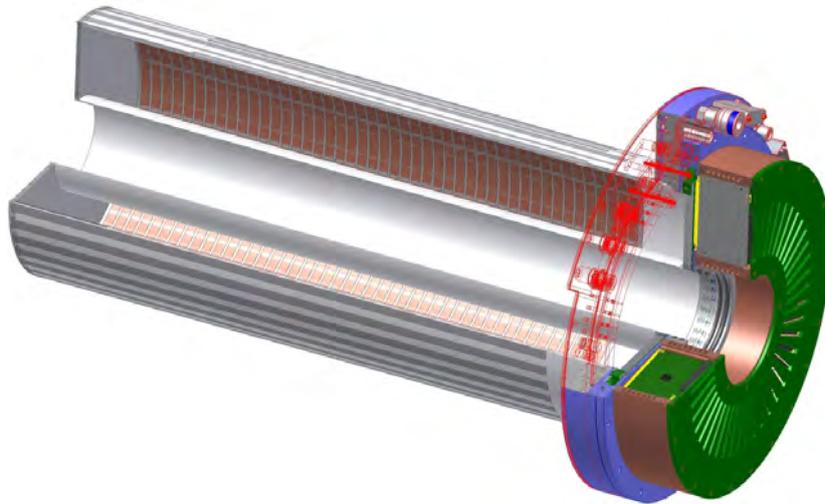


Abbildung 1.21: Zeichnung der GEM-TPC.

Da eine genaue Kenntnis der Driftgeschwindigkeit für eine präzise Spurrekonstruktion unabdingbar ist, wurden hierzu detaillierte Simulationen durchgeführt (Kapitel 3). Aus den Ergebnissen der Simulation sowie für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb der Zeitprojektionskammern ergibt sich die Notwendigkeit einer präzisen Steuerung und Überwachung der Detektorparameter. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher sowohl für den TPC-Prototypen als auch für die Detektoren auf der TestBench eine datenbankbasierte Steuerungssoftware („SlowControl“, Kapitel 4 und 5) mit graphischer Benutzeroberfläche (GUI²⁰, Kapitel 5.4) entwickelt, die erfolgreich bei mehreren Strahlzeiten und Testmessungen eingesetzt werden konnte.

Während die Messungen mit der Test-TPC vor allem zum Testen einzelner Komponenten und Einstellungen durchgeführt wurden, wird mit den Daten der GEM-TPC das physikalische Programm des FOPI-Experiments unterstützt und erweitert [58]. Um die Fehler bei der Rekonstruktion dieser Daten zu minimieren, wurde für eine noch genauere Bestimmung der z -Koordinaten der Teilchenspuren die Driftgeschwindigkeit aus den aufgezeichneten Daten bestimmt und mit den theoretischen Vorhersagen der Simulation verglichen (Kapitel 7).

²⁰GUI - **G**raphical **U**ser **I**nterface (engl.) - graphische Benutzerschnittstelle

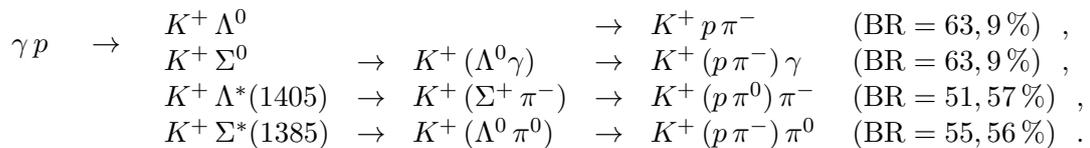
Ich weiss nicht, ob es besser
wird, wenn es anders wird.
Aber es muss anders werden,
wenn es besser werden soll.

(Georg Christoph Lichtenberg)

2 Eine Zeitprojektionskammer für das CBELSA/TAPS-Experiment

Mit dem derzeit verwendeten Innendetektor des CBELSA/TAPS-Experiments lassen sich die Koordinaten des Durchstoßpunkts eines geladenen Teilchens und der Zeitpunkt des Ereignisses bestimmen. Für den Fall, dass ein räumlich passender Treffer im Crystal-Barrel-Detektor vorliegt, und mit der Annahme, dass der Ursprung des Teilchens in der Mitte des Targets liegt, kann eine Teilchenspur als Gerade mit einer Winkelauflösung von $\sigma_\theta \approx 1,5^\circ$ und $\sigma_\phi \approx 0,5^\circ$ rekonstruiert werden. Mit Hilfe des Innendetektors kann somit für ein detektiertes Teilchen im Crystal-Barrel-Detektor zwischen einem Photon und einem geladenen Teilchen unterschieden werden. Das Kalorimetersignal alleine genügt nicht für diese Unterscheidung. Der Nachweis von primären und sekundären Zerfallsvertices der Reaktionsprodukte ist wegen der kurzen Lebensdauer der Zerfallsprodukte allerdings nicht möglich, ebenso wenig wie eine direkte Impulsbestimmung, die Messung des Energieverlustes dE/dx , die Detektion geladener Endzustände oder eine Teilchenidentifikation.

Mit einem Spurdetektor im Inneren des Crystal-Barrel-Detektors lassen sich entlang der Flugbahn eines Teilchens deutlich mehr Spurpunkte rekonstruieren, so dass die Winkelauflösung in diesem Bereich bedeutend verbessert wird. Dadurch, dass Reaktionen mit geladenen Endzuständen gemessen werden können, ist es zudem möglich, neue Zerfallskanäle zu untersuchen und die Statistik bereits untersuchter Kanäle signifikant zu erhöhen. Vor allem Hyperonen-Zerfälle, also Zerfälle von Baryonen mit mindestens einem Strange-Quark, sind von besonderem Interesse, beispielsweise:



Die Hyperonen lassen sich aufgrund ihrer mittleren freien Weglänge von nur wenigen Zentimetern durch die Vermessung von Primär- und Sekundärvertices identifizieren und ermöglichen unter anderem durch ihren selbstanalysierenden Zerfall die Bestimmung von Rückstoßpolarisationsobservablen, zum Beispiel P , $O_{x'}$, $O_{z'}$, $C_{x'}$ oder $C_{z'}$. Zusammen mit den bereits messbaren Zerfällen und Observablen wird somit erstmals ein vollständiges Experiment realisierbar.

Zerfälle leichter Mesonen, wie η , η' , ϕ , ω , konnten bisher nur aus neutralen Endzuständen, insbesondere 2-, 3- oder 4-Photon-Endzuständen, rekonstruiert werden. Beim ω -Meson ist die Wahrscheinlichkeit für einen geladenen Zerfall in $\pi^+ \pi^- \pi^0$ ($\text{BR}^{21} = 89,2\%$)

²¹BR - **B**ranching **R**atio (engl.) - Verzweigungsverhältnis, Werte nach PDG [14]

allerdings deutlich höher als die Wahrscheinlichkeit für einen neutralen Zerfall, beispielsweise in $\pi^0\gamma$ (BR = 8,28%). Die Anzahl rekonstruierter ω -Mesonen kann somit um einen Faktor 11 gesteigert werden und auch für andere Reaktionen ist eine Verbesserung der Statistik zu erwarten, wenn neutrale und geladene Kanäle detektiert werden können:

$$\begin{array}{lcl} \gamma N & \rightarrow & \begin{array}{l} N \omega \rightarrow N \pi^+ \pi^- \pi^0 \quad (\text{BR} = 89,2\%) \ , \\ N \phi \rightarrow N K^+ K^- \quad (\text{BR} = 48,9\%) \ , \\ N \eta' \rightarrow N \pi^+ \pi^- \eta \quad (\text{BR} = 43,4\%) \ , \\ N \eta \rightarrow N \pi^+ \pi^- \pi^0 \quad (\text{BR} = 22,74\%) \ . \end{array} \end{array}$$

Weitere Vorteile bringt ein Spurdetektor in Kombination mit einem homogenen Magnetfeld. Neben einer Verringerung niederenergetischen Untergrunds ist es durch die Ablenkung geladener Teilchen im Magnetfeld B durch die Lorentzkraft möglich, den Transversalimpuls p_t des Teilchens aus dem Krümmungsradius r seiner Bahn zu bestimmen:

$$p_t \text{ [GeV]} = 0,3 \cdot B \cdot r \text{ [T} \cdot \text{m]} \ .$$

Aus dem spezifischen Energieverlust dE/dx und dem Impuls lässt sich zudem die Art des Teilchens identifizieren.

2.1 Anforderungen

Ein Spurdetektor für das CBELSA/TAPS-Experiment muss eine sehr gute Nachweiswahrscheinlichkeit für geladene Teilchen bei möglichst optimaler Spurrekonstruktion ermöglichen. Um Vielfachstreuung und Absorption der zu messenden Teilchen zu vermeiden, sollte die Materialbelegung des Detektors unter 1% X_0 liegen. Die Ausdehnung des Spurdetektors ist durch die Innenmaße des Crystal-Barrel-Detektors und die Größe des Targetkryostaten auf einen Außenradius von $r_{\text{au\ss en}} \leq 310$ mm und einen Innenradius von $r_{\text{innen}} \geq 100$ mm beschränkt (siehe Abbildung 2.1).

Wie in [56] gezeigt, kann eine Zeitprojektionskammer diese Anforderungen erfüllen. Da die Entwicklung und Implementierung einer solchen TPC einen großen Aufwand erfordert, wurde sie in Kollaboration mit der Technischen Universität München, dem Detektorlabor der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt und dem Stefan-Meyer-Institut der Universität Wien vorangetrieben. Diese GEM-TPC-Kollaboration hat es sich zum Ziel gesetzt, eine TPC mit GEM-basierter Auslese als zentralen Spurdetektor für das $\overline{\text{PANDA}}$ -Experiment an der neuen Beschleunigeranlage FAIR²² an der GSI zu bauen [59, 60]. Ein erster Prototyp dient dabei sowohl als Machbarkeitsstudie für dieses Detektorkonzept sowie als Spurdetektor für das FOPI-Experiment an der GSI und das CBELSA/TAPS-Experiment an ELSA.

2.2 Funktionsweise einer Zeitprojektionskammer

Als Verbesserung der damals üblichen Driftkammern entwickelte David R. Nygren 1974 das grundlegende Konzept der Zeitprojektionskammer [61, 62].

²²FAIR - Facility for Antiproton and Ion Research, <http://www.fair-center.de>

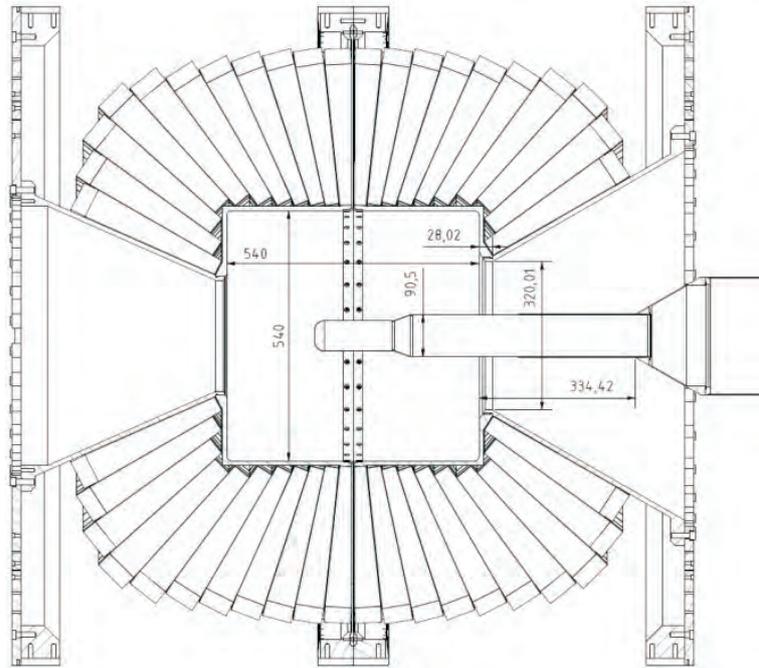


Abbildung 2.1: Schematische Zeichnung des Crystal-Barrel-Detektors mit Abständen und Innenmaßen in Millimetern [34]. Das Targetrohr mit einem Durchmesser von 90,5 mm und die Aussparung in der Halterung der Crystal-Barrel-Kristalle mit einer Öffnung von 320 mm legen die absoluten geometrischen Grenzen für einen Spurdetektor im Inneren des Crystal-Barrel-Detektors fest.

Wie im nachfolgenden Abschnitt diskutiert, ionisieren geladene Teilchen bei der Durchquerung eines gasgefüllten Driftvolumens die Atome entlang ihrer Flugbahn (Abbildung 2.2). Durch ein parallel zur Längsachse angelegtes elektrisches Feld driften die erzeugten Ionen in Richtung Kathode, die Elektronen in Richtung Anode. Dort werden sie zunächst vervielfacht, bevor sie auf eine Ausleseebene treffen. Durch die Segmentierung dieser (x,y) -Ebene kann die zweidimensionale Projektion der Teilchenspur detektiert werden. Aus der Zeitdifferenz zwischen dem Teilchendurchgang und dem Zeitpunkt der Signalerkennung (Δt) sowie der Driftgeschwindigkeit der Elektronen v_{drift} lässt sich die für eine dreidimensionale Rekonstruktion der Teilchenspur fehlende z -Koordinate berechnen:

$$z = v_{\text{drift}} \cdot \Delta t.$$

Um das elektrische Feld über das gesamte Detektorvolumen möglichst homogen zu halten, sind feldführende Kupfer- oder Aluminiumstreifen an der Detektorhülle angebracht. Eine Widerstandskette zwischen Anode und Kathode definiert das Potential dieser Feldstreifen. Somit wird ein gleichmäßiger Potentialgradient erzeugt. Ein parallel zur Längsachse und dem Driftfeld angelegtes Magnetfeld reduziert die Diffusion in transversaler Richtung und erhöht auf diese Weise die mögliche Auflösung. Zudem ermöglicht die Krümmung der Teilchenspuren im Magnetfeld die Bestimmung des Transversalimpulses p_t der Teilchen, welcher für eine Identifizierung der Teilchenart notwendig ist. Pro Spur werden einige 100 Elektronen produziert. Dieses Primärsignal muss vor der Auslese verstärkt werden. In Zeitprojektionskammern, wie sie in mehreren großen Ex-

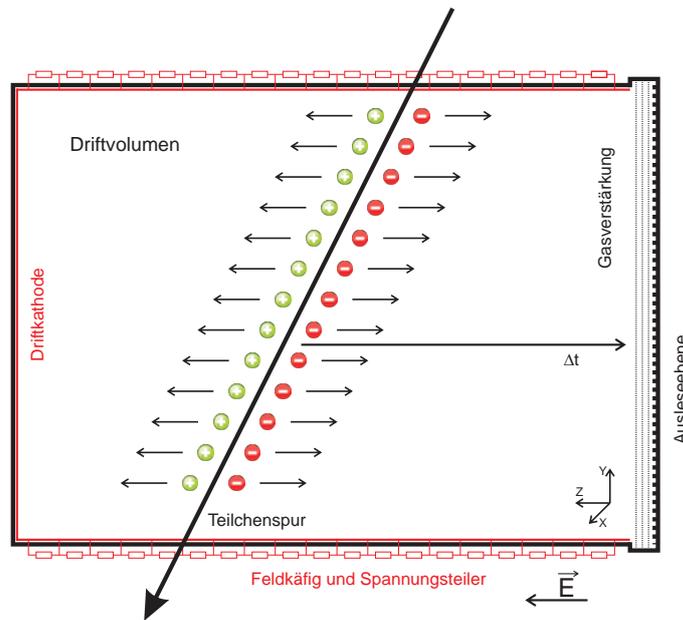


Abbildung 2.2: Aufbau und Funktionsprinzip einer TPC.

perimenten, beispielsweise NA49 [63], STAR [64] oder ALICE [65, 66], im Einsatz sind, wird diese Verstärkung durch Vieldrahtproportionalkammern (MWPC) erreicht. Durch das starke Feld in der Nähe der Drähte erhalten die Elektronen genug Energie, um durch Stöße weitere Gasatome zu ionisieren und so eine Ladungslawine auszulösen. Hierdurch ist eine Verstärkung in der Größenordnung $10^3 - 10^5$ möglich. Die entstehenden Ionen können jedoch in das Detektorvolumen zurückdriften und dort Feldverzerrungen verursachen, die in einer Verschlechterung der Energie- und Ortsauflösung resultieren. Dieser Ionenrückfluss muss durch eine schaltbare, elektrostatische Blende in Form eines zusätzlichen Gitters unterdrückt werden, wodurch die maximale Ausleserate des Detektors durch die hiervon hervorgerufene Totzeit begrenzt wird.

Durch die Verwendung von Gas Electron Multipliern (GEMs) zur Verstärkung wird dieses Problem umgangen, da der Ionenrückfluss hier intrinsisch unterdrückt und somit

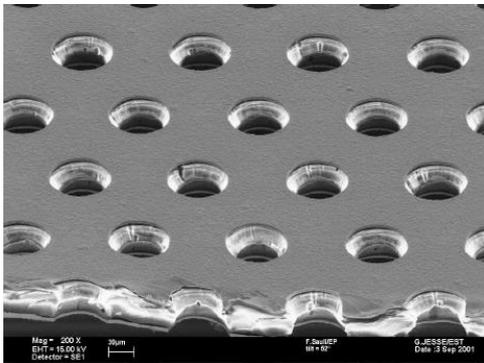


Abbildung 2.3: Aufnahme einer GEM-Folie mit einem Elektronenmikroskop [67].

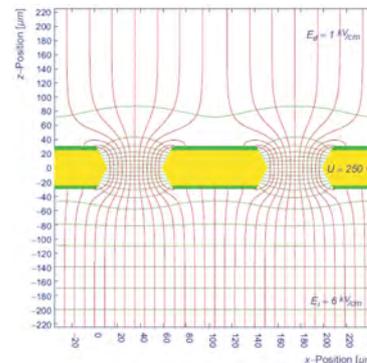


Abbildung 2.4: Verlauf des elektrischen Feldes an einer GEM-Folie [68].

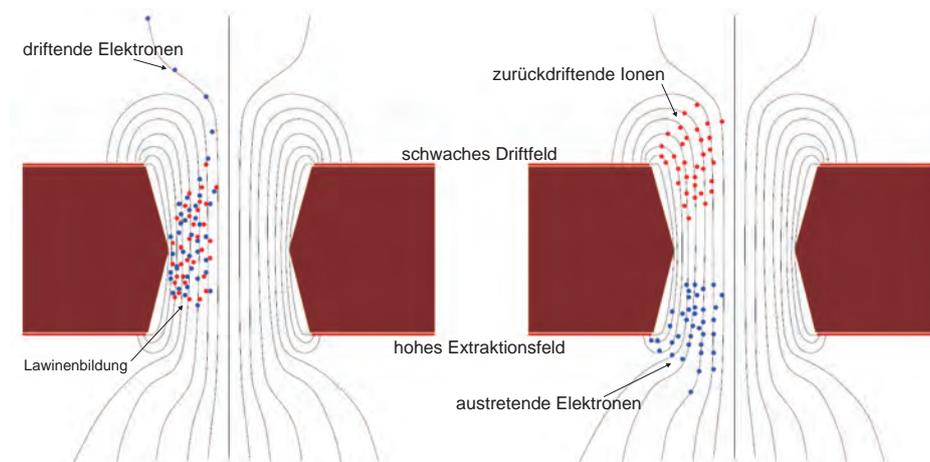


Abbildung 2.5: Verstärkung an einer GEM-Folie: Elektronen werden in die Löcher geleitet, wo es durch die hohen elektrischen Felder zu einer lawinenartigen Bildung von Elektron-Ion-Paaren kommt (links). Durch die asymmetrische Feldverteilung und die geringere Beweglichkeit der Ionen werden diese auf der Vorderseite der GEM-Folie aufgefangen, während ein Großteil der Elektronen an der Rückseite der GEM-Folie austritt (rechts). [70]

eine freilaufende Datennahme ermöglicht werden kann.

Die ersten GEMs wurden 1997 von F. Sauli am CERN entwickelt [69]. Sie bestehen aus einer 50 μm dicken, isolierenden Polyimidfolie, zum Beispiel Kapton, die beidseitig mit 2-5 μm Kupfer beschichtet ist. Durch Photolithographie werden doppelt-konische Löcher mit einer Größe von 50-70 μm und einem regelmäßigen Abstand von 140 μm in die Folie geätzt (siehe Abbildung 2.3). Wird zwischen den beiden Kupferschichten eine Spannung von typischerweise 300-400 V angelegt, werden in den Löchern sehr hohe Feldstärken von einigen 10 kV/cm erreicht, wie in Abbildung 2.4 dargestellt ist. Durch die Feldkonfiguration vor der GEM-Folie werden die zu verstärkenden Elektronen in die Löcher geleitet, wo es aufgrund der hohen Feldstärke zu einer Lawinenbildung kommt. Während die Elektronen hinter der Folie austreten und zur nächsten Verstärkerstufe oder zur Auslese gelangen, werden die Ionen durch die asymmetrische Feldverteilung auf der Vorderseite der GEM-Folie gesammelt und können auf diese Weise nicht zurück ins Detektorvolumen driften. Abbildung 2.5 zeigt diesen Vorgang schematisch.

Mit der Kombination mehrerer GEM-Folien zu einem Double- oder Triple-GEM-Stack lässt sich der Ionenrückfluss weiter minimieren und eine Verstärkung in der Größenordnung 10^4 bis 10^5 erreichen, ohne die notwendigen Spannungen zwischen Ober- und Unterseite der einzelnen Folien oder die Transferfelder zwischen den Folien beziehungsweise das Extraktionsfeld hinter der letzten Folie zu hoch einstellen zu müssen.

Die ersten Gasdetektoren mit GEM-Strukturen wurden für das COMPASS-Experiment am CERN entwickelt [71, 72] und zeichnen sich durch eine gute Ortsauflösung von rund 100 μm und eine hohe Ratenfestigkeit bis zu einigen 10^7 Hz aus. In zahlreichen anderen Experimenten, beispielsweise LHCb [73], KLOE-2 [74] oder CMS [75], kommen seither GEM-Detektoren zum Einsatz.

Für ein tieferes Verständnis der Vorgänge in einer Zeitprojektionskammer werden die zugrunde liegenden physikalischen Vorgänge im folgenden Abschnitt näher erläutert.

2.3 Grundlegende Physik zum Betrieb einer Zeitprojektionskammer

Hochenergetische Teilchen können bei ihrem Durchgang durch Materie mit den Atomen und Molekülen entlang ihrer Flugbahn wechselwirken und dadurch Energie verlieren. Der gesamte Energieverlust der Teilchen pro Wegeinheit dE/dx ist durch die Summe der Beiträge verschiedener möglicher Prozesse gegeben:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{total}} &= \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Ionisation}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Anregung}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{hadronische WW}} \\ &+ \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Čerenkov}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Übergangsstrahlung}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Bremsstrahlung}} \\ &+ \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Photoeffekt}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Comptoneffekt}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Paarbildung}} + \dots \end{aligned} \quad (2.1)$$

Ob und wie stark die einzelnen Prozesse zum Gesamtverlust beitragen, hängt von der Art und der Energie der Teilchen ab. So treten beispielsweise Photo- und Comptoneffekt nur bei Photonen auf, Čerenkov-Strahlung nur bei geladenen Teilchen und erst ab einer material- und massenabhängigen Schwellenenergie.

2.3.1 Energieverlust geladener Teilchen

Für den Energieverlust geladener Teilchen in Materie ist fast ausschließlich deren Wechselwirkung mit den Hüllenelektronen verantwortlich. Hierzu zählen Bremsstrahlung, Übergangsstrahlung, Čerenkov-Strahlung sowie Anregung oder Ionisation der Atome im Material. Für Teilchen mit einer Masse $m \gg m_e$ dominieren Anregung und Ionisation über einen weiten Energiebereich. Der mittlere Energieverlust pro Wegstrecke lässt sich quantenmechanisch korrekt durch die Bethe-Bloch-Formel beschreiben [76]:

$$\frac{dE}{dx} = -4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z z^2}{A \beta^2} \cdot \left(\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2 m_e c^2 T_{max}}{I^2} \cdot \beta^2 \cdot \gamma^2 \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right) \quad (2.2)$$

Hierbei sind N_A die Avogadro-Konstante, r_e der klassische Elektronenradius, m_e die Elektronenmasse, c die Vakuumlichtgeschwindigkeit, Z, A die Kernladungs- und Massenzahl des durchquerten Materials, z die Ladung des Teilchens, $\beta = \frac{v}{c}$ die Geschwindigkeit des Teilchens in Einheiten der Vakuumlichtgeschwindigkeit, $\gamma = \sqrt{1/(1-\beta^2)}$ der Lorentz-Faktor, ρ die Dichte des Materials, T_{max} der maximale Energieübertrag bei einer einzelnen Kollision, I das mittlere Ionisationspotential des Materials und δ ein relativistischer Korrekturterm.

Der Energieverlust von Elektronen und Positronen kann nicht über die Bethe-Bloch-Formel berechnet werden, da hauptsächlich Elektronen als mögliche Wechselwirkungspartner zur Verfügung stehen und aufgrund der gleichen Massen eine wesentlich höhere Energie pro Stoß übertragen werden kann.

Wie in Abbildung 2.6 dargestellt ist, fällt die dE/dx -Kurve für niedrige Impulse proportional zu $(1/\beta)^2$ ab, unabhängig von der Art der Teilchen. Bei einem Wert von $\beta\gamma \approx 4$ wird ein Minimum erreicht. Teilchen in diesem Bereich werden als minimalionisierende Teilchen (MIP²³) bezeichnet. Nach einem logarithmischen Anstieg, bei dem sich der Verlauf durch $\sim \ln \beta\gamma$ beschreiben lässt, erreicht der Energieverlust mit zunehmender Teilchenenergie einen Sättigungswert, das sogenannte Fermi-Plateau.

Aus Abbildung 2.6 ist außerdem zu entnehmen, dass die dE/dx -Kurven für Teilchen

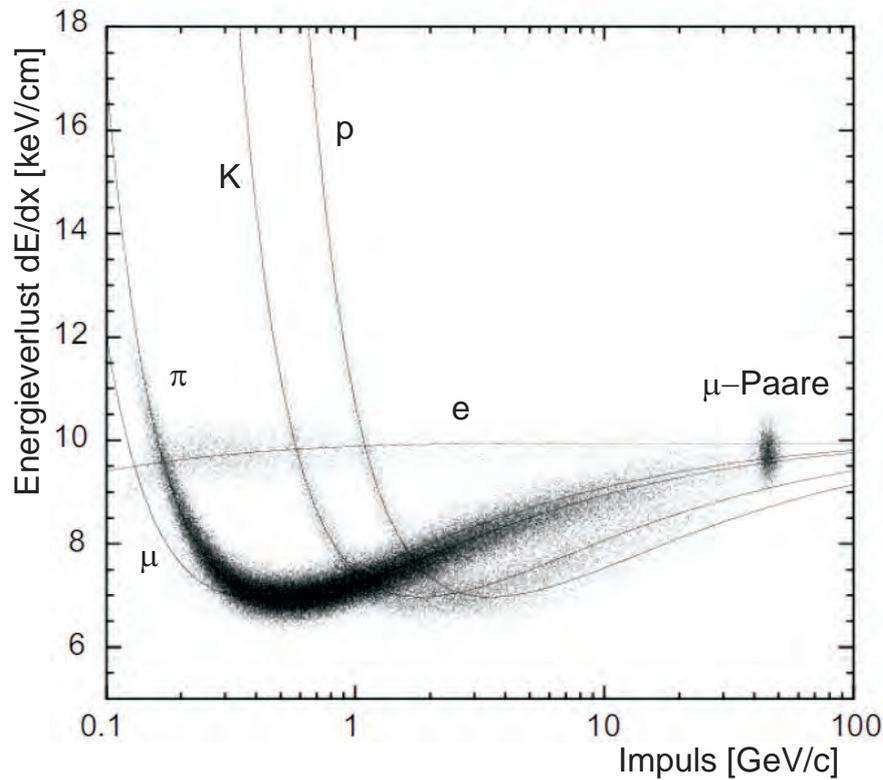


Abbildung 2.6: Spezifischer Energieverlust dE/dx geladener Teilchen in Abhängigkeit ihres Impulses, bestimmt mit der OPAL *jet chamber* [77].

mit verschiedenen Massen m einen unterschiedlichen Verlauf haben. Wird der Energieverlust mit hinreichender Genauigkeit bestimmt, kann daher auf die Art der Teilchen geschlossen werden.

Bei der direkten Wechselwirkung mit dem einfallenden Teilchen können die Hüllenelektronen genug Energie erhalten, um weitere Elektron-Ion-Paare im Material zu erzeugen. Auf diese Weise entstehen lokalisierte Cluster aus Elektron-Ion-Paaren mit unterschiedlicher Größe. Die Gesamtzahl der Elektron-Ion-Paare, welche bei der Ionisation durch die direkte Wechselwirkung oder die sekundären Prozesse entstehen, lässt sich mit Hilfe des mittleren Energieverlustes dE/dx und einer pro erzeugtem Elektron-Ion-Paar benötigten Energie berechnen. Letztere ist eine vom Material abhängige Größe und wird als W -Wert bezeichnet. Bei Gasgemischen, wie sie für Zeitprojektionskammern häufig verwendet werden, muss neben dem W -Wert der einzelnen Komponenten der jeweilige

²³MIP - Minimal Ionising Particle (engl.) - minimalionisierendes Teilchen

Gewichtsanteil berücksichtigt werden. Für die Anzahl erzeugter Elektron-Ion-Paare N ergibt sich

$$N = \frac{dE}{dx} \cdot l \cdot \sum_i \frac{c_i}{W_i} , \quad (2.3)$$

wobei l die Länge der Spur, c_i den Gewichtsanteil und W_i den Energieverlust pro produziertem Elektron-Ion-Paar der einzelnen Gaskomponenten bezeichnen. In häufig verwendeten Detektorgasen, wie Argon oder Neon, werden durch ein MIP ungefähr 50-100 Elektron-Ion-Paare/cm erzeugt.

2.3.2 Ladungstransport in Gasen

Ohne äußere Einflüsse bewegen sich die durch Ionisation freigewordenen Elektronen und Ionen willkürlich durch das Gas im Detektorvolumen, verlieren durch Mehrfachstöße nach und nach ihre Energie und können nach einer gewissen Zeit wieder rekombinieren, ohne nachgewiesen zu werden. Unter dem Einfluss eines äußeren elektrischen Feldes \vec{E} werden die Elektron-Ion-Paare hingegen getrennt und bewegen sich in Richtung der Driftnode beziehungsweise -kathode.

Während die Elektronen und Ionen durch die Stöße abgebremst werden, erfahren sie durch das elektrische Feld zwischen zwei Stößen eine Beschleunigung. Hierdurch stellt sich nach einigen Stößen eine konstante Durchschnittsgeschwindigkeit ein. Die Bewegung der Primärelektronen erfolgt dann parallel zum elektrischen Feld \vec{E} mit

$$\vec{v}_{\text{drift}} = \mu \cdot \vec{E} . \quad (2.4)$$

Die Konstante μ wird als Mobilität der Ladungsträger bezeichnet und ist von der Masse des Teilchens und der mittleren Zeit τ zwischen zwei Stößen und damit von den Eigenschaften des Driftgases abhängig. Für Elektronen gilt:

$$\mu_e = \frac{e}{m_e} \tau . \quad (2.5)$$

Äquivalent kann auch die Ionenmobilität μ_{Ion} beschrieben werden, die durch die höhere Masse der Ionen im Vergleich zur Masse der Elektronen deutlich geringer ist. Damit ist auch die Driftgeschwindigkeit der Ionen um mehrere Größenordnungen kleiner.

Wie aus Gleichung 2.4 zu entnehmen ist, wird die Driftrichtung durch die elektrischen Feldlinien vorgegeben und es gilt: Je homogener das angelegte Feld ist, desto genauer ist die Projektion der Teilchenspur auf die Ausleseebene. Aufgrund der statistischen Verteilung der Stöße weichen die Spuren der einzelnen Elektronen jedoch vom Mittelwert ab, so dass sich eine ursprünglich punktförmige Ladungswolke auf ihrem Weg durch das Detektorvolumen longitudinal und transversal zur Richtung des elektrischen Feldes verbreitert. Diese Diffusion kann über eine gaussförmige Verteilung beschrieben werden [78]:

$$P(\delta x, \delta y, \delta z) = \frac{1}{2\pi\sigma_T^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_L^2}} \cdot \exp\left(-\frac{\delta x^2 + \delta y^2}{2\sigma_T^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\delta z^2}{2\sigma_L^2}\right) . \quad (2.6)$$

Hierbei sind δx , δy und δz der Versatz der driftenden Elektronen von der idealen Spur. Die transversale und longitudinale Diffusion σ_T und σ_L lassen sich aus der zurückgelegten Driftstrecke l_{drift} und den vom Gas und der Feldkonfiguration abhängigen Diffusionskoeffizienten D_T und D_L berechnen:

$$\begin{aligned}\sigma_T &= D_T \sqrt{l_{\text{drift}}} \quad , \\ \sigma_L &= D_L \sqrt{l_{\text{drift}}} \quad .\end{aligned}$$

Die Werte für D_T und D_L können über Messungen oder mit Hilfe von Simulationen bestimmt werden.

Während die transversale Diffusion einen großen Einfluss auf das Auflösungsvermögen einer Zeitprojektionskammer in x - und y -Richtung hat, ist die Genauigkeit der z -Koordinate durch die Diffusionsverbreiterung der Ladungswolke in longitudinaler Richtung begrenzt.

Ist im Bereich des Driftvolumens neben einem elektrischen zusätzlich ein magnetisches Feld \vec{B} angelegt, so hat dieses ebenfalls einen Effekt auf die Driftgeschwindigkeit und die Diffusion, da die Teilchen aufgrund der Lorentz-Kraft zwischen zwei Stößen eine zusätzliche Beschleunigung erfahren. Nach [78] folgt für die Bewegung der Elektronen:

$$\vec{v}_{\text{drift}} = \mu_e |\vec{E}| \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2} \cdot \left(\frac{\vec{E}}{|\vec{E}|} + \omega \tau \left(\frac{\vec{E}}{|\vec{E}|} \times \frac{\vec{B}}{|\vec{B}|} \right) + \omega^2 \tau^2 \left(\frac{\vec{E}}{|\vec{E}|} \cdot \frac{\vec{B}}{|\vec{B}|} \right) \frac{\vec{B}}{|\vec{B}|} \right) \quad , \quad (2.7)$$

wobei $\omega = \frac{e}{m_e} B$ die Larmor-Frequenz der Elektronen im Magnetfeld bezeichnet. Sind beide Felder parallel zueinander orientiert, wie es bei einer Zeitprojektionskammer mit $E_x = E_y = B_x = B_y = 0$ der Fall sein sollte, entfällt der Term mit dem Vektorprodukt, das Skalarprodukt wird maximal und die Richtung der Driftspuren, die Driftgeschwindigkeit und die longitudinale Diffusion der Elektronen bleiben vom Magnetfeld unbeeinflusst. Die transversale Diffusion wird hingegen gemäß

$$D_T(\omega) = \sqrt{\frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2}} D_T(0) \quad (2.8)$$

unterdrückt [78], wobei $D_T(0)$ der transversale Diffusionskoeffizient ohne Magnetfeld ist. Mit einem parallelen Magnetfeld lässt sich demzufolge die räumliche Auflösung auf der Ausleseebene verbessern.

Nicht zu vermeidende Inhomogenitäten im elektrischen und magnetischen Feld sorgen jedoch dafür, dass die beiden Felder nicht vollständig parallel sind. Dies führt zu systematischen Abweichungen bei der Drift der Elektronen und somit zu einer verzerrten Projektion auf die Ausleseebene, zusätzlicher Diffusion in allen Raumrichtungen und einer geringeren effektiven Driftgeschwindigkeit. Die radiale Abweichung durch eine kleine, transversale Komponente B_r des Magnetfeldes kann für eine Driftstrecke l über

$$\delta_r = l \frac{B_r}{B_z} \frac{\omega \tau}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \quad (2.9)$$

berechnet werden [78].

2.3.3 Ladungsverstärkung

Um die erzeugten Primärelektronen auf der Ausleseebene nachweisen zu können, müssen sie um einen Faktor 10^3 bis 10^4 vervielfacht werden. Hierzu wird zusätzlich zum Driftfeld vor der Ausleseebene ein weiteres elektrisches Feld in der Größenordnung 10^3 - 10^4 V/cm angelegt. Die Elektronen erhalten somit zwischen zwei Stößen mit den Gasatomen genügend Energie, um weitere Elektronen auszulösen. Die bei dieser Gasverstärkung durch N vorhandene Elektronen erzeugte Anzahl neuer Elektron-Ion-Paare dN lässt sich mit Hilfe des ersten Townsend-Koeffizienten α in Abhängigkeit der Wegstrecke s beschreiben [78]:

$$dN = \alpha(s)N(s)ds \quad . \quad (2.10)$$

Der Townsend-Koeffizient wird durch Anregungs- und Ionisationsquerschnitte bestimmt und hängt von der Zusammensetzung, der Temperatur und dem Druck des verwendeten Driftgases sowie der lokalen elektrischen Feldstärke ab. Die Steigerung der Elektronenanzahl von N_0 auf N_1 nach einem zurückgelegten Weg s ergibt sich aus dem Verstärkungsfaktor G , auch als Gain oder Gainfaktor bezeichnet:

$$N_1 = N_0 \cdot G = N_0 \cdot \exp\left(\int_s \alpha(s)ds\right) \quad . \quad (2.11)$$

Mit einem Triple-GEM-Stack lassen sich Verstärkungen von 10^4 bis 10^5 erreichen und gleichzeitig die Ionenrückdrift deutlich reduzieren. Diese kommt zustande, da neben den Elektronen beim Verstärkungsprozess in gleichem Maße Ionen produziert werden. Die Ionen bewegen sich aufgrund ihrer Ladung in Richtung Driftvolumen und tragen dort zu einer unerwünschten Raumladung, einer Verzerrung der elektrischen Felder und somit einer Verschlechterung der Energie- und Ortsauflösung bei. Die Ionenrückdrift F wird über das Verhältnis der Anzahl der im Detektorvolumen freigesetzten Ionen N_I zur Anzahl der bei der Verstärkung erzeugten Elektronen N_e definiert

$$F = \frac{N_I}{N_e} \quad (2.12)$$

und kann für einzelne GEM-Folien $5 \cdot 10^{-2}$ [79] und für einen Triple-GEM-Stack unter idealen Bedingungen $(2,36 \pm 0,20) \cdot 10^{-3}$ [80] erreichen.

Ein Einfluss auf die Driftgeschwindigkeit und die Auflösung der z -Koordinate ist auch hier über die resultierende Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Driftzeit der Elektronen gegeben.

2.4 Test-TPC und TestBench

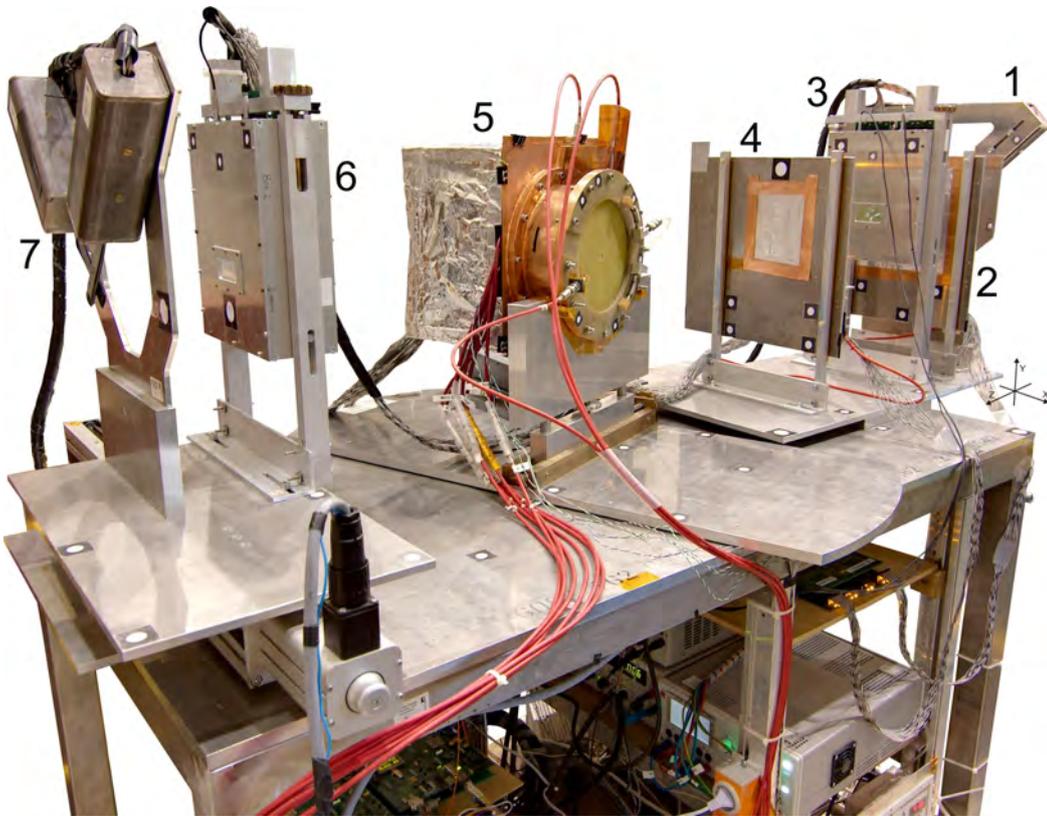


Abbildung 2.7: Foto der TestBench mit vier paarweise angeordneten Szintillationsdetektoren (1+7), zwei planaren GEM-Detektoren (2+4), zwei Siliziumstreifendetektoren (3+6) und der Test-TPC (5).

Der Einsatz von GEM-Folien in einer Zeitprojektionskammer ist ein neues Konzept, so dass vor dem Bau einer für das CBELSA/TAPS-Experiment passenden Zeitprojektionskammer systematische Studien an einem Prototypen nötig waren [81]. Um mit dieser Test-TPC nicht nur Tests mit radioaktiven Quellen und kosmischer Strahlung sondern auch Leistungs- und Ratentests an einem Strahlplatz durchführen zu können, wurde ein Strahl-Tracking-Teleskop mit mehreren Detektoren zur externen Spurdefinition aufgebaut [56].

Diese TestBench besteht aus einem Stahltisch, auf dem eine drehbare Platte für die Halterung der Test-TPC und Befestigungspunkte für weitere Detektoren angebracht sind. Abbildung 2.7 zeigt ein Foto der TestBench mit vier paarweise angeordneten Szintillationsdetektoren (1+7), zwei planaren GEM-Detektoren (2+4), zwei Siliziumstreifendetektoren (3+6) und der Test-TPC (5).

a) Szintillationsdetektoren

Die Szintillationsdetektoren an Position 1 und 7 dienen einerseits dazu, ein Triggersignal für die Auslese aller Detektoren zu generieren und andererseits zur Definition einer

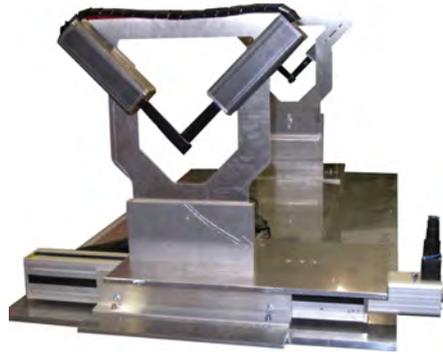


Abbildung 2.8: Szintillationsdetektoren auf der TestBench. Ein Paar (vorne) lässt sich mit Hilfe des Schrittmotors in x -Richtung fahren.

Strahlachse. Die aktive Fläche jedes Detektors besteht aus 3 mm dickem, organischem Szintillationsmaterial (EJ-260) mit einer Querschnittsfläche von $20\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, welches mit aluminisierter Mylar-Folie umwickelt und lichtdicht verklebt ist, um die Lichtausbeute zu verbessern. Die Auslese erfolgt über Photomultiplier (PHOTONIS XP2972), die ein schnelles Zeitsignal liefern. Jeweils zwei Szintillationsdetektoren sind durch eine Haltestruktur V-förmig angeordnet, so dass sie sich überlappen (siehe Abbildung 2.8). Um die Detektoren an die Strahlposition anpassen zu können und somit eine möglichst hohe Zählrate zu erreichen, sind beide Paare in der Höhe um $\pm 20\text{ mm}$ verstellbar und das Paar am Ende der TestBench mit Hilfe eines Schrittmotors in x -Richtung fahrbar. Eine programmierbare Triggerlogik auf FPGA-Basis erlaubt die Einstellung verschiedener Koinzidenzbedingungen zwischen den vier Szintillationsdetektoren.

b) Siliziumstreifendetektoren

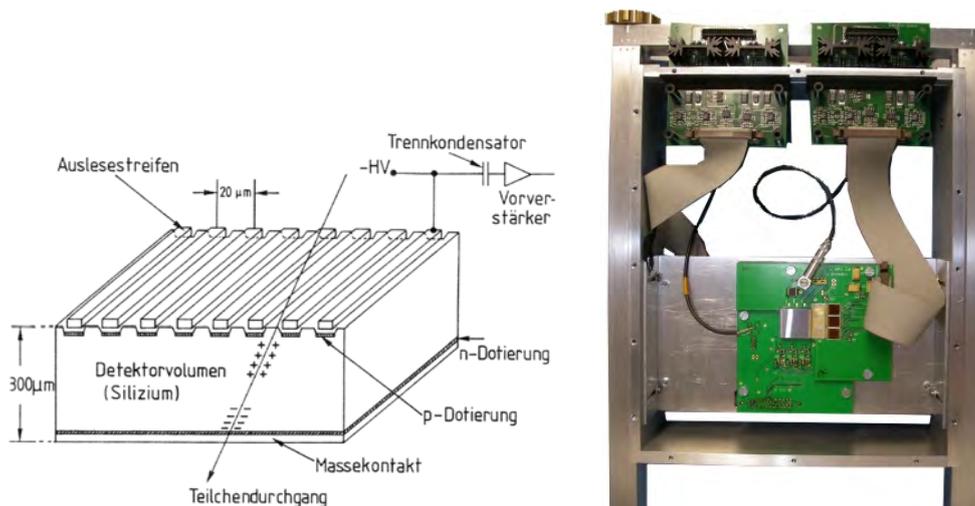


Abbildung 2.9: Schematischer Aufbau eines Siliziumstreifendetektors (links, [82]) und Foto eines der verwendeten Detektoren (graues Quadrat in der Mitte) mit angeschlossener Ausleseelektronik (rechts).

Für eine gute externe Ortsauflösung werden Siliziumstreifendetektoren verwendet. Diese bestehen aus in Sperrrichtung betriebenen p-n-Halbleiterdioden. Beim Durchgang durch die sich zwischen den beiden Schichten ausbildende Verarmungszone erzeugen geladene Teilchen Elektron-Loch-Paare, die als Stromfluss messbar sind. Auf ein n-dotiertes Substrat lassen sich mit Hilfe von Photolithographie p-dotierte Streifen implantieren, wobei jeder Streifen einem p-n-Übergang entspricht (siehe Abbildung 2.9 links). Bei einer hintereinander und um 90° gegeneinander verdrehten Anordnung von zwei dieser Streifendetektoren lässt sich die Position des Durchgangs geladener Teilchen anhand der getroffenen Streifen rekonstruieren.

Die für die TestBench verwendeten Siliziumstreifendetektoren besitzen 384 Streifen pro Sensor und haben eine Dicke von $300\ \mu\text{m}$. Mit einem Streifenabstand von $50\ \mu\text{m}$ bilden zwei dieser Sensoren eine für die Positionsmessung aktive Fläche von $19,2\ \text{mm} \times 19,2\ \text{mm}$ (siehe Abbildung 2.9 rechts). Die Auslese eines Sensors erfolgt über drei APV25-S1 ASICs²⁴ mit jeweils 128 Kanälen, welche die Signale der einzeln verbundenen Streifen verstärken, formen und an einen ADC weiterleiten. Das Aluminiumgehäuse, in dem die Sensoren und die Ausleseelektronik vor mechanischen oder elektromagnetischen Störungen geschützt sind, lässt sich um $\pm 35\ \text{mm}$ in x -Richtung und $\pm 25\ \text{mm}$ in der Höhe (y -Richtung) an die Strahlposition anpassen.

c) Planare GEM-Detektoren

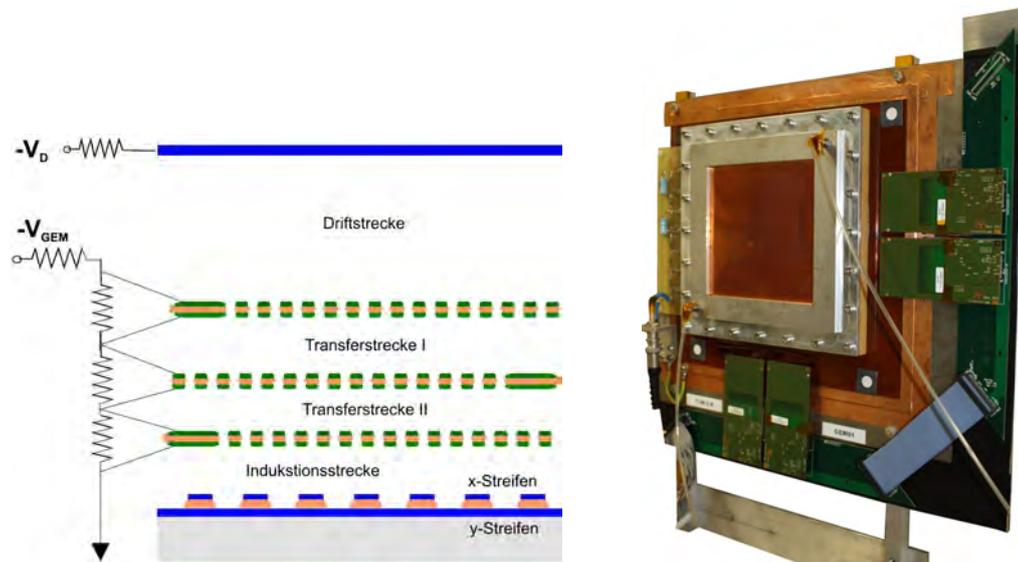


Abbildung 2.10: Schematische Zeichnung (links, [83]) und Foto (rechts) eines planaren GEM-Detektors. Die aktive Fläche befindet sich auf dem Foto in der Mitte unter der Kupferfolie.

Als weitere ortsauffösende Detektoren kommen zwei planare GEM-Detektoren mit einer aktiven Fläche von $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$ und einem Triple-GEM-Stack als Verstärkerstufe zum Einsatz, wie sie in Abbildung 2.10 dargestellt sind. Die verstärkten Elektronen generieren ein Signal auf zwei, um 90° gegeneinander verdrehten Streifenlagen, welche auf

²⁴ASIC - **A**pplication-**S**pecific **I**ntegrated **C**ircuit (engl.) - anwendungsspezifische, integrierte Schaltung

einer gemeinsamen PCB²⁵ angebracht sind. Die 265 Streifen pro Lage haben einen Abstand von 400 μm und werden ebenfalls mit APV25-S1 ausgelesen. Als Driftgas wird eine Mischung aus 70 % Argon und 30 % Kohlenstoffdioxid (ArCO_2 (70:30)) verwendet.

d) Test-TPC

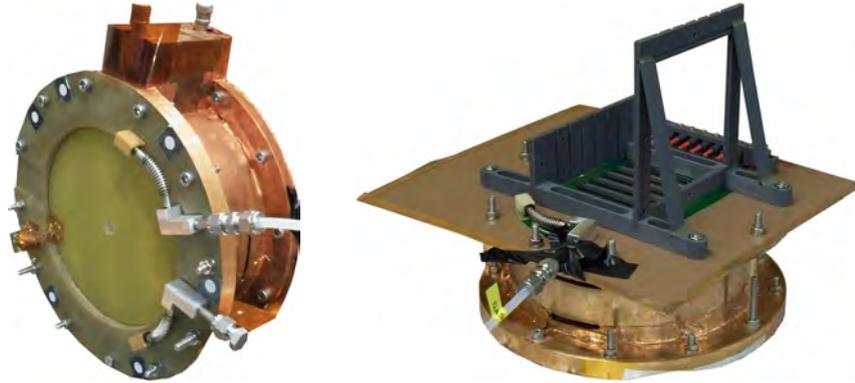


Abbildung 2.11: Vorder- und Rückansicht der Test-TPC.

Die Test-TPC wurde wie die GEM-Detektoren an der TU München gebaut und hat einen Durchmesser von 200 mm, eine aktive Fläche von 100 mm \times 100 mm und eine Driftlänge von 76,9 mm (siehe Abbildung 2.11). Details zum Aufbau finden sich in [79, 81]. Das in einem Triple-GEM-Stack verstärkte Signal wird mit 1500 hexagonalen Pads auf der Ausleseebene detektiert. Um das Ansprechverhalten verschiedener Pad-Größen und deren Auflösungsvermögen zu testen, hat die Hälfte der Pads einen Außenradius von $r_a = 1,25$ mm, während die restlichen Pads mit $r_a = 1,5$ mm etwas größer sind (siehe Abbildung 2.12). Die Auslese der Pads erfolgt mit dem für das T2K-Experiment entwickelten AFTER²⁶-ASIC. Die 511 kapazitiven Speicherzellen pro Kanal werden als abtastender Analog-Ring-Speicher mit einer einstellbaren Abtastrate von bis zu 50 MHz eingesetzt, deren gebündelter Datenstrom von einem dafür entwickelten ADC-Modul digitalisiert wird.

Um ein homogenes elektrisches Feld im Driftvolumen zu erzeugen, befinden sich vor dem GEM-Stack eine als *Skirt* bezeichnete Kupferplatte mit einer 100 mm \times 100 mm großen Aussparung sowie zylindrische, 3 mm breite Kupferstreifen auf beiden Seiten einer 125 μm dicken, isolierenden Polyimidfolie, die den Feldkäfig bildet. Die Kathode besteht aus einer 0,3 mm dicken Kupferplatte auf einer Trägerstruktur aus Glasfaser. Für die Test-TPC sind ArCO_2 (70:30), ArCO_2 (90:10) und NeCO_2 (90:10) als Driftgase vorgesehen, die über das in Kapitel 4.2.4 beschriebene Gassystem bereitgestellt werden.

e) Messungen mit der TestBench

Konzipiert war die TestBench ursprünglich für den Einsatz hinter dem Tagging-Magneten des CBELSA/TAPS-Experiments, wo Messungen mit Elektronen in einem Energie-

²⁵PCB - Printed Circuit Board (engl.) - gedruckte Schaltung, Platine, Leiterkarte

²⁶AFTER - ASIC For TPC Electronic Readout

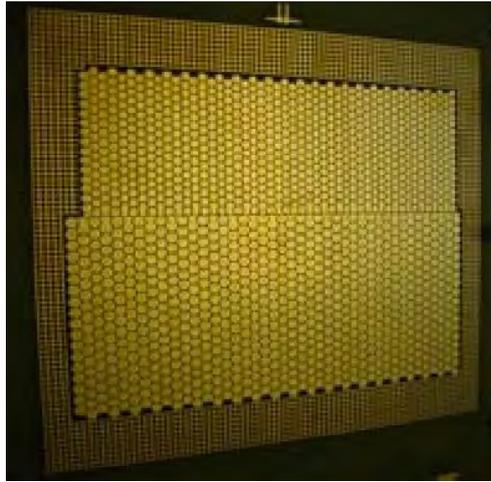


Abbildung 2.12: Ausleseebene der Test-TPC. Die kleineren Pads (oben) haben einen Außenradius von 1,25 mm, der Außenradius der größeren Pads (unten) liegt bei 1,5 mm.

bereich um 400 MeV durchgeführt werden können [84]. Da bei diesen geringen Elektronenergien die Auflösung stark von Vielfachstreuung verfälscht wird, wurde die TestBench im Mai 2010 ans COMPASS-Experiment [85, 86] am CERN gebracht. Dort konnten Auflösungsstudien mit einem hochenergetischen Myonstrahl von 160 GeV durchgeführt werden. Abbildung 2.13 zeigt beispielhaft die Projektion auf die Ausleseebene und die dreidimensionale Rekonstruktion eines solchen Myonstrahl-Ereignisses in der Test-TPC. Detailliertere Ergebnisse der Testmessungen sind unter anderem in [84] und [87] zu finden. Seit September 2012 steht die TestBench wieder in Bonn in einem Laborraum, wo unter kontrollierten und konstanten äußeren Bedingungen mit Teilchen der kosmischen Strahlung gemessen werden kann.

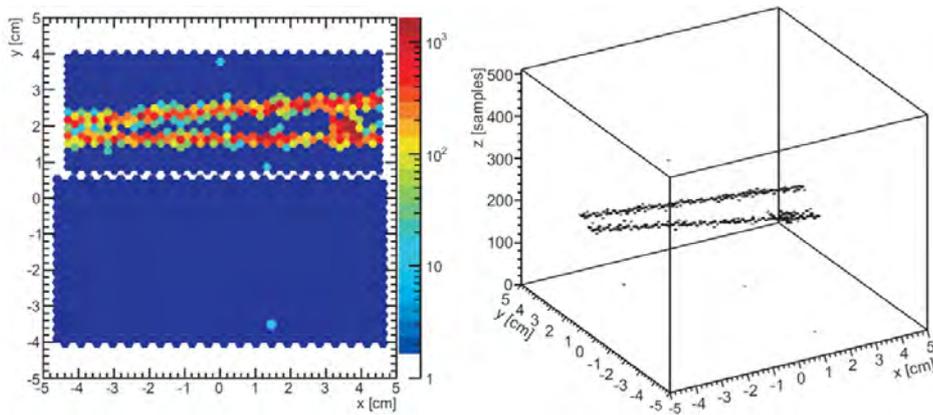


Abbildung 2.13: Projektion auf die Ausleseebene (links) und dreidimensionale Rekonstruktion (rechts) eines Ereignisses in der Test-TPC, hervorgerufen durch einen 160 GeV-Myonstrahl am COMPASS-Experiment.

2.5 GEM-TPC-Prototyp für das FOPI- und das CBELSA/TAPS-Experiment

Parallel zu den Untersuchungen mit der Test-TPC wurde vom Detektorlabor der GSI ein GEM-TPC-Prototyp gebaut, der mit einem inneren Durchmesser von 104 mm, einem Außendurchmesser von 308 mm und einer Driftlänge von 727,8 mm den geometrischen Anforderungen des CBELSA/TAPS-Experiments entspricht. Er ist modular konstruiert und besteht im Wesentlichen aus einem Feldkäfig, einem Media- und einem GEM/Auslese-Flansch. Eine Auflistung der Parameter der GEM-TPC findet sich in Tabelle 2.1.

a) Feldkäfig

Der Feldkäfig wird von zwei Zylindern und einer Kathodenendkappe gebildet, die aus einer selbsttragenden Sandwichstruktur aus mehreren Lagen Kaptonfolie und Rohacell bestehen. Wie auch bei der Test-TPC sorgen zylindrische Kupferringe mit einem Abstand von 1,5 mm auf beiden Seiten einer Kaptonfolie, welche sowohl am äußeren als auch am inneren Zylinder des Feldkäfigs angebracht sind, für ein homogenes elektrisches Feld innerhalb des Driftvolumens (Abbildung 2.14). Das Potential der Feldstreifen von der Kathode zum letzten dieser 792 Ringe vor den GEMs wird durch eine SMD²⁷-Widerstandskette bestimmt. Dieser sogenannte *Last Strip* wird wie bei der Test-TPC auf ein eigenes Potential gelegt, um Spannungsüberschläge zwischen dem Feldkäfig und den GEM-Folien zu vermeiden.

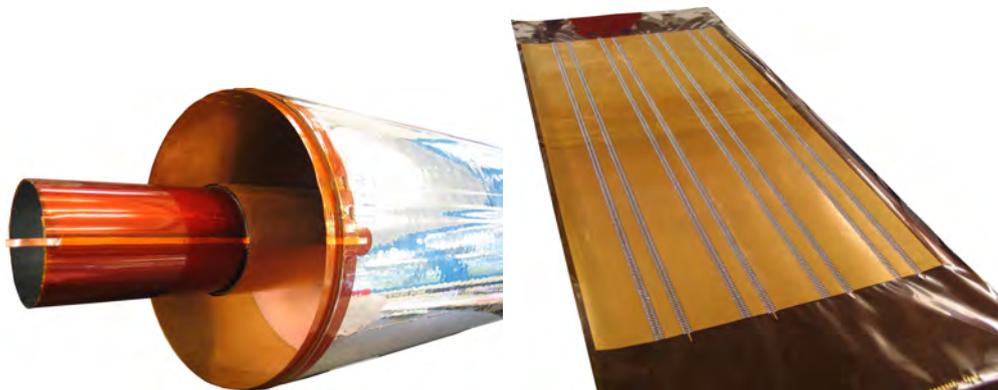


Abbildung 2.14: Fertiger Feldkäfig (links). Am inneren Zylinder sind die Kupferringe und auf der entrollten Folie für den Feldkäfig (rechts) zusätzlich die SMD-Widerstände zu erkennen, die das homogene elektrische Feld erzeugen.

b) GEM/Auslese-Flansch

Die drei GEM-Folien des zur Verstärkung eingesetzten Triple-GEM-Stacks sind im sogenannten GEM-Flansch montiert. Der GEM-Flansch bietet Platz für insgesamt vier

²⁷SMD - Surface-Mounted Device (engl.) - oberflächenmontiertes Bauelement)

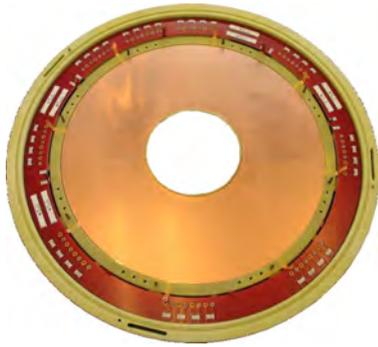


Abbildung 2.15: GEM-Flansch mit eingebauter GEM-Folie. Eine Seite jeder Folie ist irisförmig in acht Segmente unterteilt.

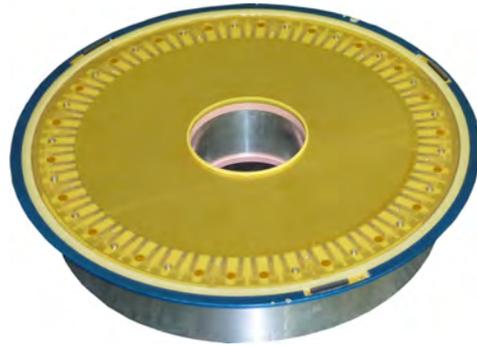


Abbildung 2.16: Ausleseebene des Prototypen. Die hexagonalen Pads haben einen Außenradius von 1,5 mm.

GEM-Folien, ermöglicht das Auswechseln defekter Folien und sorgt für einen wohldefinierten Abstand zwischen den einzelnen GEMs. Die verwendeten Folien haben eine Dicke von $50\ \mu\text{m}$ und einen Lochabstand von $140\ \mu\text{m}$. Sie sind auf einer Seite in acht Segmente unterteilt, wie in Abbildung 2.15 zu erkennen ist.

Hinter den GEM-Folien befindet sich die Ausleseebene mit 10254 hexagonalen Pads mit einem Außenradius von 1,5 mm (Abbildung 2.16), die mit T2K/AFTER-Chips ausgelesen werden. Jeweils vier dieser Chips sind dabei auf einer von 42 Front-End-Karten untergebracht. Zur Digitalisierung der Daten ist ein Triggersignal notwendig, dass vom TPC Trigger Control System (TCS) bereitgestellt wird. Das TCS ist ein optisches System, welches vom COMPASS-Experiment übernommen wurde und sowohl Triggerinformationen als auch ein gemeinsames Taktsignal an die Ausleseelektronik weitergibt. Um zu verhindern, dass die Abwärme der Elektronik die Ausleseebene und das Driftgas erwärmt und so einen Einfluss auf die Messungen hat, sind die Front-End-Karten an ein Kühlsystem angeschlossen. Zur Überwachung der Temperatur sind zwölf Pt100-Temperatursensoren auf der Ausleseebene sowie 210 Dallas-1Wire-Sensoren auf dem Feldkäfig angebracht.

c) Media-Flansch

Auf dem Media-Flansch sind alle für den Betrieb der TPC notwendigen Anschlüsse für Hochspannung und Gas sowie für weitere Sensoren untergebracht. Neben dem Einbeziehungsweise Auslass für das Driftgas befinden sich hier jeweils ein Druck- und ein Flusssensor, deren Signale ebenso abgegriffen werden können wie die Werte der Temperatursensoren (Abbildung 2.17).

2.6 Inbetriebnahme der GEM-TPC im FOPI-Experiment

Um den fertigen Prototypen, wie er in Abbildung 2.18 gezeigt ist, in Betrieb zu nehmen und an einem Strahl mit hohen Teilchenraten testen zu können, wurde die GEM-TPC

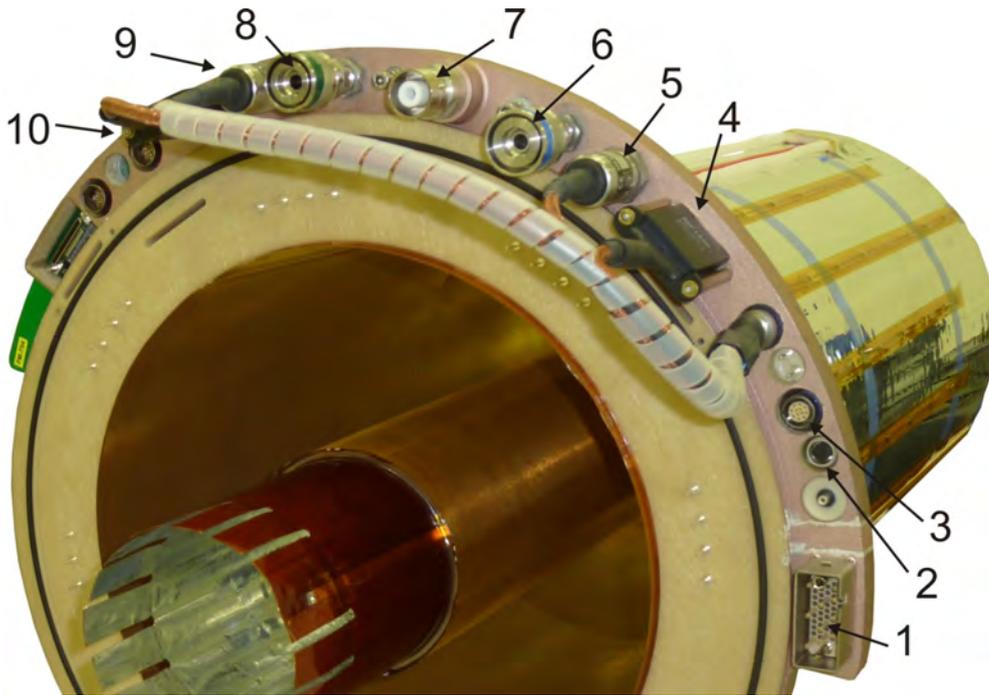


Abbildung 2.17: Media-Flansch mit Gasauslass (6) und -einlass (8), Druck- und Flussensoren (5 und 9 beziehungsweise 4 und 10), Hochspannungsanschluss für den Feldkäfig (7) und die GEM-Folien (1) und Abgriffe für die Signale der Temperatursensoren am Feldkäfig (2) und der Gassensoren (3).

im Inneren der Central Drift Chamber (CDC) des FOPI-Spektrometers an der GSI installiert.

FOPI ist ein Schwerionen-Experiment mit fest installiertem Target und einer nahezu vollständigen 4π -Winkelakzeptanz, welches seit seiner Inbetriebnahme 1990 zahlreichen Fragestellungen der Hadronenphysik nachgeht [88]. Hierzu zählen unter anderem die Untersuchung der Eigenschaften von Schwerionen-Reaktionen bei hohen Dichten und Drücken, von Hyperonen-Zerfällen, Proton-Proton-Reaktionen oder In-Medium-Effekten durch Pion-induzierte Reaktionen [89].

Das FOPI-Spektrometer, dargestellt in Abbildung 2.19, besteht aus der CDC, die fassförmig von einem RPC-Flugzeit-Detektor²⁸ und Szintillationsdetektoren (Barrel) umgeben ist. In Vorwärtsrichtung befindet sich eine weitere Driftkammer (Helitron) und eine Szintillator-Flugzeitwand (PLAWA). Der gesamte Aufbau ist in einen supraleitenden Magneten mit 0,6 T integriert.

Mit der GEM-TPC als zusätzlichem Spurdetektor im FOPI-Spektrometer ist es möglich, die bisher erreichte Auflösung von einigen Millimetern in x - y -Richtung beziehungsweise 5 cm in z -Richtung entlang der Strahlachse deutlich auf wenige $100\ \mu\text{m}$ zu verbessern, während für die Tests der GEM-TPC die FOPI-Detektoren als externe Referenz und Trigger genutzt werden können. Um die Daten aller Detektoren zusammenzuführen und mit einem gemeinsamen Zeitstempel zu versehen, wurde die Datenauslese der GEM-TPC in das Multi Branch System (MBS) des FOPI-Experiments eingegliedert [58].

²⁸RPC - Resistive Plate Chamber (engl.) - Widerstandsplattenkammer

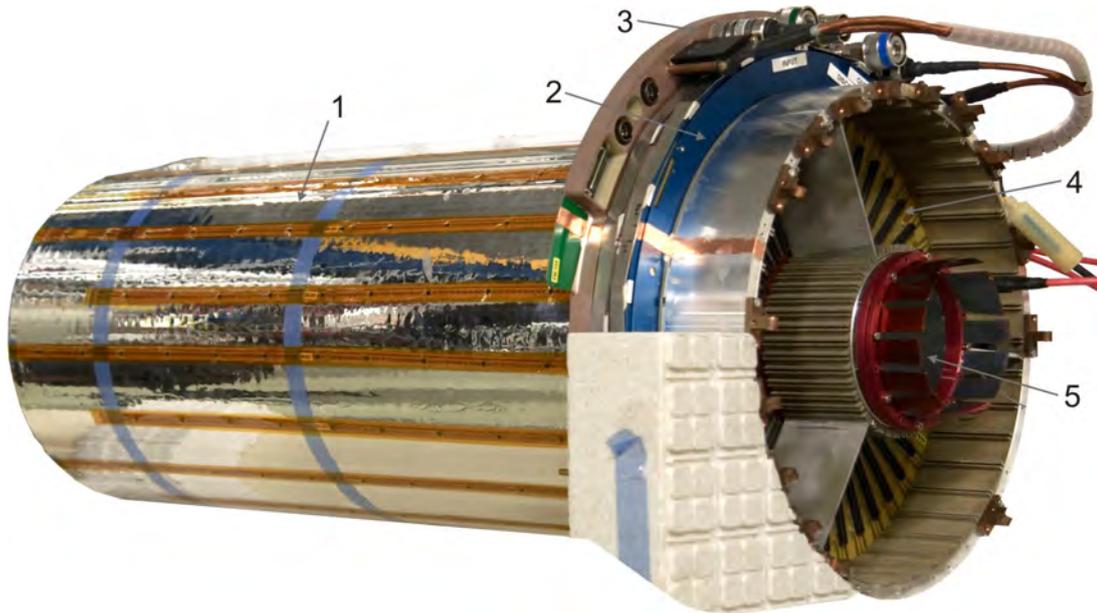


Abbildung 2.18: Zusammengebaute GEM-TPC mit äußerem (1) und innerem (5) Feldkäfig, GEM/Auslese- (2) und Media-Flansch (3). Auf der Rückseite der Ausleseebene sind die Steckplätze (4) für die Front-End-Karten zu erkennen.

Seit dem Einbau der GEM-TPC Ende 2010 konnten in mehreren Strahlzeiten (^{84}Kr -, ^{197}Au -, ^2D -, ^{22}Ne - oder π -Strahl) mit unterschiedlichen Targets (Kupfer-, Kohlenstoff-, Blei- oder Aluminiumtargets) sowie mit kosmischer Strahlung Daten genommen und dabei verschiedene Gasmischungen (ArCO_2 (90:10), NeCO_2 (90:10)), Driftfelder (unter anderem 234 V/cm, 302,4 V/cm, 309,6 V/cm, 324 V/cm, 352,8 V/cm und 360 V/cm) und GEM-Verstärkungen (zwischen 630 und 5100) getestet werden [70].

Abbildung 2.20 zeigt ein typisches Ereignis in der GEM-TPC, welches durch die Reaktion eines ^{22}Ne -Strahls an einem Aluminiumtarget hervorgerufen wurde. Eine Auswertung der gesammelten Daten hinsichtlich der Driftgeschwindigkeit findet sich in Kapitel 7. In Kapitel 7.4 sind zudem Beispiele für weiterführende Analysen der Daten im Rahmen der GEM-TPC und der FOPI-Kollaboration aufgeführt.

Geometrie		GEM-Folien	
Driftlänge	727,8 mm	Anzahl	3
Außendurchmesser	308,0 mm	Dicke	50 μm
Innendurchmesser	104,0 mm	Lochabstand	140 μm
		Folienabstand	2 mm
Ausleseebene		Driftgase	
Anzahl Pads	10 254	ArCO_2 (90:10)	
Pad-Außenradius	1,5 mm	NeCO_2 (90:10)	
Form der Pads	hexagonal		

Tabelle 2.1: Parameter und vorgesehene Gase der GEM-TPC.

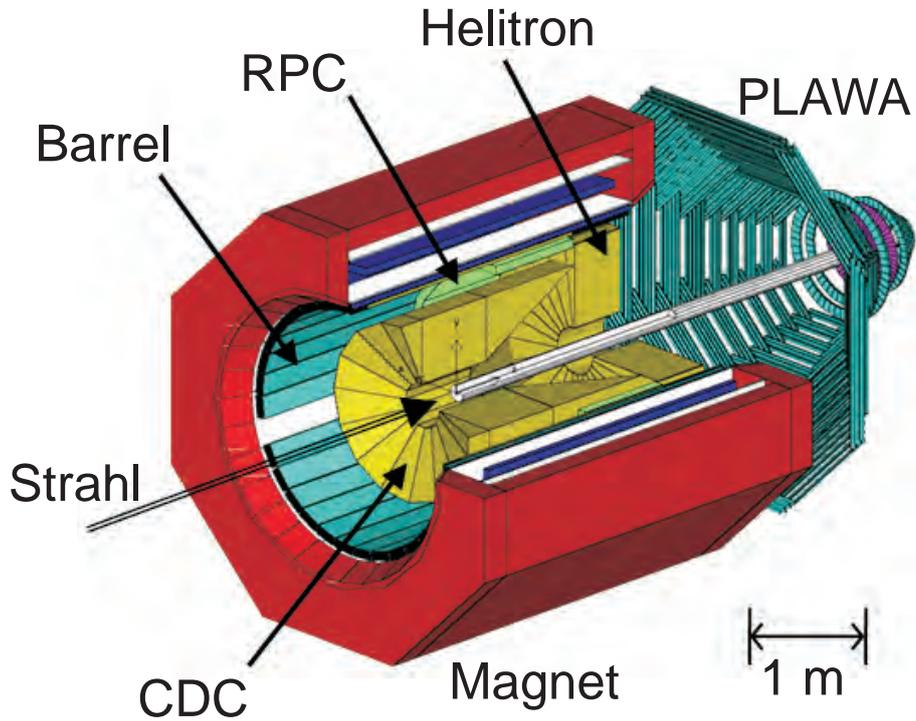


Abbildung 2.19: FOPI-Experiment mit Central Drift Chamber (CDC), Vorwärtsdriftkammer (Helitron), Szintillationsdetektoren (Barrel), RPC-Flugzeit-Detektor und Szintillator-Flugzeitwand (PLAWA). Die GEM-TPC befindet sich im Inneren der CDC [90].

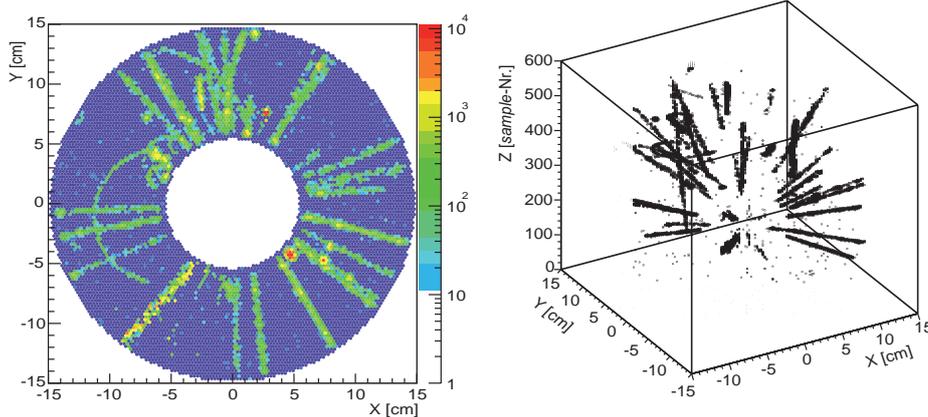


Abbildung 2.20: Projektion auf die Ausleseebene (links) und dreidimensionale Rekonstruktion (rechts) eines typischen Ereignisses in der GEM-TPC, hervorgerufen durch einen ^{22}Ne -Strahl an einem Aluminiumtarget.

2.7 Kalibration

Um die Orts- und Energieauflösung des Detektors zu verbessern, ist es notwendig, die Driftgeschwindigkeit und die effektive Verstärkung zu kalibrieren. Viele der negativen Einflüsse auf die Driftgeschwindigkeit, wie Schwankungen in der Zusammensetzung des Driftgases, Temperaturschwankungen, elektrische Feldverzerrungen oder Ionenrückfluss-Effekte, lassen sich durch Kontrolle dieser Parameter und Vergleichsmessungen mit kosmischer Strahlung oder durch ein Laserkalibrationssystem korrigieren.

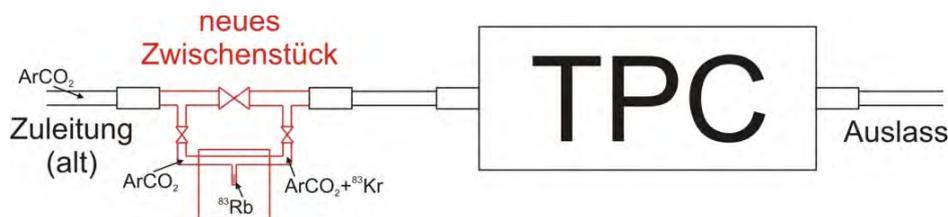


Abbildung 2.21: Integration der ^{83}Rb -Quelle in das Gassystem der GEM-TPC. Das innere Stahlröhrchen mit der radioaktiven Quelle ist über einen Bypass an das Gassystem der GEM-TPC angeschlossen, so dass über drei Gashähne zwischen normalem Betrieb und Gasfluss durch den Aufbewahrungsbehälter gewählt werden kann.

Für eine optimale Energieauflösung muss zusätzlich jeder Auslesekanal unabhängig von den anderen auf Schwankungen in der Ladungssensitivität oder der Verstärkung korrigiert werden. Hierzu wurde eine ^{83}Rb -Quelle in das Gassystem der Test-TPC und das der GEM-TPC integriert (siehe Abbildung 2.21). Das über Elektroneneinfang entstehende, gasförmige $^{83\text{m}}\text{Kr}$ mit einer Halbwertszeit von 1,83 Stunden bietet eine Vielzahl an Konversionselektronen und -photonen in einem Energiebereich von 9,4- 41,6 keV für die Kalibration und eine fast vollständige Abdeckung des Detektorvolumens und des Auslesebereiches.

Aus den aufgezeichneten Kalibrationsdaten wurde über die sogenannte „Leader-Pad-Methode“, wie sie für die Kalibration der HARP-TPC entwickelt wurde [92], ein Ausgleichsfaktor für die Verstärkung jedes einzelnen Pads bestimmt. Abbildung 2.22 zeigt eine Übersicht über die Ausgleichsfaktoren für die Verstärkung aller Pads auf der Ausleseebene der GEM-TPC. Die Sektorgrenzen der GEM-Folien sind klar zu erkennen, da hier durch die geringere Verstärkung ein höherer Ausgleichsfaktor notwendig ist. Mit Hilfe der Ausgleichsfaktoren konnte die effektive Verstärkung der GEMs bei verschiedenen Spannungseinstellungen für beide TPCs bestimmt werden sowie die Energieauflösung der GEM-TPC für beispielsweise den 41,6 keV-Peak aus dem $^{83\text{m}}\text{Kr}$ -Spektrum von 5,7 % auf 3,8 % verbessert werden (siehe Abbildung 2.23). Weitere Informationen und Ergebnisse finden sich in [91].

2.8 Der Prototyp im CBELSA/TAPS-Experiment

Für den Einsatz im CBELSA/TAPS-Experiment wird seit Anfang 2013 eine zweite Version des Prototypen gebaut. Diese hat die gleichen Dimensionen wie der erste Prototyp.

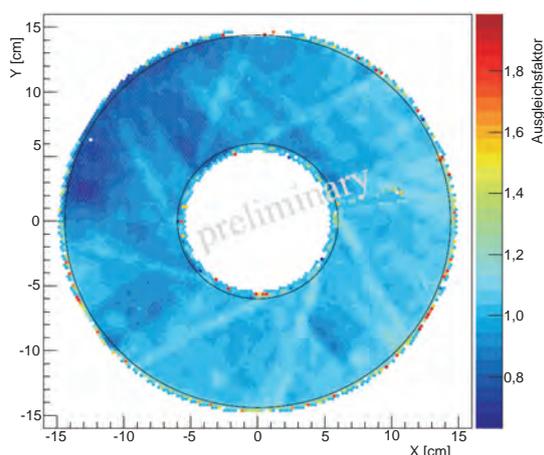


Abbildung 2.22: Übersicht über die Ausgleichsfaktoren für die Verstärkung aller Pads auf der Ausleseebene der GEM-TPC [91].

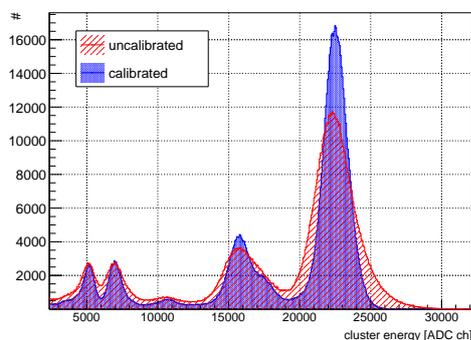


Abbildung 2.23: Aufsummierte Energie der Cluster aller 10254 Pads ohne (rot) und mit (blau) Verwendung der Ausgleichsfaktoren [91].

Es muss jedoch eine neue, kontinuierlich arbeitende Ausleseelektronik entwickelt werden, um die TPC freilaufend ohne einen externen Trigger oder selbst als Detektor in der ersten Triggerstufe verwenden zu können. Zudem muss die Auslese der GEM-TPC in die bestehende DAQ²⁹ des CBELSA/TAPS-Experiments eingebunden werden. Weiterhin muss eine Haltestruktur konstruiert werden, mit der die TPC mit allen Anschlüssen und der Ausleseelektronik anstelle des Innendetektors in den Crystal-Barrel-Detektor integriert werden kann (siehe Abbildung 2.24).

Um mit den notwendigen Tests des neuen Prototypen und der neuen Elektronik nicht die laufende Datennahme des CBELSA/TAPS-Experiments zu behindern, wurde für den Prototypen zusätzlich eine Halterung für die TestBench entworfen.

2.9 Der Magnet für das CBELSA/TAPS-Experiment

Für die Bestimmung von Transversalimpuls p_t , Energieverlust und Art der gemessenen Teilchen muss die TPC in einem homogenen Magnetfeld betrieben werden. Hierzu soll das bereits früher mit dem Crystal-Barrel-Detektor verwendete Eisenrückführjoch des ASTERIX-Experiments am CERN ([93], siehe Abbildung 2.25) genutzt und die alte Aluminiumspule wegen ihrer hohen Verlustleistung von 2,5 MW durch eine neue supraleitende Spule ersetzt werden. Das Rückführjoch besteht aus einem inneren und einem äußeren Joch und ist im Inneren mit zwei Schienen ausgestattet, auf denen der Crystal-Barrel-Detektor lagert und zu Wartungszwecken aus dem Rückführjoch gefahren werden kann.

Um zu untersuchen, wie ein Magnet mit einer Stärke von 2,0 T beziehungsweise 2,5 T konstruiert sein muss, um die geforderten Feldhomogenitäten von 1 % im Bereich der TPC und 0,1 % im Bereich des Targets bereitstellen zu können, wurde im Juni 2007

²⁹DAQ - Data Acquisition (engl.)- Datenerfassung

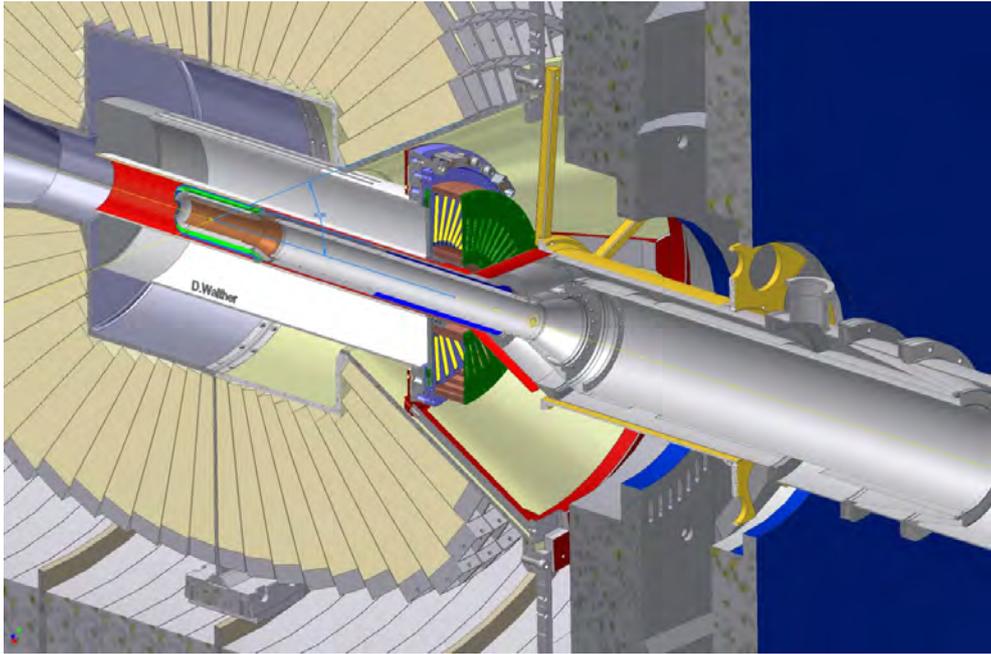


Abbildung 2.24: Technische Zeichnung der GEM-TPC im Inneren des Crystal-Barrel-Detektors [34].

eine Machbarkeitsstudie bei der Firma ACCEL (jetzt BRUKER EST) in Auftrag gegeben [94]. Durch die geforderte Feldhomogenität im Bereich des Targets wird es möglich sein, auch ohne die bisherigen Unterbrechungen der Datennahme zur Aufpolarisation einen hohen Polarisationsgrad zu erhalten. Abbildung 2.26 zeigt die vorgeschlagene Konfiguration mit drei Spulen und die magnetische Induktion $|B|$ auf der Oberfläche des Eisenrückführjochs bei einem Feld von $B_z = 2,5$ T. Als Kühlsystem ist ein Kryostat mit geschlossenem Helium-Kreislauf und Stickstoffvorkühlung vorgesehen, welcher oben auf dem Rückführjoch montiert wird.

In [94] wurde zudem untersucht, welche Modifikationen am Rückführjoch durchgeführt werden müssen, um neben der geforderten Homogenität im Inneren auch die Streufelder außerhalb des Rückführjochs zu minimieren und trotzdem ausreichend Platz für die Durchführung der Kühlung und allen Kabeln zu erhalten.

Zusätzlich zu der Machbarkeitsstudie der Firma ACCEL wurde im Rahmen dieser Arbeit untersucht, ob und wie sich die Streufelder außerhalb des Eisenjochs auf den gesamten Bereich des CBELSA/TAPS-Aufbaus auswirken. Hierzu wurde mit dem Programm „CST EM Studio“ [95] ein Magnet simuliert, welcher analog zum Vorschlag aus der Machbarkeitsstudie von zwei äußeren Spulen mit einem Innenradius von $r_i = 830$ mm, einem Außenradius von $r_a = 960,17$ mm und einer Breite von $b = 200$ mm sowie einer mittleren Spule mit $r_i = 830$ mm, $r_a = 875$ mm und $b = 120$ mm gebildet wird (siehe Abbildung 2.27). Die Geometrien und die Materialien des Strahlplatzes mit Betonboden, Elektronenstrahlführung, Ablenkmagneten und Strahlvernichter sowie des Crystal-Barrel-Detektors, des Targetkryostaten und des Rückführjochs konnten aus den technischen Zeichnungen des CBELSA/TAPS-Experiments übernommen werden und sind in Abbildung 2.28 dargestellt.

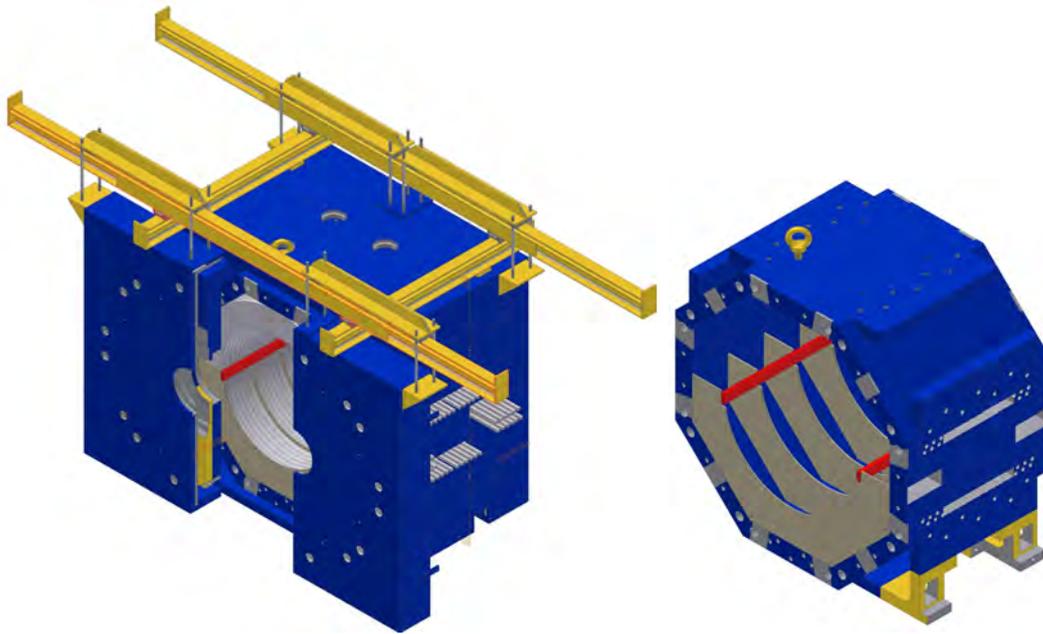


Abbildung 2.25: Crystal-Barrel-Rückführjoch des ASTERIX-Experiments mit der alten Aluminiumspule (links). Im inneren Teil (rechts) sind die Schienen als Halterung für den Crystal-Barrel-Detektor und die Löcher der Zuführung für die alten Spulen zu erkennen [34].

Die Simulationen wurden für verschiedene Modifikationen am Rückführjoch und unterschiedlich starke Magnetfelder zwischen 2 T und 7 T durchgeführt. Wie in Abbildung 2.29 beispielhaft für ein 3 T starkes Magnetfeld gezeigt ist, lassen sich schon mit wenigen Änderungen am Rückführjoch, insbesondere dem Schließen der Zuführung für die alten Aluminiumspulen, Streufelder außerhalb des Rückführjochs auf deutlich unter 1 % minimieren. Die umliegenden Detektoren und deren Elektronik werden somit nicht durch das Magnetfeld beeinflusst.

Da für die Installation des Rückführjochs am CBELSA/TAPS-Strahlplatz neue Fundamente und somit ein Umbau des Bodens und des kompletten Experiments notwendig sind, wird der Magnet nicht vor dem Ende der jetzigen Förderperiode und Datennahme im Jahr 2016 zum Einsatz kommen können. Die GEM-TPC wird somit am Anfang ohne Magnetfeld betrieben werden, so dass sich während dieser Zeit Transversalimpuls p_t und Art der gemessenen Teilchen alleine aus den Daten der GEM-TPC nicht bestimmen lassen. Eine Bestimmung des Energieverlustes und der Teilchenart ist jedoch in Verbindung mit den Daten des Crystal-Barrel-Detektors möglich, so dass zusammen mit der ebenfalls möglichen Messung geladener Endzustände und einer deutlichen Verbesserung der Orts- und Winkelauflösung gegenüber dem zur Zeit verwendeten Innendetektor auf $\approx 230 \mu\text{m}$ beziehungsweise $0,1^\circ$ eine Erweiterung des physikalischen Programms des CBELSA/TAPS-Experiments auch ohne Magnetfeld erreicht wird.

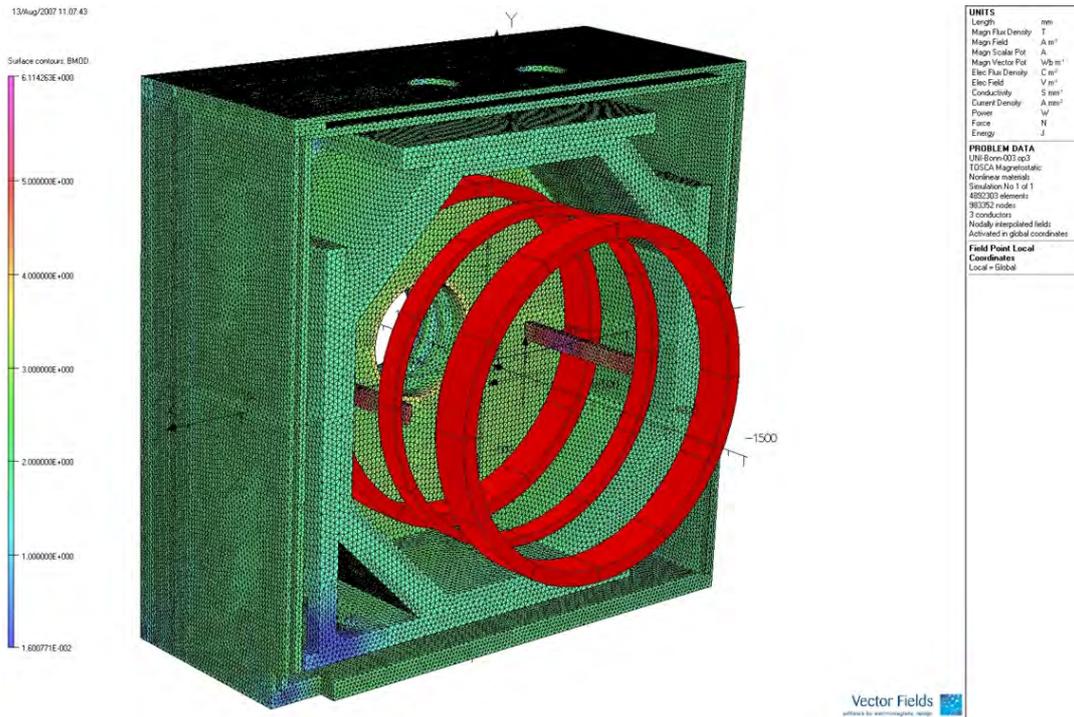


Abbildung 2.26: Vorgeschlagene Konfiguration des supraleitenden Magneten (rot) und magnetische Induktion $|B|$ auf der Oberfläche des alten Rückführjochs [94].

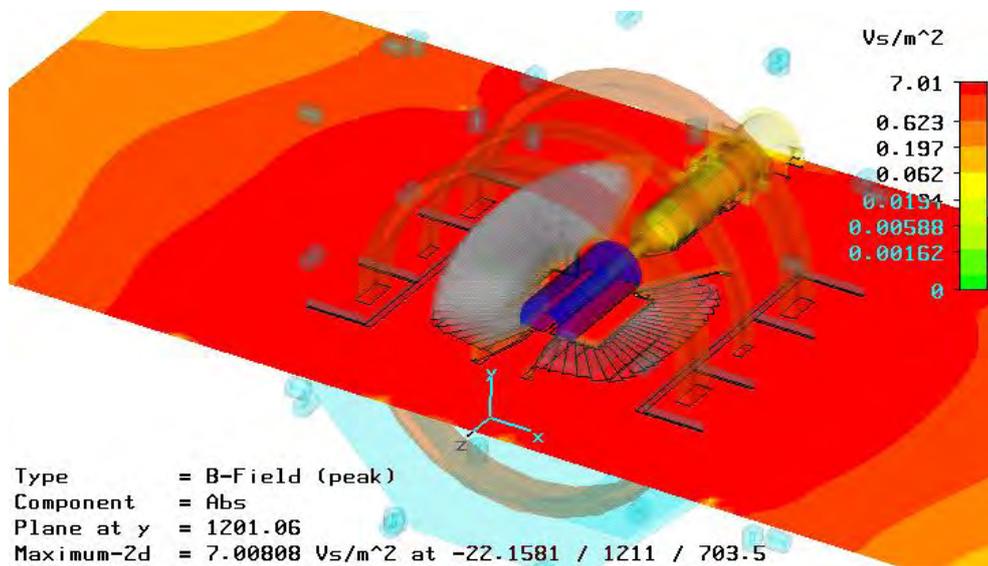


Abbildung 2.27: CST-Simulation eines 7 T starken Magnetfeldes im Bereich des Rückführjochs mit Crystal-Barrel-Detektor (grau), Targetkryostaten (gelb) und einem Dummyvolumen für die TPC (blau). Der Magnet wird von drei supraleitenden Spulen gebildet (orange Ringe).

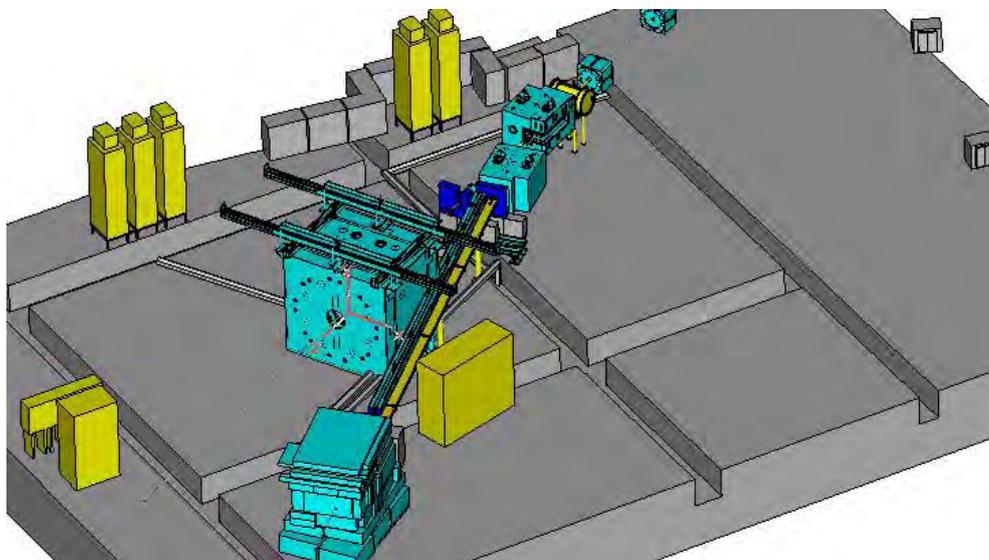


Abbildung 2.28: Darstellung des CBELSA/TAPS-Experiments mit dem Rückführjoch in der Simulationssoftware.

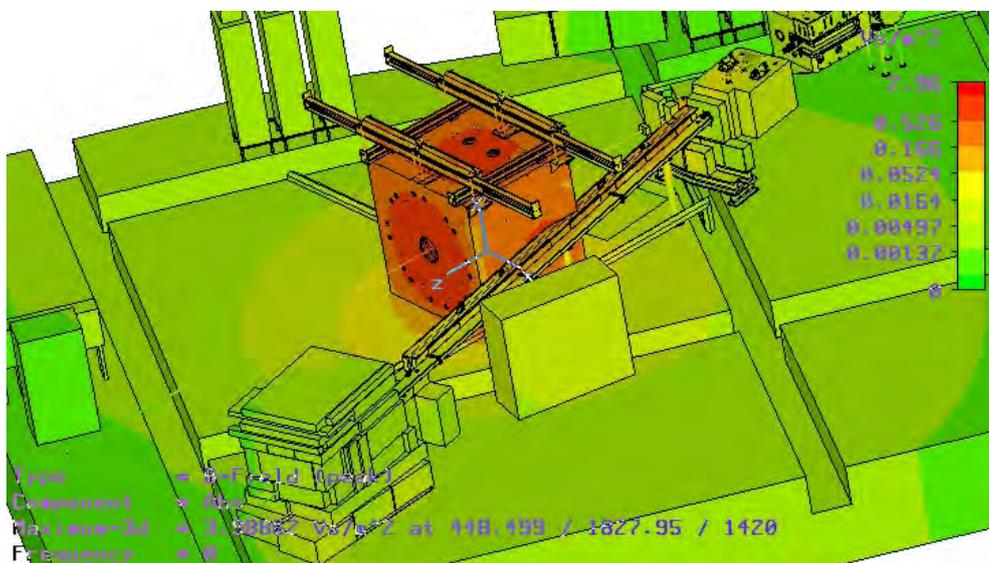


Abbildung 2.29: CST-Simulation eines 3 T starken Magnetfeldes im gesamten Bereich des CBELSA/TAPS-Experiments.

Nur ein Narr macht keine Experimente.

(Charles Darwin)

3 Simulationen zur Driftgeschwindigkeit

Wie im vorherigen Kapitel erläutert, ist die genaue Kenntnis der Driftgeschwindigkeit der Elektronen für die präzise Rekonstruktion der Daten der GEM- und der Test-TPC von großer Bedeutung. Bei bekannten äußeren Parametern wie Druck und Temperatur kann die Bewegung und Diffusion von Ladungsträgern mit dem Programm Magboltz [96] simuliert werden. Solche Simulationen wurden im Rahmen dieser Arbeit für die mit der GEM-TPC und der Test-TPC verwendeten Gasgemische sowie verschiedene Driftfelder und äußere Bedingungen durchgeführt und werden im Folgenden beschrieben. Ausführlichere Simulationen der Vorgänge in der GEM-TPC und der kompletten Auslekette sind in [57] oder [97] zu finden.

3.1 Simulationssoftware

Die Bewegung und Diffusion von Elektronen durch ein Gasgemisch unter dem Einfluss von elektrischen und magnetischen Feldern kann durch das Lösen der Boltzmannschen Transportgleichung bestimmt werden. Das Fortran-basierte Programm Magboltz 2 [96, 98, 99] führt diese Berechnungen für Gasgemische mit maximal sechs Komponenten mit Hilfe der Monte-Carlo-Integrations-Methode durch und liefert unter anderem simulierte Werte für die Driftgeschwindigkeit, den Townsend-Verstärkungsfaktor sowie für die longitudinale und transversale Diffusion. Dabei werden Genauigkeiten von unter 1 % für die Driftgeschwindigkeit beziehungsweise 2 % für alle weiteren Werte erreicht.

Die notwendigen Parameter für die Simulation werden über eine Textdatei geladen. Ein vollständiger Parametersatz für einen Programmdurchlauf besteht aus vier Zeilen:

```
      2      50      1      0.0
2  12  0  0  0  0
90.0000  10.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  20.0000  760.0000
400.000  25.000  0.000
```

Die erste Zeile gibt die Anzahl verschiedener Gase an, die Anzahl betrachteter Kollisionen (als Vielfaches von 10^7), ob die Übertragung von Anregungsenergie bei Teilchenzusammenstößen (Penningeffekt [78]) mit berücksichtigt werden sollen und die maximale Elektronenenergie (in eV). In der zweiten und dritten Zeile sind die Art der verschiedenen Gase über eine Kennnummer und deren prozentualen Anteile sowie die Temperatur (in °C) und der Druck (in Torr) angegeben. Die elektrischen und magnetischen Felder (in V/cm beziehungsweise kG) sowie der Winkel zwischen beiden finden sich in der vierten Zeile.

General settings (First Card)

Number of gases in mixture - NGAS Number of real collisions (multiple of 10⁷) - NMAX Include Penning effects Upper limit of electron energy - EFINAL

Choice of Gases and Gas properties (Second+Third Card)

Gas	Gas Name	FRAC	fix	(start) value	change	end value	# steps	step size
Gas 1 - NGAS1	Gas 2 - Argon	Fraction 1 - FRAC1	<input checked="" type="checkbox"/>	90,0000 %	<input type="checkbox"/>	50,0000 %	1	0,0000 %
Gas 2 - NGAS2	Gas 12 - CO2	Fraction 2 - FRAC2	<input checked="" type="checkbox"/>	10,0000 %	<input type="checkbox"/>	50,0000 %	1	0,0000 %
Gas 3 - NGAS3	no gas choosen	Fraction 3 - FRAC3	<input checked="" type="checkbox"/>	0,0000 %	<input type="checkbox"/>	0,0000 %	1	0,0000 %
Gas 4 - NGAS4	no gas choosen	Fraction 4 - FRAC4	<input checked="" type="checkbox"/>	0,0000 %	<input type="checkbox"/>	0,0000 %	1	0,0000 %
Gas 5 - NGAS5	no gas choosen	Fraction 5 - FRAC5	<input checked="" type="checkbox"/>	0,0000 %	<input type="checkbox"/>	0,0000 %	1	0,0000 %
Gas 6 - NGAS6	no gas choosen	Fraction 6 - FRAC6	<input checked="" type="checkbox"/>	0,0000 %	<input type="checkbox"/>	0,0000 %	1	0,0000 %

Temperature - TEMP change

Pressure - TORR change

Applied Fields (Fourth Card)

(start) value end value # steps step size

Electric Field - EFIELD change

Magnetic Field - BMAG change

Angle between E and B Field - BTHETA

Generate Magboltz Input

generate new Magboltz Input

add to existing Magboltz Input

Save Magboltz Input to file

save Input File as

input_# .in save

or browse for file save as ..

Exit

```

2      50      1      0.0
2  12  0  0  0  0
90.0000  10.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  20.0000  760.0000
400.0000  25.0000  0.0000

```

Abbildung 3.1: Graphische Benutzeroberfläche zur Erstellung von Magboltz-Eingabedateien.

Eine Eingabedatei kann mehrere vollständige Parametersätze umfassen, welche nacheinander abgearbeitet werden. Um die Erstellung größerer Eingabedateien zu vereinfachen und Fehler, wie eine von 100 % abweichende Summe der Gasanteile, zu vermeiden, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Qt-basierte graphische Benutzeroberfläche programmiert (siehe Abbildung 3.1 sowie Abschnitt 5.4).

Mit dieser GUI lassen sich die Parameter bequem über Eingabefelder festlegen, die zur Verfügung stehenden Gase über Pull-Down-Menüs auswählen und Simulationsreihen für verschiedene Parameter mit einstellbaren Schrittweiten erstellen.

3.2 Simulierte Gasmischungen

Die Wahl des Gasmischungen ist von großer Bedeutung für den Betrieb einer Zeitprojektionskammer. Die gewünschte hohe Präzision bei der Messung verlangt ein Gas mit geringer Diffusion, einer geringen Anfälligkeit auf externe Einflüsse, guten Verstärkungseigenschaften sowie einer hohen Ionisationsrate. Solche Gase bringen jedoch selten eine hohe Ratenfestigkeit, ein schnelles „Entsorgen“ der Ionen und eine geringe Reaktivität zur Vermeidung von Alterungseffekten mit, wie sie für einen stabilen Betrieb des Detektors notwendig sind.

Wie beispielsweise in [100] oder [101] ausführlich beschrieben wird, kommen vor allem die Edelgase Argon und Neon als Hauptkomponente von Driftgasen in Frage. Auch die Tests der GEM-TPC und der Test-TPC wurden mit diesen beiden Gasen durchgeführt. Als Löschgas, sogenannte Quencher oder Quenchgase, werden häufig Kohlenstoffdioxid

(CO₂), Methan (CH₄), Ethan (C₂H₆), Tetrafluormethan (CF₄) oder Stickstoff (N₂) beigemischt. Das Quenchgas hat unter anderem die Aufgabe, die beim Verstärkungsprozess entstehenden Photonen über zusätzliche Anregungszustände zu absorbieren, hierdurch Gasentladungen zu vermeiden und somit die Gasverstärkung zu stabilisieren. Für die GEM-TPC und die Test-TPC wird Kohlenstoffdioxid verwendet, da es im Vergleich zu anderen Quenchgasen am wenigsten reaktiv und am einfachsten zu handhaben ist sowie eine geringere Diffusion hervorruft.

Bei den Tests der GEM-TPC und der Test-TPC kamen Argon-Kohlendioxid und Neon-Kohlendioxid in einem Mischverhältnis von 90:10 (ArCO₂ (90:10), NeCO₂ (90:10)) sowie Argon-Kohlendioxid in einem Verhältnis von 70:30 (ArCO₂ (70:30)) als Driftgase zum Einsatz. Die Simulationen wurden daher vor allem für diese drei Gasgemische durchgeführt.

Zu Vergleichszwecken wurden zudem Argon (100), Neon (100), NeCO₂N₂ (90:5:5) und NeCF₄ (90:10) unter Standardbedingungen³⁰ in Abhängigkeit vom Driftfeld simuliert. Der simulierte Bereich von 0-2000 V/cm geht dabei über die für das GEM-TPC und Test-TPC maximal vorgesehene Driftfeld von 360 V/cm hinaus. Der Bereich, in dem die GEM-TPC während der Tests betrieben wurde, ist daher in den folgenden Graphen zusätzlich vergrößert dargestellt. Die beiden senkrechten Linien entsprechen dabei Driftfeldern von 234 V/cm ($\hat{=} 65\% E_{\text{drift,max}}$) und 360 V/cm ($\hat{=} 100\% E_{\text{drift,max}}$).

In Tabelle 3.1 sind die wichtigsten Werte der simulierten Gase und Gasgemische für ein Driftfeld von 360 V/cm, ein Magnetfeld von 2 T und Standardbedingungen zusammenfassend aufgelistet.

Gasgemisch	ArCO ₂		NeCO ₂	NeCO ₂ N ₂	NeCF ₄	Ar	Ne
Mischverhältnis [%]	70:30	90:10	90:10	90:5:5	90:10	100	100
long. Diffusion							
D_L [$\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$]	140,0	259,4	222,3	236,5	157,2	655,9	1023,4
σ_L [mm]	1,19	2,21	1,90	2,02	1,34	5,60	8,73
trans. Diffusion (0 T)							
D_T [$\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$]	139,0	231,9	213,8	293,2	204,2	1587,4	1568,2
σ_T [mm]	1,19	1,98	1,82	2,50	1,74	13,54	13,38
trans. Diffusion (2 T)							
D_T [$\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$]	123,8	119,8	128,6	158,4	43,4	1235,6	1354,6
σ_T [mm]	1,06	1,02	1,10	1,35	0,37	11,56	11,56
Driftgeschwindigkeit							
v_{drift} [mm/ μs]	8,36	28,66	23,83	29,51	77,41	3,23	6,70

Tabelle 3.1: Eigenschaften verschiedener Gasgemische, die in Zeitprojektionskammern zum Einsatz kommen. Die Werte sind für ein Driftfeld von 360 V/cm, ein Magnetfeld von 2 T, eine TPC-Länge von $l=727,8$ mm und Standardbedingungen simuliert. Zum Vergleich sind die Eigenschaften von reinem Argon und Neon aufgeführt.

³⁰ Temperatur $T = 20^\circ\text{C}$, Druck $p = 760$ Torr = 1013,25 mbar

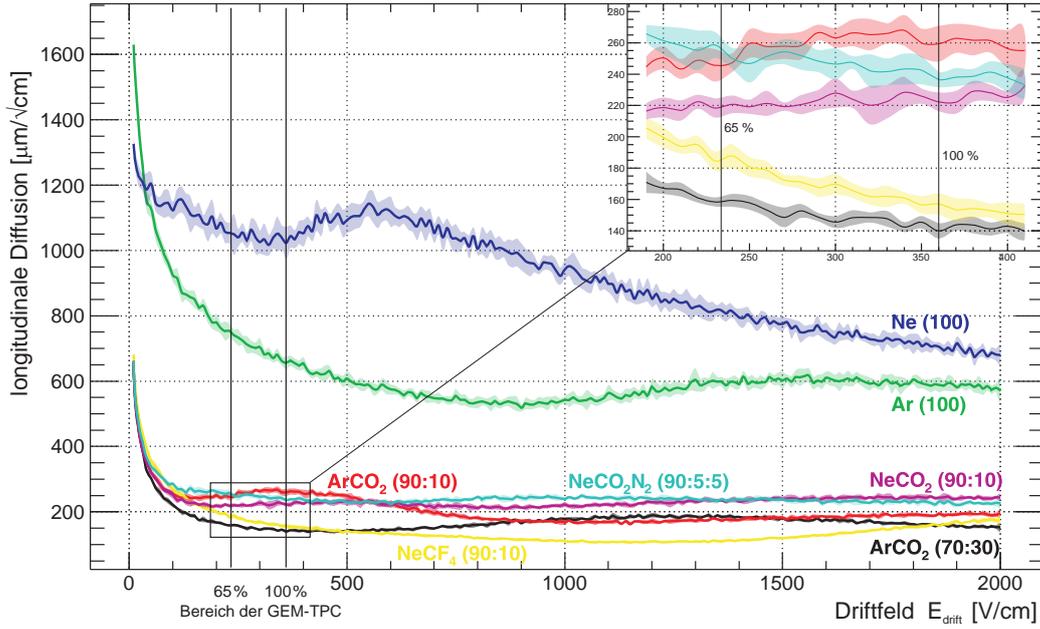


Abbildung 3.2: Simulation der longitudinalen Diffusion in verschiedenen Gasgemischen unter Standardbedingungen und einer Magnetfeldstärke von $B_Z=2$ T.

3.3 Longitudinale Diffusion

Die Ergebnisse für die longitudinale Diffusion in Abhängigkeit vom angelegten Driftfeld E_{drift} mit einem Magnetfeld der Stärke 2 T sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Hier wird deutlich, dass durch die Beimischung eines Quenchgases die Diffusion um einen Faktor drei (ArCO_2 (90:10) im Vergleich zu reinem Argon) bis acht (NeCF_4 (90:10) im Vergleich zu reinem Neon) reduziert werden kann. Für die in der GEM-TPC verwendeten Gasgemische ergeben sich bei einem Driftfeld von 360 V/cm Werte von

$$D_L(\text{ArCO}_2 (90 : 10)) = (259,4 \pm 11,4) \mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}} \quad ,$$

$$D_L(\text{NeCO}_2 (90 : 10)) = (222,3 \pm 6,0) \mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}} \quad ,$$

was über die gesamte Driftlänge von $l=727,8$ mm einer longitudinalen Diffusion von

$$\sigma_L(\text{ArCO}_2 (90 : 10)) = (2,21 \pm 0,10) \text{ mm} \quad ,$$

$$\sigma_L(\text{NeCO}_2 (90 : 10)) = (1,90 \pm 0,05) \text{ mm}$$

entspricht. Über den Bereich des verwendeten Driftfeldes bleiben diese Werte für alle Gasgemische nahezu konstant und ändern sich auch für höhere Driftfelder nur noch geringfügig.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen der Simulation ohne Magnetfeld in Abbildung 3.3 zeigt, wie anhand den theoretischen Betrachtungen zu erwarten ist, dass die Werte nicht vom Magnetfeld abhängen.

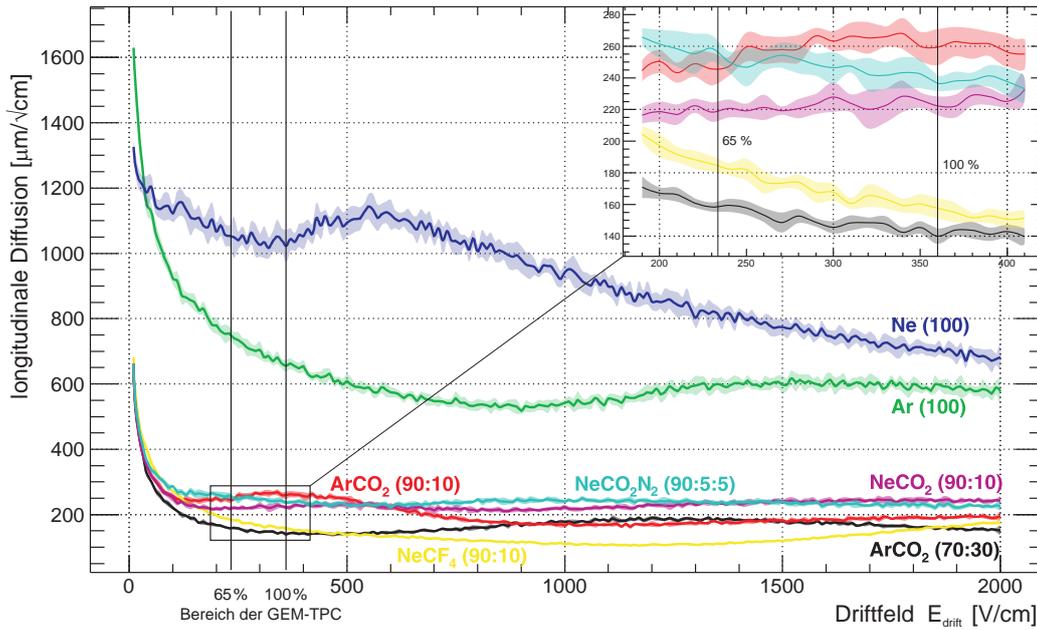


Abbildung 3.3: Simulation der longitudinalen Diffusion in verschiedenen Gasmischungen unter Standardbedingungen und ohne Magnetfeld.

3.4 Transversale Diffusion

Anders verhält es sich bei der transversalen Diffusion, die in den Abbildungen 3.4 und 3.5 in Abhängigkeit vom Driftfeld E_{drift} mit und ohne Magnetfeld dargestellt ist. Der Vergleich der beiden Graphen zeigt deutlich, dass die transversale Diffusion durch Magnetfelder beeinflusst wird und sich die Diffusion mit einer für das CBELSA/TAPS-Experiment vorgesehenen Feldstärke von 2 T um einen Faktor zwei oder mehr verringern lässt. Zudem wird auch hier ersichtlich, dass die Beimischung eines Quenchgases einen starken, positiven Effekt auf die transversale Diffusion hat.

Auffällig ist bei allen Gasmischungen der Anstieg der Diffusion bei höheren Driftfeldern. Dies ist auf den Verlauf der Wechselwirkungsquerschnitte der einzelnen Gaskomponenten zurückzuführen und fällt mit Magnetfeld etwas deutlicher aus als ohne.

Für ArCO_2 (90:10) und NeCO_2 (90:10) erreicht die Diffusion gerade im Bereich der Driftfelder der GEM-TPC ihr Minimum und ist hier im Rahmen der systematischen Fehler konstant bei

$$D_T(\text{ArCO}_2 (90 : 10)) = (119,80 \pm 4,34) \mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}} \quad ,$$

$$D_T(\text{NeCO}_2 (90 : 10)) = (128,60 \pm 3,92) \mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}} \quad .$$

Die transversale Diffusion für Elektronen, die über die gesamte Länge der GEM-TPC driften, liegt bei

$$\sigma_T(\text{ArCO}_2 (90 : 10)) = (1,02 \pm 0,04) \text{ mm} \quad ,$$

$$\sigma_T(\text{NeCO}_2 (90 : 10)) = (1,10 \pm 0,04) \text{ mm} \quad .$$

Mit dem im FOPI-Experiment zur Verfügung stehenden Magnetfeld ($B_Z=0,6$ T) ergibt sich für diese beiden Gasmischungen erwartungsgemäß eine höhere transversale Diffusion

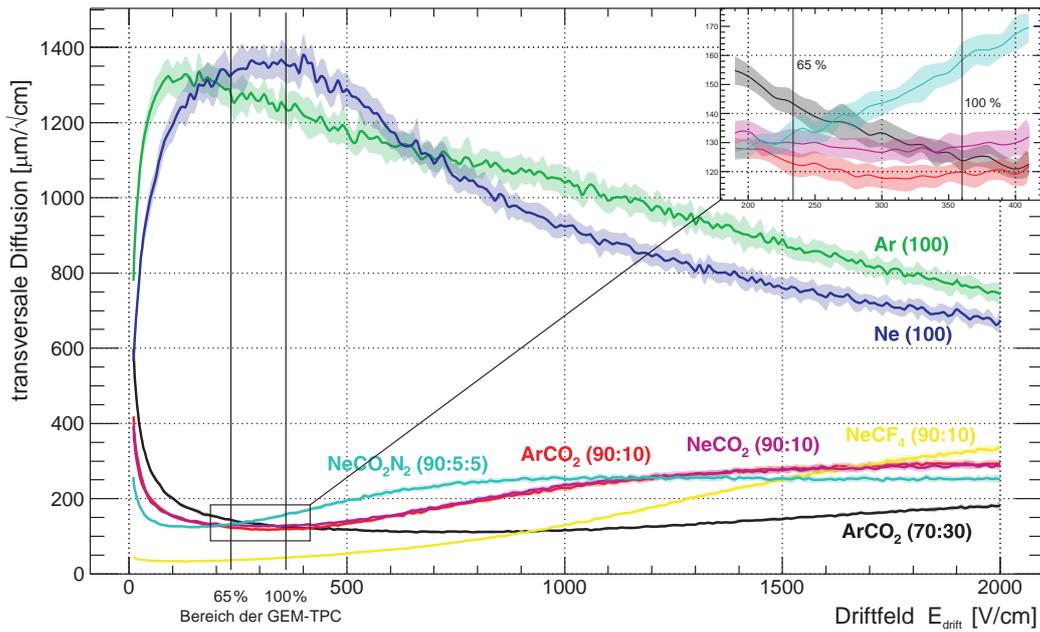


Abbildung 3.4: Simulation der transversalen Diffusion in verschiedenen Gasgemischen unter Standardbedingungen und einer Magnetfeldstärke von $B_Z=2$ T.

von

$$D_T(\text{ArCO}_2 (90 : 10)) = (206,3 \pm 9,7) \mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}} \quad ,$$

$$D_T(\text{NeCO}_2 (90 : 10)) = (200,0 \pm 6,3) \mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}} \quad ,$$

so dass die Diffusion für Elektronen, die über die gesamte Länge der GEM-TPC driften, mit Werten von

$$\sigma_T(\text{ArCO}_2 (90 : 10)) = (1,76 \pm 0,08) \text{ mm} \quad ,$$

$$\sigma_T(\text{NeCO}_2 (90 : 10)) = (1,71 \pm 0,05) \text{ mm}$$

in der Größenordnung der Pads auf der Ausleseebene liegt. Dadurch hat die transversale Diffusion einen großen Einfluss auf die Ortsauflösung der Zeitprojektionskammer. Durch geeignete Cluster- und Spurrekonstruktion lässt sich die Auflösung verbessern, für die GEM-TPC beispielsweise auf einige $100 \mu\text{m}$ [70].

3.5 Driftgeschwindigkeit

In Abbildung 3.6 sind die Driftgeschwindigkeiten von Elektronen in den verschiedenen simulierten Gasen in Abhängigkeit von den angelegten Driffeldern aufgetragen. Es zeigt sich, dass durch die Beimischungen eines Quenchgases eine deutlich höhere Driftgeschwindigkeit erreicht werden kann, als es mit reinem Argon oder Neon möglich wäre. Während der positive Effekt auf die Diffusion für die unterschiedlichen Quenchgase jedoch in der gleichen Größenordnung liegt, ist der Effekt auf die Driftgeschwindigkeit

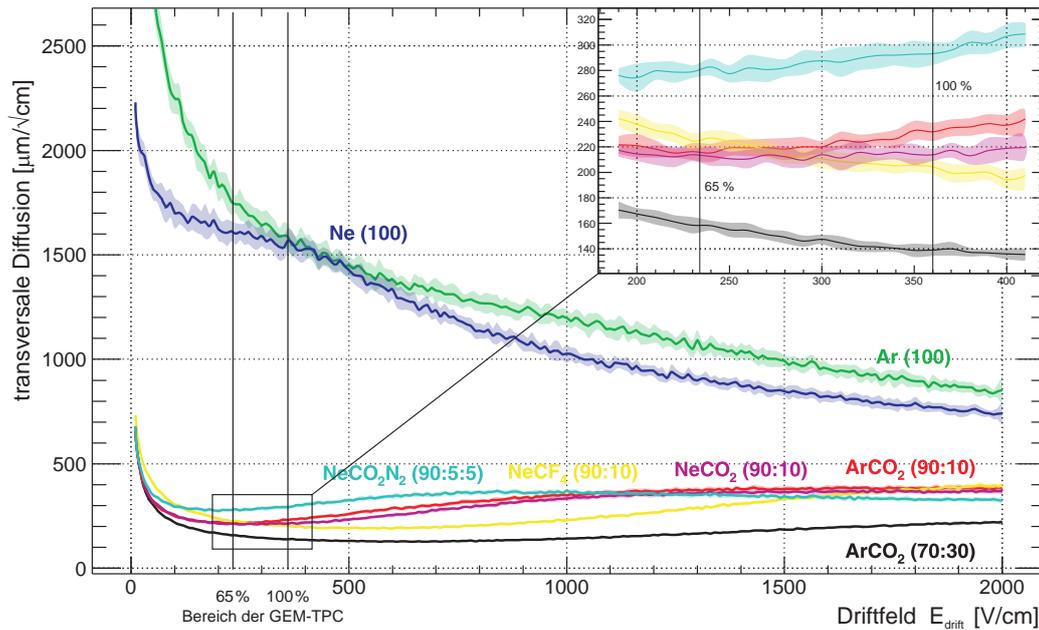


Abbildung 3.5: Simulation der transversalen Diffusion in verschiedenen Gasgemischen unter Standardbedingungen und ohne Magnetfeld.

stark vom Quenchgas und der prozentualen Beimischung abhängig. Bei Gasmischungen mit CF_4 können schon für niedrige Driftfelder sehr hohe Driftgeschwindigkeiten erreicht werden. In NeCF_4 (90:10) wird beispielsweise für Driftgeschwindigkeiten über $50 \text{ mm}/\mu\text{s}$ lediglich ein Driftfeld von $130 \text{ V}/\text{cm}$ benötigt. Für hohe CO_2 -Konzentration im Driftgas hingegen steigt die Driftgeschwindigkeit nur langsam mit dem Driftfeld an. Wie zu erwarten ist, zeigt der Vergleich mit den ohne Magnetfeld simulierten Werten in Abbildung 3.7 keine Abweichung.

Idealerweise sollte eine Zeitprojektionskammer mit einem Driftfeld betrieben werden, bei dem sich die Driftgeschwindigkeit bei Spannungsschwankungen nur wenig ändert oder konstant ist. Für alle simulierten Gasgemische wird jedoch erst ab einem Driftfeld von über $700 \text{ V}/\text{cm}$ solch ein Plateau oder Maximum erreicht. Der Bereich, in dem die GEM-TPC und die Test-TPC betrieben werden können, liegt somit für alle Gasgemische in der ansteigenden Flanke. Um während der Messungen große Variationen in der Driftgeschwindigkeit zu vermeiden, müssen die angelegten Spannungen daher von der SlowControl konstant gehalten und die äußeren Parameter genau überwacht werden, wie in Kapitel 4 und 5 ausgeführt ist.

Wie aus den Gleichungen 2.4 und 2.5 ersichtlich ist, hängt die Driftgeschwindigkeit von der mittleren freien Zeit zwischen zwei Stößen τ und somit von der Temperatur und dem Druck ab.

Die weiteren Simulationen wurden vor allem für die in der GEM-TPC verwendeten Gasgemische ArCO_2 (90:10) und NeCO_2 (90:10) mit der im FOPI-Experiment verfügbaren Magnetfeldstärke von $0,6 \text{ T}$ für verschiedene Temperaturen T , Drücke p und Konzentrationsschwankungen durchgeführt.

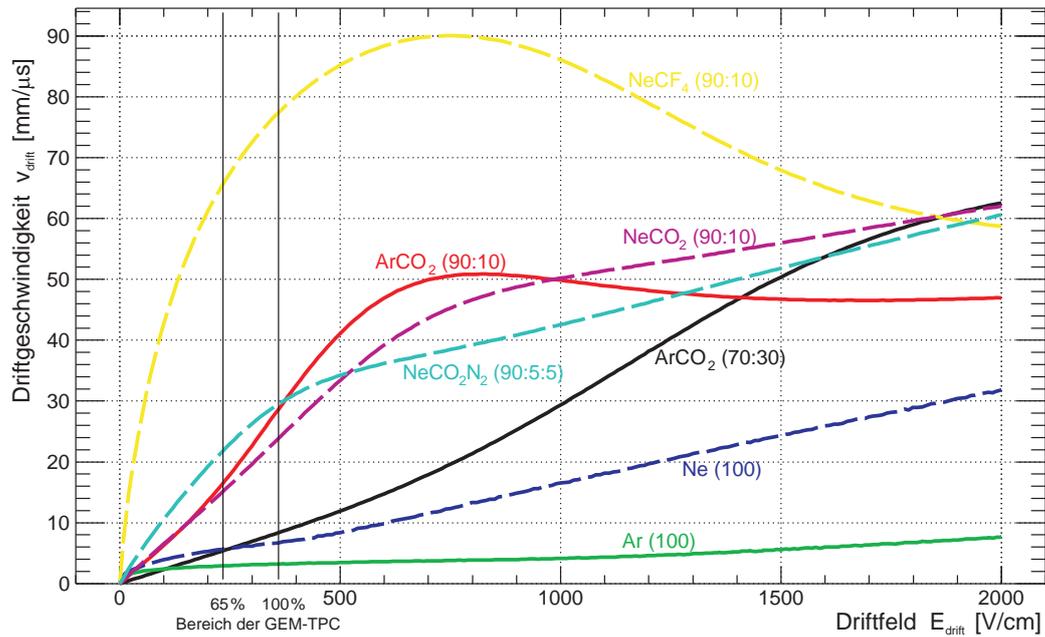


Abbildung 3.6: Elektronendriftgeschwindigkeit in verschiedenen Gasgemischen in Abhängigkeit vom angelegten Driftfeld unter Standardbedingungen und einer Magnetfeldstärke von $B_Z=2\text{ T}$.

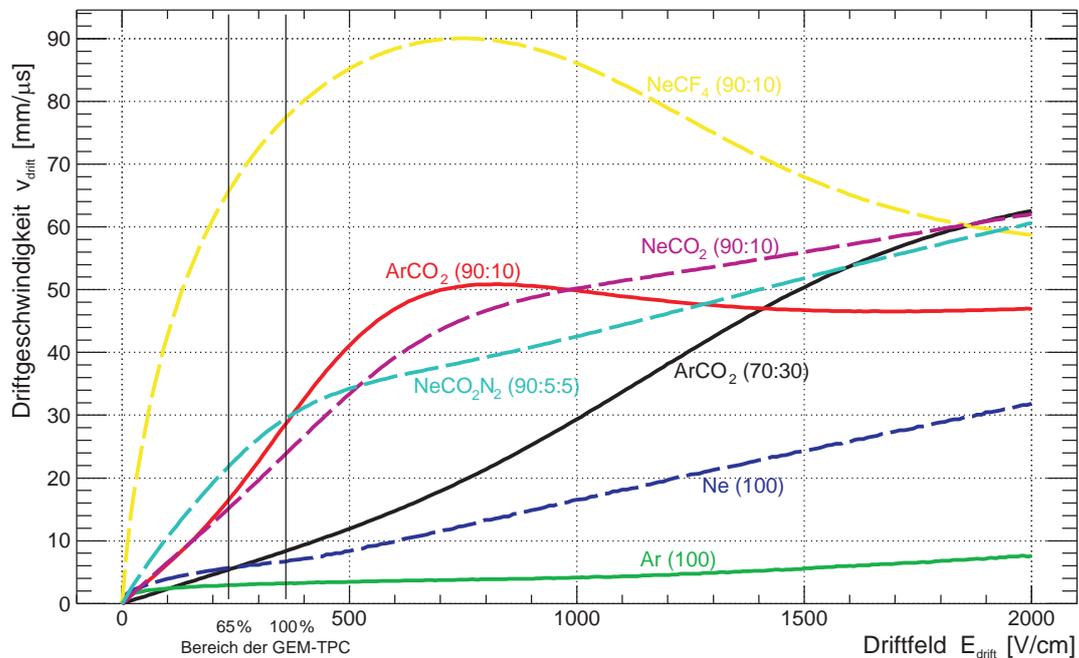


Abbildung 3.7: Elektronendriftgeschwindigkeit in verschiedenen Gasgemischen in Abhängigkeit vom angelegten Driftfeld unter Standardbedingungen und ohne Magnetfeld.

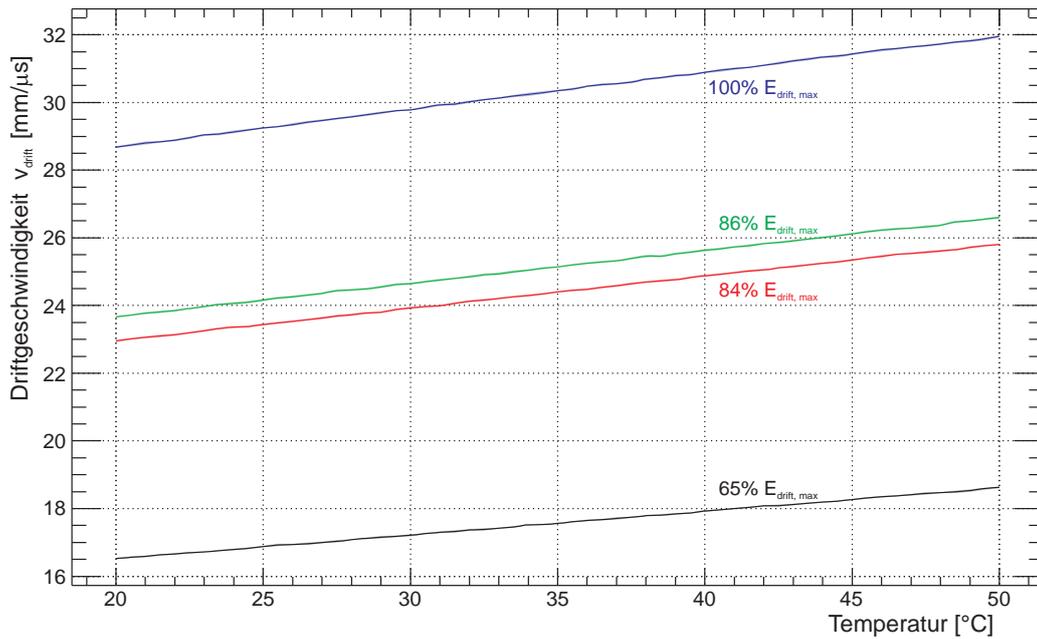


Abbildung 3.8: Abhängigkeit der Elektronendriftgeschwindigkeit in ArCO₂ (90:10) von der Temperatur bei verschiedenen Driftfeldern.

3.5.1 Temperaturabhängigkeit

Die Abhängigkeit der Driftgeschwindigkeit von der Temperatur wurde für ArCO₂ (90:10) und NeCO₂ (90:10) für einen Bereich von 20 °C bis 50 °C simuliert. Abbildung 3.8 und 3.9 zeigen die simulierten Driftgeschwindigkeiten bei den während der Datennahme vorzugsweise eingestellten Driftfeldern.

Die Simulationen weisen für beide Gasgemische in diesem Temperaturbereich einen nahezu linearen Anstieg der Driftgeschwindigkeit mit zunehmender Temperatur auf.

Da sich der simulierte Bereich für beide Gasgemische in der ansteigenden Flanke befindet, steigt die Driftgeschwindigkeit für die verschiedenen Driftfelder unterschiedlich stark mit der Temperatur an. Für ein Driftfeld von 100% $E_{drift,max}$ ändert sich die Driftgeschwindigkeit in ArCO₂ beispielsweise um 0,11 mm/μs pro 1 °C, während die Änderung bei 65% $E_{drift,max}$ lediglich 0,07 mm/μs pro 1 °C beträgt. In NeCO₂ ist die Änderungsrate generell etwas niedriger und liegt für ein Driftfeld von 100% $E_{drift,max}$ bei nur 0,08 mm/μs pro 1 °C.

3.5.2 Druckabhängigkeit

Mit steigendem Druck erhöht sich die Anzahl der Teilchen im Gasvolumen. Für die driftenden Elektronen steigt somit die Wahrscheinlichkeit eines Stoßes mit diesen. Die Driftgeschwindigkeit nimmt daher mit steigendem Druck ab, wie in den Abbildungen 3.10 und 3.11 für verschiedene Driftfelder und Temperaturen von 20 °C, 25 °C, 30 °C und 35 °C dargestellt ist. Wie bei der Temperaturabhängigkeit ist die Änderungsrate im simulierten Bereich vom Driftfeld abhängig. Je höher das Driftfeld gewählt wird, desto größer sind die Änderungen der Driftgeschwindigkeit bei einer Druckänderung. Die

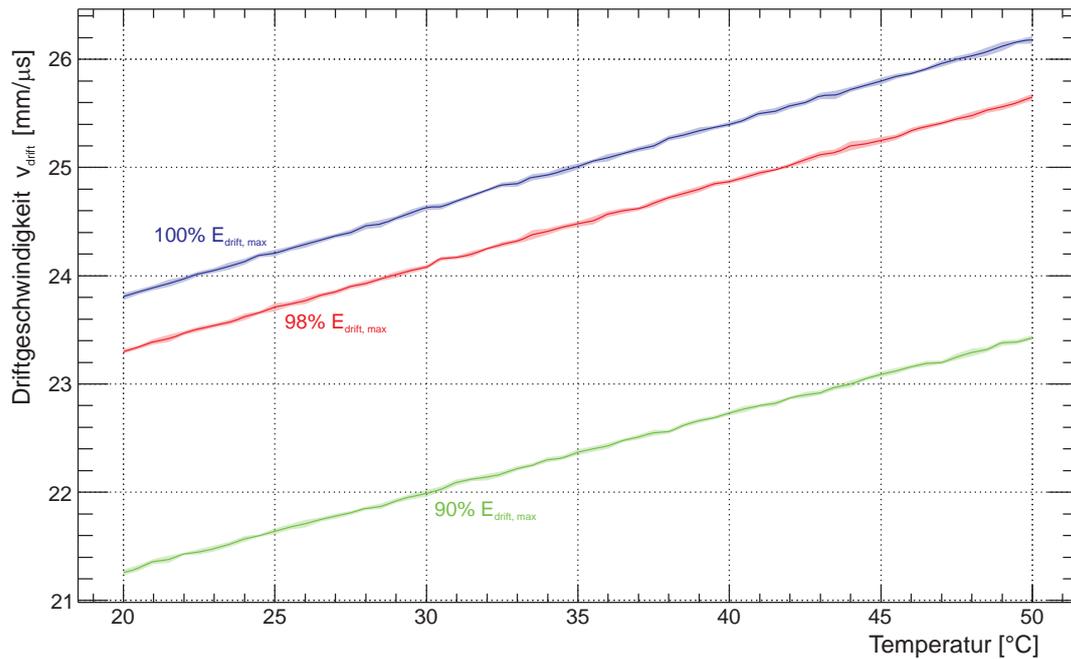


Abbildung 3.9: Abhängigkeit der Elektronendriftgeschwindigkeit in NeCO₂ (90:10) von der Temperatur bei verschiedenen Driftfeldern.

Reduzierung des Driftfeldes folgt in diesem Bereich jedoch keinem linearen Zusammenhang, so dass sich für die Änderung der Driftgeschwindigkeit für eine Druckänderung von 10 mbar nur ein Näherungswert von 0,15 mm/μs (in ArCO₂, bei einem Driftfeld von 65 % $E_{\text{drift,max}}$) bis 0,325 mm/μs (in ArCO₂, bei einem Driftfeld von 100 % $E_{\text{drift,max}}$) angeben lässt.

3.5.3 Abhängigkeit von der Gaszusammensetzung

Wie bereits gezeigt wurde, hat die Beimischung eines Quenchgases einen starken Einfluss auf die Driftgeschwindigkeit. Für die Tests der GEM-TPC wurde ein Mischverhältnis zwischen Argon beziehungsweise Neon und CO₂ als Quenchgas von 90:10 Massenanteilen verwendet. Da es jedoch auch bei industriell vorgemischten Gasen zu leichten Schwankungen in der Zusammensetzung kommen kann, wurde die Driftgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Argon- und Neonkonzentration für verschiedene Driftfelder und Temperaturen von 20 °C, 25 °C, 30 °C und 35 °C simuliert.

Die Abbildungen 3.12 und 3.13 zeigen die Ergebnisse der Simulation für eine Argon beziehungsweise Neonkonzentration von 88-92 %. Der fehlende Anteil in den Gasgemischen ist jeweils CO₂. Für beide Gasgemische äußert sich die Erhöhung der Konzentration der Hauptkomponente in einem vom Driftfeld abhängigen Anstieg der Driftgeschwindigkeit, wobei in ArCO₂ ein deutlich größerer Anstieg über den gesamten Bereich zu verzeichnen ist als in NeCO₂. In ArCO₂ steigt die Driftgeschwindigkeit abhängig vom Driftfeld schon für eine geringe Konzentrationsänderung von 0,1 % um näherungsweise 0,194 mm/μs (bei einem Driftfeld von 65 % $E_{\text{drift,max}}$) bis 0,31 mm/μs (bei einem Driftfeld von 100 % $E_{\text{drift,max}}$). Für NeCO₂ ergibt sich eine Änderungsrate der Driftgeschwin-

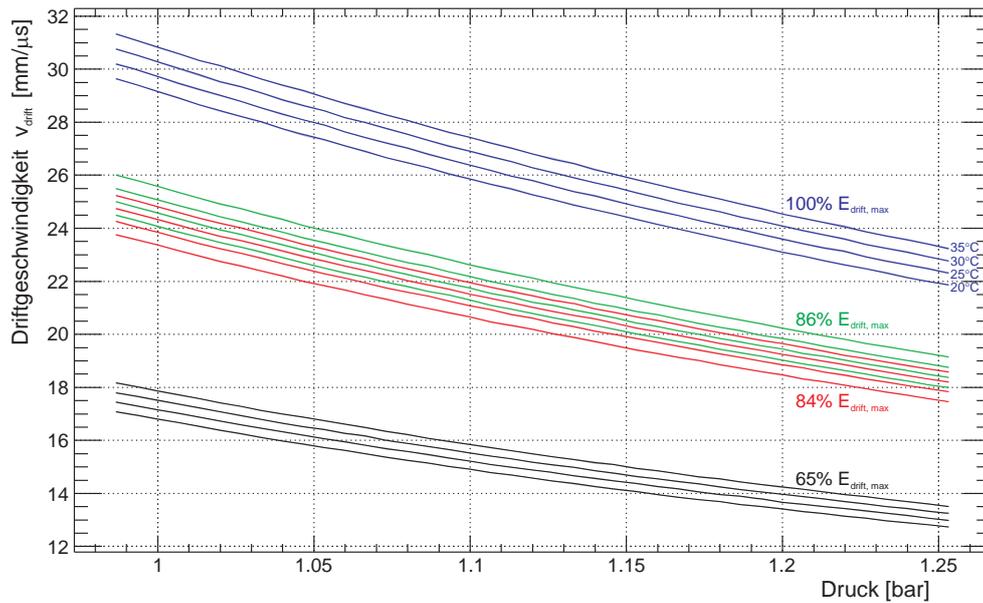


Abbildung 3.10: Abhängigkeit der Elektronendriftgeschwindigkeit in ArCO₂ (90:10) vom Druck bei verschiedenen Driftfeldern und Temperaturen.

digkeit von 0,177 mm/μs (bei einem Driftfeld von 90 % $E_{\text{drift, max}}$) bis 0,190 mm/μs (bei einem Driftfeld von 100 % $E_{\text{drift, max}}$).

Weitere Änderungen an der Gaszusammensetzung sind durch Verunreinigungen mit beispielsweise Sauerstoff oder Wassermolekülen zu erwarten. Für den in Abbildungen 3.14 und 3.15 dargestellt Bereich von bis zu 400 ppm und darüber hinaus haben Sauerstoffbeimischungen im Driftgas keinen Einfluss auf die Driftgeschwindigkeit. Bei steigender Wasserkonzentration im Driftgas zeigt sich hingegen eine Abnahme der Driftgeschwindigkeit (siehe Abbildungen 3.16 und 3.17). Die Änderungsrate ist mit 0,014 mm/μs pro 10 ppm für ArCO₂ und 0,008 mm/μs pro 10 ppm für NeCO₂ jedoch so gering, dass eine Verunreinigung mit Wasser im erwarteten Bereich von unter 50 ppm keinen nennenswerten Einfluss auf die Driftgeschwindigkeit hat.

Das größere Problem dieser Verunreinigungen besteht in der Anlagerung von Primärelektronen an die Wasser- und Sauerstoffmoleküle, sogenanntes Attachment³¹. Auf diese Weise werden die Elektronen gebunden und können nicht mehr vervielfacht und detektiert werden, wodurch sich die Orts- und die Energieauflösungsvermögen verschlechtern [100, 102]. Trotz des geringen Einflusses auf die Driftgeschwindigkeit muss daher die Sauerstoff- und Wasserkonzentration gering gehalten und überwacht werden.

3.5.4 Verwendbarkeit der Simulationsergebnisse

Alle durchgeführten Simulationen bestätigen, dass die äußeren Bedingungen einen großen Einfluss auf die Driftgeschwindigkeit haben. Aus der Ungenauigkeit der Driftgeschwindigkeit in Abhängigkeit von den einzelnen Parametern lässt sich die Abweichung

³¹attachment (engl.) - Anhang, Anlagerung

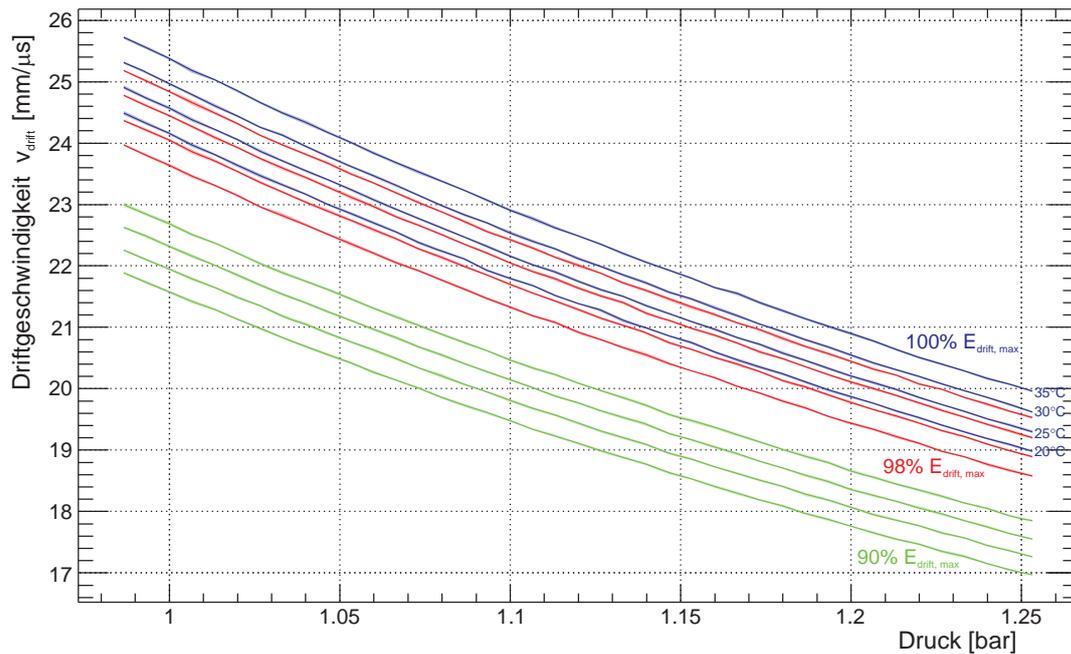


Abbildung 3.11: Abhängigkeit der Elektronendriftgeschwindigkeit in NeCO₂ (90:10) vom Druck bei verschiedenen Driftfeldern und Temperaturen.

der Simulationsergebnisse von der tatsächlichen Driftgeschwindigkeit näherungsweise über

$$\Delta v_{\text{drift}}(\text{gesamt}) = \sqrt{\Delta v_{\text{drift}}^2(\text{Driftfeld}) + \Delta v_{\text{drift}}^2(\text{Temperatur}) + \Delta v_{\text{drift}}^2(\text{Druck}) + \Delta v_{\text{drift}}^2(\text{Konzentration}) + \dots} \quad (3.1)$$

abschätzen. Da sich der Fehler der Driftgeschwindigkeit direkt auf die rekonstruierte z -Komponente überträgt, ist eine exakte Steuerung und Überwachung aller Detektorparameter für eine sinnvolle Verwendung der simulierten Driftgeschwindigkeiten von großer Wichtigkeit.

Mit Hilfe der Werte der SlowControl, deren Hard- und Software in den folgenden Kapiteln ausführlich beschrieben wird, kann für jede einzelne Datendatei leicht ein eigener Parametersatz erstellt und die Driftgeschwindigkeit hierfür simuliert werden. Auf die Genauigkeit der SlowControl-Werte im Hinblick auf die Verwendbarkeit der Simulationsergebnisse wird in Kapitel 6 nochmals genauer eingegangen.

Wird die Abweichung der Simulationsergebnisse durch Messungenauigkeiten oder durch fehlende Werte einzelner Parameter jedoch zu groß, so ist eine Bestimmung der Driftgeschwindigkeit aus den Daten notwendig, wie sie in Kapitel 7 beschrieben wird.

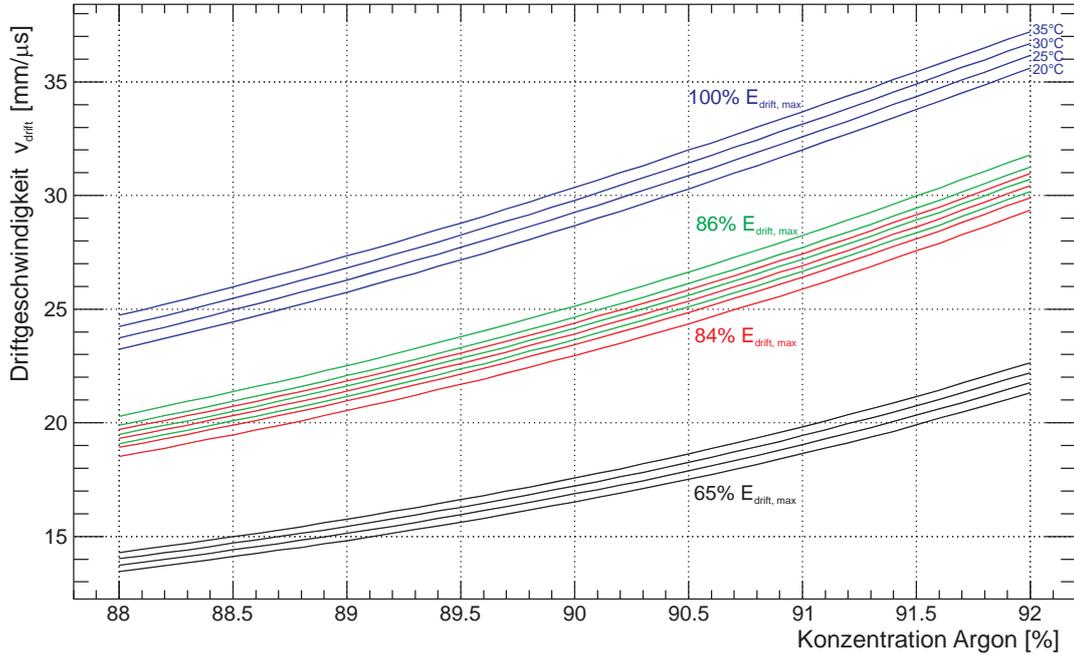


Abbildung 3.12: Abhängigkeit der Elektronendriftgeschwindigkeit in $ArCO_2$ (90:10) von der Argonkonzentration bei verschiedenen Driftfeldern und Temperaturen.

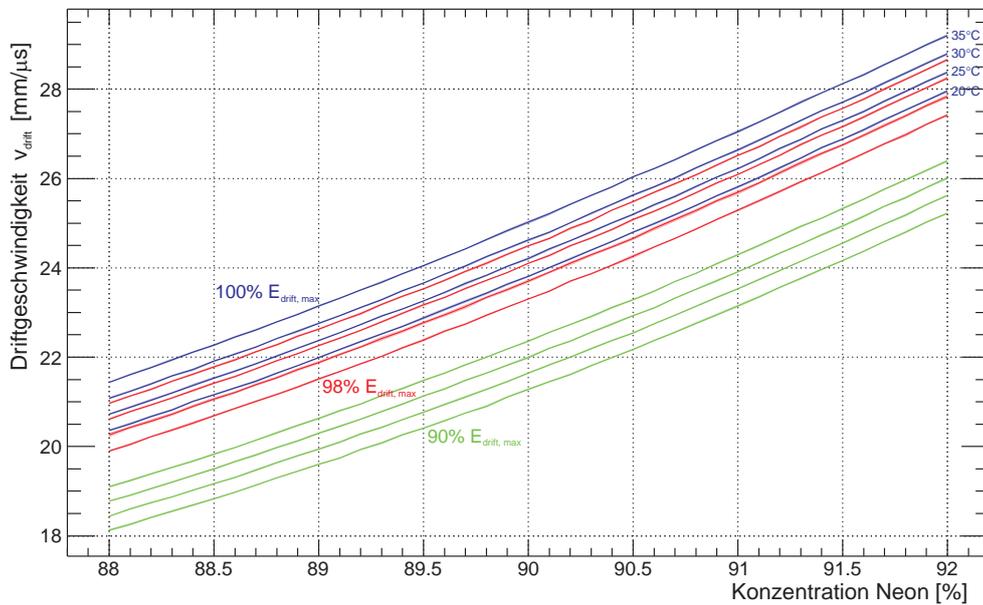


Abbildung 3.13: Abhängigkeit der Elektronendriftgeschwindigkeit in $NeCO_2$ (90:10) von der Neonkonzentration bei verschiedenen Driftfeldern und Temperaturen.

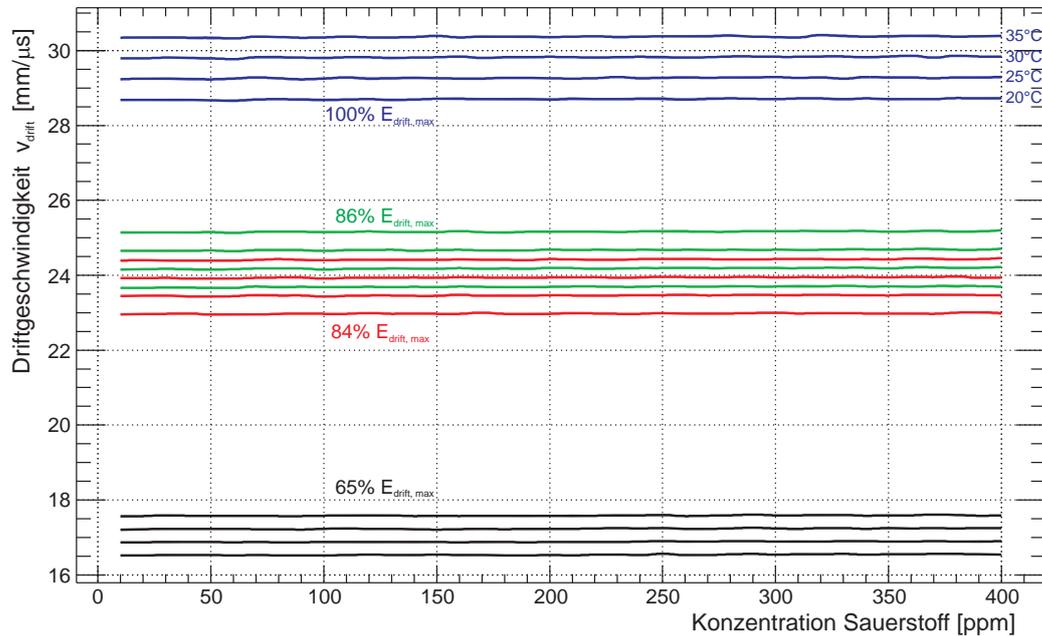


Abbildung 3.14: Abhängigkeit der Elektronendriftgeschwindigkeit in ArCO_2 (90:10) von der Sauerstoffkonzentration im Driftgas bei verschiedenen Driftfeldern und Temperaturen.

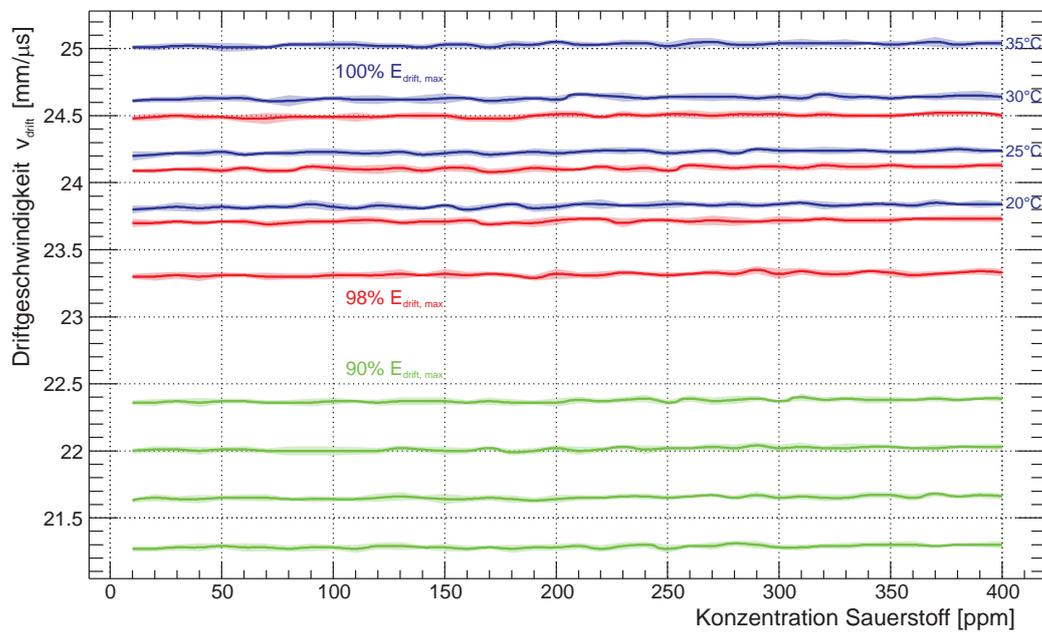


Abbildung 3.15: Abhängigkeit der Elektronendriftgeschwindigkeit in NeCO_2 von der Sauerstoffkonzentration im Driftgas bei verschiedenen Driftfeldern und Temperaturen.

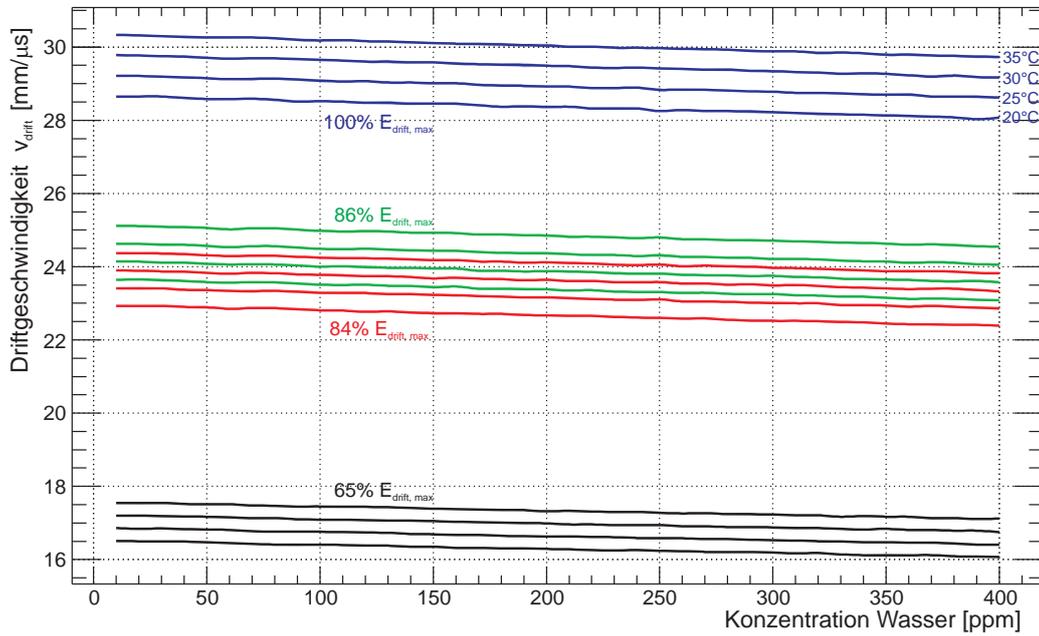


Abbildung 3.16: Abhängigkeit der Elektronendriftgeschwindigkeit in ArCO_2 (90:10) von der Wasserkonzentration im Driftgas bei verschiedenen Driftfeldern und Temperaturen.

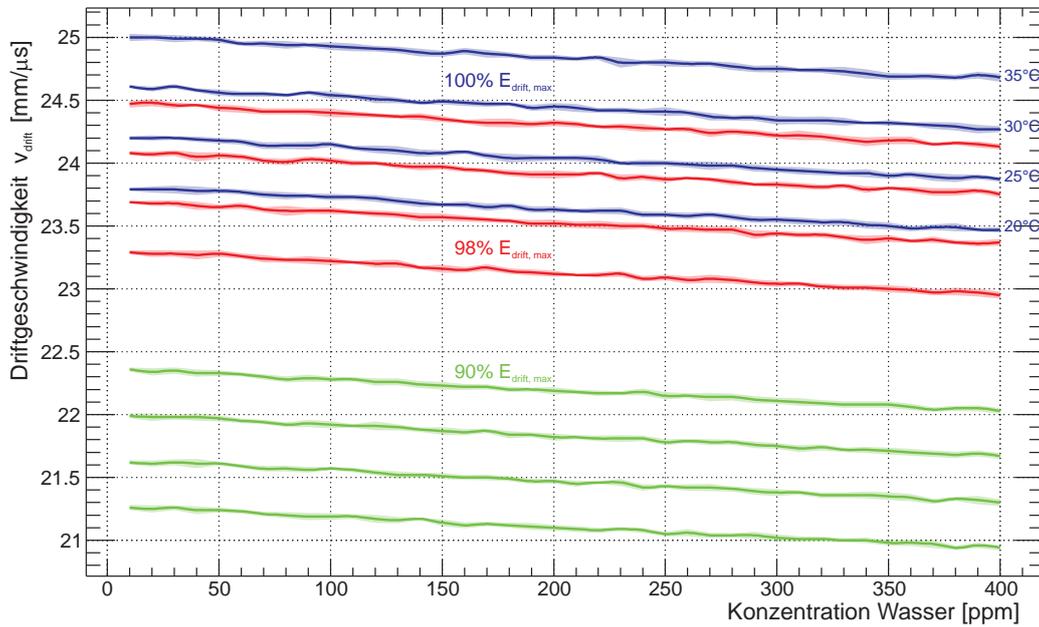


Abbildung 3.17: Abhängigkeit der Elektronendriftgeschwindigkeit in NeCO_2 (90:10) von der Wasserkonzentration im Driftgas bei verschiedenen Driftfeldern und Temperaturen.

Miss alles, was sich messen lässt,
und mach alles messbar, was
sich nicht messen lässt.

(Galileo Galilei)

4 SlowControl-Hardware

Für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb der TestBench und der GEM-TPC sowie eine exakte Simulation der Driftgeschwindigkeiten müssen zahlreiche Parameter, die sich im Vergleich zu den beobachteten physikalischen Größen nur langsam ändern, überwacht und gesteuert werden. Neben den Temperaturen inner- und außerhalb der Detektoren, den Parametern der Gassysteme und den Spannungen für die Ausleseelektronik gilt dies vor allem für die Hochspannungen an den GEM-Folien sowie für die Driftspannung. Zentrales Thema der vorliegenden Arbeit ist daher die Entwicklung von Hard- und Software für eine SlowControl zur Überwachung dieser Detektorparameter.

Bei der Hardware zur Überwachung und Steuerung der Detektoren auf der TestBench und an der GEM-TPC konnte nur teilweise auf bestehende Systeme zurückgegriffen werden. Dies ist zum Beispiel für die Hochspannungsversorgung der Fall. Andere Komponenten, wie das Gassystem für die TestBench, mussten völlig neu konstruiert werden. Auch für die Auslese der meisten Sensoren mussten neue Hardwaremodule entwickelt werden, um eine Kommunikation über Ethernet realisieren zu können. Dies ermöglicht ein hohes Maß an Stabilität, Flexibilität, Fernsteuerbarkeit und Erweiterbarkeit um zusätzliche Komponenten.

4.1 Hardware-Komponenten für die GEM-TPC

4.1.1 Hochspannung

Der Betrieb der GEM-TPC verlangt zum Einen eine konstante Überwachung jeder einzelnen, an den GEM-Folien oder dem Feldkäfig angelegten Hochspannung und zum Anderen die Möglichkeit, alle Hochspannungskanäle gleichzeitig zu steuern. Letzteres ist vor allem beim Hoch- und Runterfahren der Spannungen von großer Bedeutung, um Beschädigungen der GEM-Folien und des Feldkäfigs durch Überspannungen, Kurzschlüsse oder Funkenentladungen zu vermeiden. Um dies zu gewährleisten, sind sowohl hard- als auch softwareseitig entsprechende Vorkehrungen getroffen worden.

Die Hochspannungsversorgung der GEM-Folien und des letzten Rings des Feldkäfigs muss über eine sehr gute Spannungsstabilität mit einer Restwelligkeit und einem Rauschen unter 100 mV bei einer maximalen Spannung von 6 kV, eine hochpräzise Strommessung mit einer Auflösung im nA-Bereich, einstellbare Rampgeschwindigkeiten sowie eine kanalweise regulierbare Notfallabschaltung verfügen. Alle Funktionen müssen sich zudem über eine Netzwerkverbindung fernsteuern lassen.



Abbildung 4.1: W-IE-NE-R MPOD-Crate mit ISEG Hochspannungsmodulen [103].

Die Hochspannungsmodule EHS-8060n der Firma ISEG [104, 105] entsprechen den genannten Anforderungen und sind über ein MPOD-Crate³² der Firma W-IE-NE-R ansteuerbar (siehe Abbildung 4.1, [103, 106]). Die Kommunikation erfolgt mit Hilfe von SNMP³³-Kommandos über Ethernet oder direkt über den intern genutzten CAN-Bus³⁴. Für die Driftspannung ist eine separate Spannungsversorgung notwendig, da hier zwar ähnliche Anforderungen gelten wie für die GEM-Folien, jedoch eine maximale Spannung von 30 kV bei Strömen bis zu 1 mA erreicht werden muss. Das verwendete 30 kV Modul ISEG HPn300 (siehe Abbildung 4.2, [107]) bietet eine Restwelligkeit und Spannungsstabilität von $0,01\% \cdot U_{max} = 3\text{ V}$ und lässt sich sowohl über RS-232³⁵ als auch mit dem MPOD-Crate steuern.



Abbildung 4.2: 30-kV-Hochspannungsversorgung ISEG HPn300 [104].

³²crate (engl.) - Überrahmen

³³SNMP - Simple Network Management Protocol (engl.) - einfaches Netzwerkverwaltungsprotokoll

³⁴CAN-Bus - Controller Area Network (engl.) - echtzeitfähiger Feldbus zur serielle Datenübertragung

³⁵RS - Recommended Standard (engl.) - empfohlener Standard

Bei diesen hohen Spannungen ist ein hardwareseitig realisiertes Sicherheitssystem zwingend notwendig, da von Benutzer- oder Softwareseite aus kaum schnell genug auf unvorhergesehene Ereignisse reagiert werden kann. Hierzu lassen sich beide Hochspannungsmodule über einen Interlock-Anschluss verbinden und somit eine gemeinsame Notfallabschaltung beider Systeme erreichen. Im Regelfall ist ein zu hoher Strom auf einem der Hochspannungskanäle, ein sogenannter Trip, der Grund für eine solche Notfallabschaltung. Über das MPOD-Crate können noch weitere Auslöser sowie die Reaktionszeit der Notfallabschaltung eingestellt werden. Die Hochspannungsmodule können jedoch auch ohne die Interlock-Verbindung betrieben werden. In diesem Fall wird bei einem Trip je nach Einstellung nur die Hochspannung des jeweils auslösenden Systems oder des einzelnen Kanals abgeschaltet. Bei einem Trip durch die GEM-Folien kann dies von Vorteil sein, da ein Hochfahren der Driftspannung einige Stunden in Anspruch nehmen und somit Messzeit verloren gehen kann. Um in einem solchen Fall die Gefahr von Entladungen zwischen der ersten GEM-Folie und dem Feldkäfig zu minimieren, wird die Driftspannung softwareseitig auf ein sicheres Niveau heruntergefahren, welches sich über die graphische Benutzeroberfläche definieren lässt. Als weitere Sicherheitsvorkehrung ist in der Software zudem ein kontrolliertes Herunterfahren der Drift- und GEM-Spannungen vorgesehen, sollten die gemessenen Spannungen und Ströme unerwartet ansteigen oder abfallen (siehe Anhang C.2, OverVoltage/OverCurrent Limit).

4.1.2 Temperaturüberwachung und -regelung

Für die Überwachung der Temperaturen befinden sich 210 Dallas 1-Wire Temperatursensoren des Typs 18B20U gleichmäßig verteilt auf dem Feldkäfig. Sie sind somit möglichst nah am Gasvolumen, stören aber nicht die Homogenität des elektrischen Feldes. Diese digitalen Sensoren werden derzeit nicht über die SlowControl ausgelesen und dargestellt, sondern separat über eine USB-Schnittstelle und ein LabVIEW³⁶-Programm ausgewertet und gespeichert.

Auf der Ausleseebene der GEM-TPC sind zudem zwölf analoge Pt100-Temperatursensoren in SMD-Bauweise angebracht, um die Temperaturen der Front-End-Karten zu überwachen. Letztere werden mit einem Kühlsystem konstant gehalten. Am Gasein- und Gasauslass lassen sich die Temperaturen mit den dort angebrachten Gasflussmessern aufzeichnen.

a) Pt100-Temperatursensoren

Pt100-Sensoren sind Kaltleiter die es erlauben, die Temperatur aus der Änderung der elektrischen Leitfähigkeit eines Platindrahtes oder einer dünnen Platinschicht zu bestimmen. Der Name leitet sich von dem verwendeten Material und dem Widerstand bei einer Temperatur von 0 °C ab. Für die Auslese dieser analogen Sensoren wird eine konstante Spannung angelegt, die über einem Pt100 abfallende Spannung abgegriffen und diese auf einen Operationsverstärker gegeben. Das verstärkte Signal kann mit einem ADC ausgelesen und in einen Widerstands- beziehungsweise Temperaturwert umgerechnet werden.

³⁶LabVIEW - graphische Entwicklungsumgebung zur Experimentsteuerung und -überwachung der Firma NATIONAL INSTRUMENTS [108]

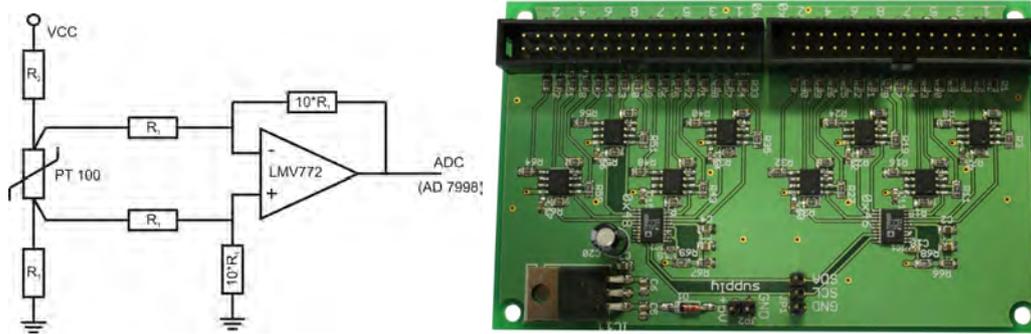


Abbildung 4.3: Auslese der Pt100-Sensoren: Die über einem Pt100 abfallende Spannung wird verstärkt und mit einem ADC in ein digitales Signal umgewandelt. 16 dieser Auslesekanäle (links) sind auf der fertig bestückten Platine (rechts) untergebracht.

Für die GEM-TPC wurde eine Platine entworfen, auf der 16 der in Abbildung 4.3 skizzierten Auslesekanäle mit sogenannter Vierleitermessung für die Pt100-Tempersensoren untergebracht sind. Über zwei Leitungen fließt ein bekannter elektrischer Strom durch den Widerstand, die anderen beiden Leitungen greifen die am Widerstand abfallende Spannung ab. Durch diese Schaltung wird eine Verfälschung der Messwerte durch Leitungs- und Anschlusswiderstände vermieden, welche bei den vorhandenen Leitungslängen von mehreren Metern zwangsläufig auftreten. Die Auslese der verwendeten 12-Bit ADCs des Typs AD7998 erfolgt über I²C, einem seriellen Zweidrahtbus mit einer Takt- (SCL) und einer Datenleitung (SDA), mittels eines Ethernet-I²C-Adapters.

Da die Verstärkung des verwendeten Operationsverstärkers LMV 772 durch die verbauten Widerstände eingestellt wird und diese nur innerhalb einer gewissen Toleranz denselben Wert aufweisen, ist eine Kalibrationsmessung mit bekannten Widerständen für jeden einzelnen Kanal notwendig. Aus den ADC-Werten x lassen sich die Widerstandswerte der Sensoren R über die Beziehung $R = m \cdot x + b$ mit den in Anhang B für die beiden hergestellten Ausleseplatinen tabellarisch dargestellten Werten für die Eichgeraden bestimmen. Die Umrechnung in Temperaturwerte T ist in DIN EN 60571 festgelegt und in Abbildung 4.4 graphisch dargestellt. Sie entspricht für den Bereich von 0 °C bis 850 °C einem Polynom 2. Grades:

$$R = R_0 \cdot (1 + a \cdot T + b \cdot T^2) \quad \Leftrightarrow \quad T = \frac{a - \sqrt{a^2 + 4b \cdot \left(1 - \frac{R}{R_0}\right)}}{2b}$$

mit $a = 3,908\,02 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, $b = 5,801\,95 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}^2$ und $R_0 = 100 \Omega$. Die erreichte Genauigkeit der Messung liegt bei 0,2 °C und wird im Wesentlichen von der Auflösung des ADCs bestimmt.

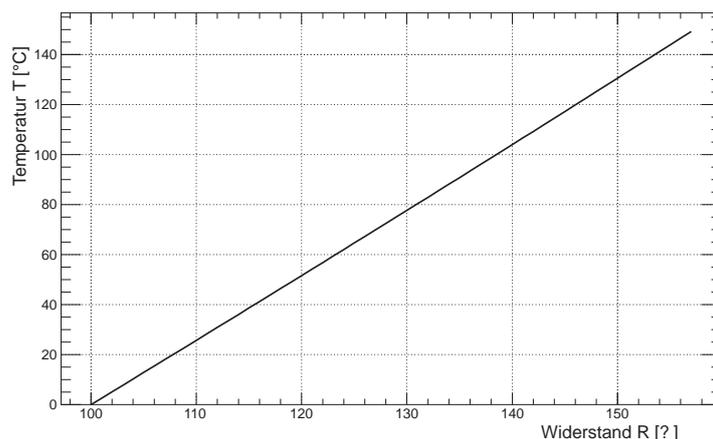


Abbildung 4.4: Umrechnung der gemessenen Widerstandswerte der Pt100-Sensoren in Temperaturen für den Bereich von 0 °C bis 145 °C.

b) Kühlsystem

Die Temperatur der Front-End- und ADC-Karten wird mit einem **HUBER** Unichiller UC080T-H mit einer Kühlleistung von ≈ 8 kW geregelt (Abbildung 4.5, [109]). Die als Kühlflüssigkeit verwendete Mischung aus Wasser und Glysantin G48³⁷ gelangt über einen geschlossenen Kreislauf zu den mit Kupfer-Kühlkörpern auf der Elektronik verbundenen Wärmetauschern (siehe Abbildung 4.6 [70]), wo ein Pt100-Sensor das Erreichen des eingestellten Sollwerts überwacht. Der Soll- und der Ist-Wert dieser Temperaturmessung sowie die interne Temperatur und der Status des Geräts lassen sich über eine RS-232-Schnittstelle einstellen beziehungsweise abfragen. Weitere Einstellungen können über eine Steuereinheit mit Display am Gerät selber vorgenommen werden.



Abbildung 4.5: HUBER Unichiller UC080T-H.

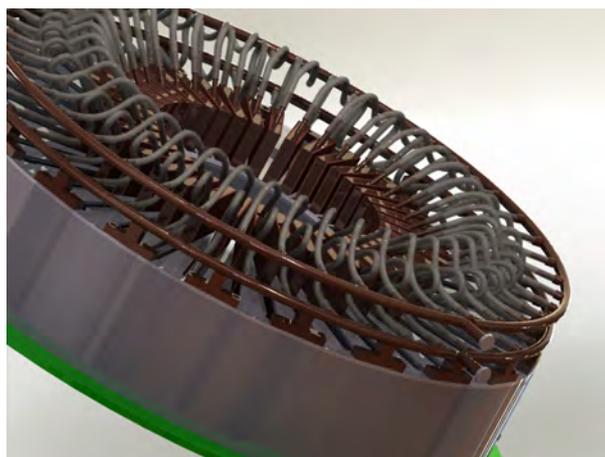


Abbildung 4.6: Zeichnung des vollständigen Kühlrings (braun) für die Front-End-Karten [70].

³⁷Glysantin - Markenname einer Kühlflüssigkeit mit Monoethylenglykol als Hauptbestandteil

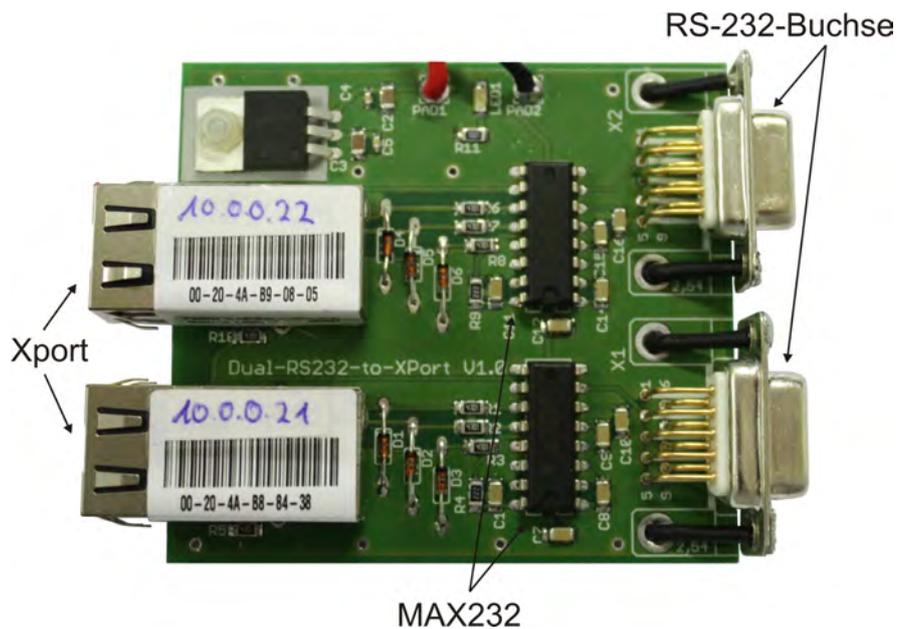


Abbildung 4.7: Dual-XPort-Platine zur Kommunikation mit zwei RS-232-Schnittstellen, zwei MAX232 zur Pegelanpassung, zwei XPorts sowie die notwendige Stromversorgung.

RS-232 ist ein weit verbreiteter Standard für die serielle, digitale Übertragung von Daten. Die Informationen werden durch Pegelwechsel der Signalspannung auf einer ein- (RxD) beziehungsweise ausgehenden (TxD) Leitung in Paketen zu 8 Bit (1 Byte) übertragen - angeführt beziehungsweise abgeschlossen von einem Start- und einem Stopp-Bit. Zur Vermeidung von Datenverlusten kann ein sogenannter Software-Handshake über spezielle Steuerkommandos oder ein Hardware-Handshake über zusätzliche Steuerleitungen die Datenübertragung zwischen Sender und Empfänger regulieren.

Mit einem MAXIM MAX232-Pegelwandler sind die RS-232-Spannungspegel in TTL-Spannungspegel³⁸ umwandelbar und lassen sich mit einem LANTRONIX XPort weiterverarbeiten. Ein XPort besteht aus einer RJ45-Ethernet-Buchse, in die ein Netzwerkservers integriert ist (Abbildung 4.7, [110]). Über einen internen Webserver ist es möglich, verschiedene serielle Einstellungen für die RS-232-Kommunikation wie Baudraten, Hardware- oder Software-Handshake, Start- und Stopp-Bits sowie Ethernet-Einstellungen vorzunehmen.

4.1.3 Gassystem

Für die GEM-TPC wurde ein geschlossenes Gassystem aufgebaut, welches über einen dedizierten Rechner mit einem LabVIEW basierten Programm überwacht und gesteuert wird [111]. In der SlowControl sind bisher lediglich die Werte der Fluss- und Drucksensoren auf dem Media-Flansch verfügbar.

Der Gasfluss am Ein- und Auslass der GEM-TPC wird mit zwei SENSIRION „ASF 1400

³⁸TTL - **T**ransistor-**T**ransistor-**L**ogik



Abbildung 4.8: Gassensoren am Media-Flansch: Massenflussmesser ASF 1400 (links) und Drucksensor MEAS M5100 (rechts).

Bidirectional Mass Flow Meter“ (Abbildung 4.8, [112]) mit einer Genauigkeit von bis zu 5 ml/h bestimmt. Um den maximal messbaren Gasfluss von 24 l/h bei direktem Durchfluss auf bis zu 600 l/h zu erhöhen, sind beide Sensoren in einen Bypass eingebaut. So gelangt nur ein Teil des Gases direkt durch die Sensoren und der tatsächliche Gasfluss kann aus dem ermittelten Durchfluss mit Hilfe einer Vergleichsmessung berechnet werden.

Die eigentliche Bestimmung des Gasflusses findet beim ASF 1400 durch die Messung einer asymmetrischen Wärmeverteilung vor und hinter einem Heizwiderstand auf einer wärmeisolierten Membran statt. Die Temperatur des Gases ist somit ebenfalls als Ausgabewert mit einer Auflösung von 0,1 °C verfügbar.

Die Kommunikation mit den beiden ASF 1400 erfolgt über RS-232 und die neu entwickelte XPort-Platine (Abbildung 4.7). Der Schaltplan ist in Anhang A zu finden.

Die M5100-Drucksensoren von MEASUREMENT SPECIALTIES messen den absoluten Druck am Ein- und Auslass der GEM-TPC bis zu einem Maximalwert von 3,5 bar und wandeln diesen in eine Spannung von 1 - 5 V um [113]. Mit einem AVR-NET-IO, einer Ethernet-Platine mit einem frei programmierbaren ATmega32-Prozessor, einem Netzwerkcontroller, 8 digitalen Ausgängen, 4 digitalen und 4 ADC-Eingängen mit 11-Bit-Auflösung [114], wird die Spannung ausgelesen und digitalisiert. Aus den ADC-Werten lässt sich über

$$U_{\text{gemessen}} = (\text{ADC-Wert} \cdot \frac{10 \text{ V}}{2048}) \quad \text{und}$$

$$P = \frac{U_{\text{gemessen}} - 1 \text{ V}}{\frac{4 \text{ V}}{3,5 \text{ bar}}}$$

der gemessene Druck P berechnen. Die Auflösung der Druckmessung liegt im Bereich von ≈ 50 mbar, vor allem bedingt durch die Genauigkeit der Sensoren von 1% des Maximalwerts. Dies ist ausreichend, um vor gefährlich hohen Drücken in der GEM-TPC zu warnen und eine generelle Tendenz des Druckverlaufs abzubilden. Da jedoch eine Druckänderung von 1% auch eine Änderung der Driftgeschwindigkeit von 1% nach sich zieht (siehe Kapitel 3.5), wäre eine um eine Größenordnung bessere Messgenauigkeit im Bereich von 1 mbar wünschenswert. Für den zweiten Prototypen müssen daher andere Drucksensoren gewählt werden.

4.2 Hardware-Komponenten für die TestBench

4.2.1 Hochspannung

Die Anforderungen an die Hochspannung für den Betrieb der Test-TPC entsprechen im Wesentlichen denjenigen der GEM-TPC, so dass hier ebenfalls ein MPOD-Crate mit **ISEG**-Hochspannungsmodulen eingesetzt wird. Durch die einfache Erweiterbarkeit mit zusätzlichen Modulen können auch die weiteren Detektoren der TestBench über das MPOD-Crate mit Hochspannung versorgt werden: Ein 6 kV-Hochspannungsmodul (**ISEG** EHS-8060n) liefert die Hochspannung für die GEM-Folien, während für die Driftspannung, die planaren GEM-Detektoren und den Betrieb der Photomultiplier ein 8 kV-Modul (**ISEG** EHS-8080n) Verwendung findet. Die Siliziumstreifendetektoren benötigen eine vergleichsweise geringe Spannung von ≈ 70 V, die über ein **ISEG** EHS-8005p zur Verfügung gestellt wird.

4.2.2 Niederspannung



Abbildung 4.9: Für die Versorgung der Ausleseelektronik verwendete Labornetzgeräte: EA-PS 3016-20B (links) und HAMEG 4040 (rechts).

Die Ausleseelektronik der Test-TPC besteht aus einer ADC- und einer sogenannten Transition-Karte³⁹, die jeweils eine Niederspannung von -5 V, $+5$ V und einen Massenanschluss sowie einen Strom von ca. 3 A pro angeschlossener ADC- beziehungsweise Transition-Karte benötigen. Die Spannungen werden mit zwei „EA-PS 3016-20B“-Labornetzgeräten bereitgestellt. Strom und Spannung lassen sich an den Geräten über Regler oder eine 15-polige analoge Schnittstelle in einem Bereich von 0- 16 V beziehungsweise 0- 20 A einstellen. Um diese Schnittstelle zur Abfrage der Spannungen und Ströme sowie zum Einstellen der Soll-Spannung nutzen zu können, wird eine „speicherprogrammierbare Steuerung“ (SPS, siehe 4.2.3) eingesetzt.

Für die baugleiche Ausleseelektronik der GEM- und Siliziumstreifendetektoren wird ein HAMEG HMP4040-Labornetzgerät sowie zwei Verteilerboxen mit Ausgängen für fünf ADC- beziehungsweise Transition-Karten verwendet. Das HMP 4040 verfügt über vier Ausgänge, die bei einer Spannung von 0- 32 V einen Strom von bis zu 10 A liefern können. Zudem können die Spannungsabfälle auf den Versorgungsleitungen über sogenannte Sense-Anschlüsse kompensiert werden. Über ein Display am Gerät können zahlreiche Einstellungen, wie das gleichzeitige Notabschalten von Kanälen bei zu hohen Strömen,

³⁹transition (engl.) - Übergang, Überleitung



Abbildung 4.10: Geöffnete SPS mit Zentralbaugruppe, Eingabebaugruppe zur Strom- und Spannungsmessung, Ausgabebaugruppe und Eingabebaugruppe zur Temperatur- oder Widerstandsmessung (von links nach rechts).

vorgenommen und die Messwerte ausgelesen werden. Mit Hilfe der Skriptsprache SCPI⁴⁰ ist dies auch über die eingebaute Ethernet-Schnittstelle möglich.

Die Trennung der Niederspannungsversorgungen für die ADCs ist notwendig, um mögliche Störungen der Test-TPC durch die anderen Detektoren und deren Auslese zu minimieren.

4.2.3 Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)

Speicherprogrammierbare Steuerungen, kurz SPS, werden vornehmlich in der Automatisierungstechnik und zur Anlagensteuerung eingesetzt und bestehen im Wesentlichen aus digitalen und analogen Eingängen, Ausgängen, einem Betriebssystem und einer Schnittstelle, über die es möglich ist, ein Anwenderprogramm zu laden. Dieses Anwenderprogramm legt fest, welche Werte gemessen und ob und wie die Ausgänge in Abhängigkeit von den Eingängen geschaltet werden sollen.

Die für die SlowControl verwendete **SIEMENS SIMATIC S7-300** setzt sich aus einer Stromversorgungsbaugruppe (PS 307 ; 5A), einer Zentralbaugruppe mit CPU (CPU 315-2PN/DP) und zwei Ein- und einer Ausgabebaugruppe zusammen, die gemeinsam auf einer Profilschiene montiert sind (Abbildung 4.10, [115]). Die Analogeingabebaugruppen verfügen jeweils über acht Eingänge, die sich kanalweise auf die Messung von Spannungen oder Strömen (SM331 ; AI 8x16Bit) beziehungsweise Temperaturen oder Widerständen (SM331 ; AI 8xRTD) programmieren lassen. Mit den vier Kanälen der Ausgabebaugruppe (SM332 ; AO 4x0/4..20mA) ist es möglich, einen Strom zwischen 0 und 20 mA beziehungsweise 4 und 20 mA auszugeben. Die Kommunikation zwischen

⁴⁰SCPI - Standard Commands for Programmable Instruments (engl.) - Standardbefehle für programmierbare (Mess-)Instrumente

der CPU und den einzelnen Baugruppen erfolgt intern über einen MPI⁴¹-Bus. Dieser basiert auf der RS-485-Schnittstelle und arbeitet standardmäßig mit einer Übertragungsrates von 187,5 kBaud. Über das mitgelieferte Programm „STEP 7“ kann die grundlegende Konfiguration der SPS vorgenommen und das Anwenderprogramm auf die CPU-Baugruppe geladen werden. Das Anwenderprogramm ist als Anweisungsliste (AWL) implementiert und legt vor allem die Formate der Mess- und Ausgabewerte fest, da die Speicherung und Weiterverarbeitung der Werte durch die eigentliche SlowControl-Software stattfindet.

Über die analoge Schnittstelle der vier „EA-PS 3016-20B“-Labornetzgeräte wird der IST-Strom als Spannung zwischen 0 und 10 V ausgegeben. In der ersten Eingabebaugruppe sind daher vier Kanäle auf die Messung einer Spannung mit einer Auflösung von 1 mV programmiert. Mit den restlichen vier Kanälen kann ein Strom zwischen 4 und 20 mA und einer Genauigkeit von 1 µA gemessen werden. Die vier Ausgangskanäle sind so programmiert und verschaltet, um mit ihnen die Sollspannungen an den Labornetzgeräten einzustellen.

Die Kanäle der zweiten Eingabebaugruppe sind auf die Messung von Temperaturen mit Pt100-Sensoren programmiert. Von den vier ausgelesenen Sensoren sind zwei auf der Ausleseebene der Test-TPC angebracht, die anderen beiden messen die Temperaturen an den Front-End-Karten und der Ausleseelektronik. Die Genauigkeit der Temperaturmessung liegt bei 0,25 °C.

4.2.4 Gassystem

Für die TestBench wurde ein Gassystem mit zwei Leitungen für die GEM-Detektoren und die Test-TPC konstruiert (Abbildungen 4.11 und 4.12). Das verwendete Driftgas wird vorgemischt in der gewünschten Konzentration von einer gemeinsamen Druckgasflasche für beide Leitungen zur Verfügung gestellt. Zum Spülen der Detektoren während längerer Messpausen ist für beide Leitungen eine Stickstoffflasche vorgesehen.

Beide Leitungen bestehen aus einem Massenflussregler (MKS Mass Flow Controller 1179), einem Drei-Wege-Hahn zur Wahl der Gaszuleitung und einem weiteren Drei-Wege-Hahn, um die Leitung nach einem Wechsel der Gasflasche spülen zu können, ohne dass Verunreinigungen in die Detektoren gelangen. Die Leitung für die Test-TPC enthält zusätzlich noch einen Wasser- und Sauerstoffabsorber (APLHAGAS Purifier), der bei Bedarf zwischengeschaltet werden kann.

Innerhalb der Massenflussregler wird der Gasfluss in einem kleinen Bypass durch die Messung einer asymmetrischen Wärmeverteilung vor und hinter einem Heizwiderstand bestimmt. Die Temperaturdifferenz ΔT ist dabei proportional zur transportierten Wärme $\Delta Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T$, so dass bei bekannter Wärmekapazität c_p des Gases die Masse $m = \rho \cdot V$ und hierüber der Gasfluss berechnet werden können. Die Sensoren wurden mit Stickstoff kalibriert, wodurch für eine fehlerfreie Messung anderer Gase und Gasgemische ein Gaskorrekturfaktor (GCF) erforderlich ist. Dieser wird über

$$GCF = \frac{\rho(\text{Stickstoff}) \cdot c_p(\text{Stickstoff}) \cdot \sum a_i \cdot s_i}{\sum a_i \cdot \rho_i \cdot c_{pi}}$$

⁴¹MPI -Multi-Point Interface (engl.) - mehrpunktfähige Schnittstelle

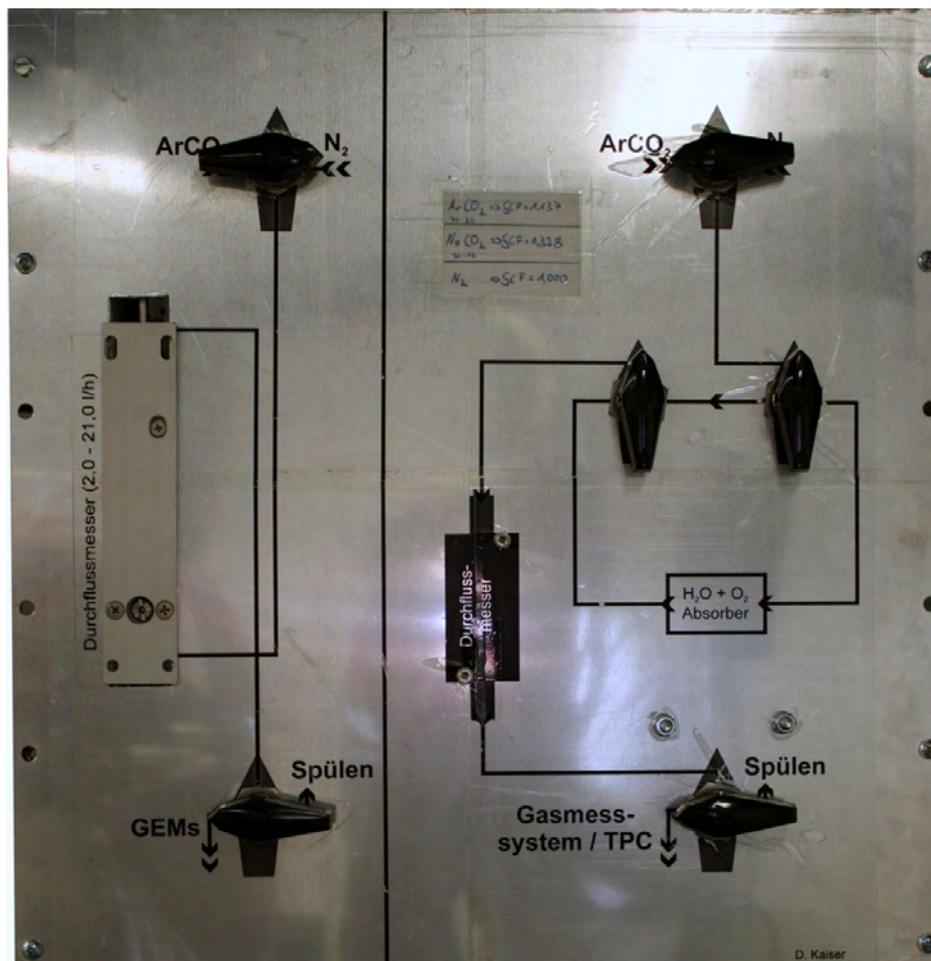


Abbildung 4.12: Gassystem für die GEM-Detektoren (linke Hälfte) und die Test-TPC (rechte Hälfte).

Da zu starke Verunreinigungen der Driftgase mit Wasser oder Sauerstoff zu abweichenden Driftgeschwindigkeiten, Attachement oder Beschädigungen der GEM-Folien führen können, sind alle Rohre (SWAGelok SS83-XKS6MM), Flussregler und Drei-Wege-Hähne aus Edelstahl gefertigt. Lediglich die letzten Meter vor den Detektoren und Abgasleitung bestehen aus PFA-Rohren, um die Detektoren auf der TestBench bewegen zu können. Um eine Messung des Sauerstoff- und Wassergehalts zu ermöglichen, ist die Abgasleitung der Test-TPC an ein Gasmesssystem angeschlossen (Abbildung 4.14). Dieses besteht aus einem Sauerstoffsensoren (TELEDYNE ANALYTICAL INSTRUMENTS Trace Oxygen Analyzer Model 3190, [117]), welcher eine Mikro-Brennstoffzelle als hochempfindlichen Sauerstoffsensoren verwendet und auch Spuren unter 10 ppm nachweisen kann, sowie aus einem Feuchtigkeitssensoren (PANAMETRICS AMX 1+ Transmitter), bei dem die Feuchtigkeit des Gases mittels einer kapazitiven Taupunktmessung ermittelt wird. Eine ausführlichere Beschreibung des Gasmesssystems ist in [118] zu finden. Die Messwerte beider Sensoren werden als Strom von 4- 20 mA ausgegeben und mit Hilfe der ersten Eingabebaugruppe der SPS aufgezeichnet.



Abbildung 4.13: MKS 647b Gasfluss-/Druck-Controller zur Steuerung und Auslese der Gasflussregler.



Abbildung 4.14: Gasmesssystem für die Test-TPC mit Feuchtigkeitssensor (links) und Sauerstoffsensor (rechts).

4.3 SlowControl-Server und Netzwerkinfrastruktur

Alle SlowControl-Komponenten der TestBench beziehungsweise der GEM-TPC sind über einen Ethernet-Switch an den jeweiligen SlowControl-Server angeschlossen und bilden auf diese Weise ein lokales, abgeschlossenes Netzwerk. Die beiden baugleichen Server mit INTEL Xeon 2 GHz QuadCore, 8 GB RAM und CENTOS 5.6 (64bit, kernel 2.6.18-238.9.1.el5) als Betriebssystem erlauben die Einrichtung eines externen und eines internen Netzwerkes, so dass unberechtigte oder unbeabsichtigte Zugriffe auf die SlowControl-Komponenten erschwert werden. Der externe Netzwerkanschluss ermöglicht den Zugriff auf die Server von einem entfernten Rechner aus, beispielsweise über eine SSH⁴²-Verbindung. Die Steuerung und Überwachung der SlowControl-Komponenten ist somit von einem beliebigen Ort aus möglich, solange eine Internet-Anbindung zur Verfügung steht.

Die auf den Servern installierte SlowControl-Software wird im folgenden Kapitel ausführlich beschrieben.

⁴²SSH - Secure SHell - Netzwerkprotokoll beziehungsweise Programm mit dem eine verschlüsselte Netzwerkverbindung mit einem entfernten Gerät hergestellt werden kann

Kein Ding entsteht planlos,
sondern alles aus Sinn und unter
Notwendigkeit.

(Leukipp)

5 SlowControl-Software

Die Struktur der SlowControl-Software für die TestBench und die GEM-TPC ist an die in [119] beschriebene Überwachung des CBELSA/TAPS-Experiments angelehnt. Die zentrale Komponente ist eine Datenbank, in der die auszuführenden Befehle, die ausgelesenen Daten und Einstellungen aller Subdetektoren gespeichert werden. Für die Kommunikation zwischen der Datenbank und der Hardware wurde ein im Hintergrund ablaufendes Programm entwickelt, in Unix oder unixartigen Systemen als „Daemon“ bezeichnet (Abschnitt 5.2). Die Darstellung und Kontrolle der Parameter und Messwerte sowie die Eingabe neuer Parameter erfolgt über eine PHP-Web-Oberfläche (Abschnitt 5.3) oder eine graphische Benutzeroberfläche (Abschnitt 5.4).

Um für die Simulation der Driftgeschwindigkeit und die Analyse der aufgezeichneten Daten einen einfachen Zugriff auf die SlowControl-Werte zu ermöglichen, wurde zudem eine Run-Datenbank angelegt. In dieser sind für jeden einzelnen Run zahlreiche Parameter und Informationen abgespeichert, die sich über eine graphische Benutzeroberfläche abrufen und bearbeiten lassen (Abschnitt 5.5).

5.1 Datenbank

Die abgefragten und eingestellten Parameter der TestBench und der GEM-TPC sollen nicht nur angezeigt werden, sondern auch für eine spätere Kontrolle und die Analyse der Daten zur Verfügung stehen. Daher müssen sie über einen längeren Zeitraum gespeichert werden. Um einen einfachen Zugriff auf die Daten, die Datenintegrität und -sicherheit zu gewährleisten, wird zur Speicherung und Verwaltung der Daten ein Datenbanksystem eingesetzt. Dieses besteht aus der Menge der zu verwaltenden Daten, der eigentlichen Datenbank, und einem Datenbankmanagementsystem, welches die strukturierte Speicherung der Daten organisiert und alle Schreib- und Lesezugriffe auf die Daten sowie die Benutzerverwaltung kontrolliert.

Wie beim CBELSA/TAPS-Experiment ist die SlowControl-Datenbank als relationale Datenbank umgesetzt worden, bei der die Daten in Form von Tabellen abgelegt werden. Die Definition der Datenstrukturen und die Modifikation der Tabellen wird durch die Datenbanksprache SQL⁴³ und PostgreSQL ([120], Version 8.1.23) als Datenbankmanagementsystem realisiert.

PostgreSQL ist eine der fortschrittlichsten und am weitesten verbreiteten Open-Source-Datenbanken. Sie zeichnet sich durch eine geringe Systembelastung und eine hohe Geschwindigkeit aus. Die maximale Datenbankgröße ist nur durch den zur Verfügung ste-

⁴³SQL - Structured Query Language (engl.) - strukturierte Abfragesprache

henden Speicherplatz begrenzt. Mit steigender Datenbankgröße vergrößern sich jedoch die Abfragezeiten, so dass zum Einen die Abfragen optimiert werden müssen und zum Anderen nur die notwendigsten Daten auf Dauer gespeichert werden sollten. Der Zugriff auf die PostgreSQL-Datenbank kann durch verschiedene Programmiersprachen geschehen, beispielsweise durch die von PostgreSQL zur Verfügung gestellte C-Bibliothek *libpq* beim Daemon oder die in PHP⁴⁴ integrierte Schnittstelle bei der Web-Oberfläche. Die in der Datenbank angelegten Tabellen erfüllen verschiedene Aufgaben, die im folgenden aufgeführt werden.

5.1.1 Konfigurationstabellen

Die Konfigurationstabellen stellen Informationen über die vorhandene Hardware und deren Einstellungen für die anderen Software-Komponenten zur Verfügung.

In der Tabelle `HARDWARE` sind alle Geräte erfasst, die mit der SlowControl ausgelesen werden können. Für jedes Gerät werden hier eine Identifikationsnummer (*hardware_nr*), der Zeitpunkt der Installation (*installation_time*), der Name der zugehörigen Datentabelle (*device_queue*), der Name (*description_short*) und eine Beschreibung (*description_long*) gespeichert. Zudem sind hier Referenzen zum Statuscode (*status_code*), zum Fehlercode (*error_code*), zu Informationen über den Typ des Geräts (*device*) und zur Art der Verbindung (*connection*) abgelegt, deren eigentliche Werte sich jeweils in einer eigenen Tabelle befinden. Über den *status_code* („Online“, „Offline“ oder „Unknown“) kann ausgewählt werden, welche Geräte tatsächlich vom Daemon ausgelesen werden sollen.

In der Tabelle `CONFIG` ist unter anderem der Zeitraum festgehalten, der zwischen zwei SlowControl-Events liegen soll. Für jeden dieser Zyklen wird eine Eventnummer generiert und zusammen mit der dazugehörigen Zeit in der `EVENTS`-Tabelle abgespeichert. Die Eventnummer wird an alle neu in die Datenbank eingetragenen Daten angehängt und stellt somit eine komponentenübergreifende Zeitmarkierung für die SlowControl-Werte dar.

Die registrierten Benutzer der Datenbank sind zusammen mit einem verschlüsselten Passwort und den entsprechenden Zugriffsrechten in der Tabelle `USER_DB` abgelegt.

5.1.2 Datentabellen

Für jede Hardware-Komponente existiert eine im Aufbau identische Datentabelle. Die durch den Daemon ausgelesenen Daten werden mit der entsprechenden Eventnummer (*event_nr*), einer bei jeder neu eingetragenen Zeile hochgezählten und für jede Datentabelle einzigartigen Kennnummer (*id_nr*), der Auslesezeit (*last_operation_time*), dem ausgeführten Kommando (*command*), der ausgelesenen Kanalnummer (*param1*, bei der SPS zusätzlich *param2*) und dem eigentlichen Messwert (*param3*) als neue Zeile an die vorhandene Tabelle angefügt.

Zusätzlich beinhalten die Datentabellen für jeden Kanal der entsprechenden Komponente eine kurze Beschreibung als „*alias*“-Name sowie eine Information darüber, ob der Kanal angeschlossen ist („*connected*“).

⁴⁴PHP - PHP Hypertext Preprocessor

Die Tabelle `AKTUELL` stellt unter den Datentabellen eine Ausnahme dar und ist eine Erweiterung gegenüber der `CBELSA/TAPS`-Experimentüberwachung. In ihr werden die Werte aller SlowControl-Komponenten durch Überschreiben der alten Werte abgespeichert, so dass jede Messgröße für jeden Kanal genau einmal in der Tabelle enthalten ist. Die Tabelle `AKTUELL` gibt somit nur den zuletzt ausgelesenen oder gesetzten Zustand aller Hardware-Komponenten wieder. Durch die festgelegte Anzahl an Parametern und Kanälen ändert sich die Größe der Tabelle und somit die Abfragezeit nicht, was hinsichtlich einer Echtzeitüberwachung der TestBench und der GEM-TPC einen entscheidenden Vorteil gegenüber den normalen Datentabellen bringt.

5.1.3 Befehls-Queue-Tabelle

Über die Web-Oberfläche und die graphische Benutzeroberfläche können bestimmte Werte der SlowControl-Komponenten geändert werden. Die hierzu notwendigen Befehle werden in der `QUEUE`-Tabelle abgelegt, welche identisch zu den Datentabellen aufgebaut ist. Sie verfügt jedoch über eine zusätzliche Spalte, in der jedem eingetragenen Befehl eine eindeutige Kennnummer zugeordnet wird (*queue_id*). Die Einträge werden vom Daemon ausgelesen, schrittweise umgesetzt und nach ihrer Ausführung aus der Tabelle gelöscht.

Um die ausgeführten Aktionen zu protokollieren und bei einer fehlerhaften Umsetzung eine mögliche Ursache finden zu können, erfolgt parallel ein Eintrag aller Befehle in die `LOG`-Tabelle.

5.1.4 Fehlertabelle

Erkennt der Daemon anhand ausgelesener Statusmeldungen oder voreingestellter Vergleichswerte einen Fehler in den Daten, wie beispielsweise einen zu niedrigen Gasfluss, so wird eine Fehlermeldung mit der Eventnummer (*event_nr*), einer Kennnummer (*id_nr*), dem Zeitpunkt (*last_operation_time*), der betroffenen Hardware (*device*) dem ausgeführten Kommando (*command*), der Kanalnummer (*param1*), falls vorhanden dem eigentlichen Sollwert (*param2*) und dem Messwert (*param3*) in die Tabelle `ERROR_LIST` eingetragen.

Über ein `PL/PerlU`⁴⁵-Skript ist es möglich, für jeden neuen Eintrag in dieser Tabelle eine automatische Email-Benachrichtigung verschicken zu lassen.

5.1.5 Logbuch

Für die Analyse der Daten ist es notwendig, alle zeitlich zu einer gespeicherten Datendatei (Run) gehörenden Umgebungsparameter zu erfassen. Neben den SlowControl-Werten, die anhand ihrer Zeitmarkierung zugeordnet werden können, sind dies eine Run-Nummer (*run_nr*), die Startzeit des Runs (*start_time*), die Art des Runs (*run_type*)

⁴⁵`PL/PerlU` - **Procedural Language/Perl (Untrusted)** (engl.) - verfahrensorientierte Programmiersprache (ungesichert)

und der verwendete Trigger (*trigger*). Diese Informationen werden vom Benutzer zusammen mit einem Kommentar als zusätzlicher Erklärung (*comment*) in Form eines elektronischen Logbuchs in der Tabelle LOGBOOK abgelegt.

5.2 Daemon

Die Aufgabe des Daemons ist die Kommunikation zwischen Datenbank und SlowControl-Hardware. Dies beinhaltet neben der Abfrage aller Parameter und deren Speicherung in der Datenbank auch das Auslesen der auszuführenden Aktionen aus der Datenbank und deren Weitergabe an die Hardware. Die erforderliche Software muss also über Schnittstellen zu allen Hardware-Komponenten sowie zur PostgreSQL-Datenbank verfügen.

Die Schnittstellen sind als C/C++-Klassen in separaten Header-Dateien implementiert und beinhalten die notwendigen Methoden zur Weitergabe von Befehlen an die Hardware, zum Auslesen und Speichern von Parametern in der Datenbank und zum Herstellen der Verbindungen zur Hardware.

Für die TestBench und die GEM-TPC wurde jeweils ein eigenes Hauptprogramm erstellt (`SlowTPC.cpp`, siehe Anhang D), welches auf dem entsprechenden SlowControl-Server als ein im Hintergrund ablaufendes Programm ausgeführt wird. Beide Hauptprogramme haben zwar im Prinzip die gleiche Struktur, sind im Detail jedoch an die zu überwachende Hardware angepasst.

5.2.1 Initialisierung

Im Initialisierungsteil werden die notwendigen Variablen deklariert, die Instanzen der Schnittstellenklassen erzeugt und die Hardware-Komponenten mit dem Daemon verbunden. Die Instanzen übernehmen dabei alle eingebauten Funktionen der Klassen, die somit im Hauptprogramm zur Verfügung stehen.

Für die Verbindung mit der Hardware liest der Daemon die möglichen Geräte (*device*) und deren Status (*status_code*) aus der Tabelle `HARDWARE` aus. Falls ein Gerät in der Datenbank aktiviert ist und somit ausgelesen werden soll, wird über die `connect`-Funktion der entsprechenden Klasse versucht, eine Verbindung herzustellen. Sollte der Verbindungsversuch nicht erfolgreich sein, wird der Daemon über die Variable `endprogramm` mit einer entsprechenden Fehlermeldung beendet, ohne die Hauptroutine zu durchlaufen.

Für ein MPOD-Crate mit der Instanz `newMPOD` und der Funktion `connectMPOD()` sieht der entsprechende Code-Ausschnitt beispielsweise wie folgt aus:

```

1  if (device==MPOD_NUMMER && status==0) {
2      connected_mpod=newMPOD.connectMPOD();
3      if (connected_mpod==1) {endprogramm=0; printf("MPOD checked.\n");}
4      else { endprogramm=1; printf("SlowTPC not started: Failure starting
          MPOD readout.\n");}
5  }
```

5.2.2 Hauptroutine

Der Großteil des Hauptprogramms wird von der geschachtelten `while`- und `do..while`-Schleife gebildet, die in dem Flussdiagramm in Abbildung 5.1 dargestellt ist. Hier werden die Auslese der Hardware und die Abfrage neuer Aktionen aus der `QUEUE`-Tabelle in regelmäßigen Abständen initiiert und mögliche neue Aktionen ausgeführt. Ein Beenden der äußeren `while`-Schleife und somit des gesamten Daemon durch den Benutzer ist über die Variable `endprogramm` möglich.

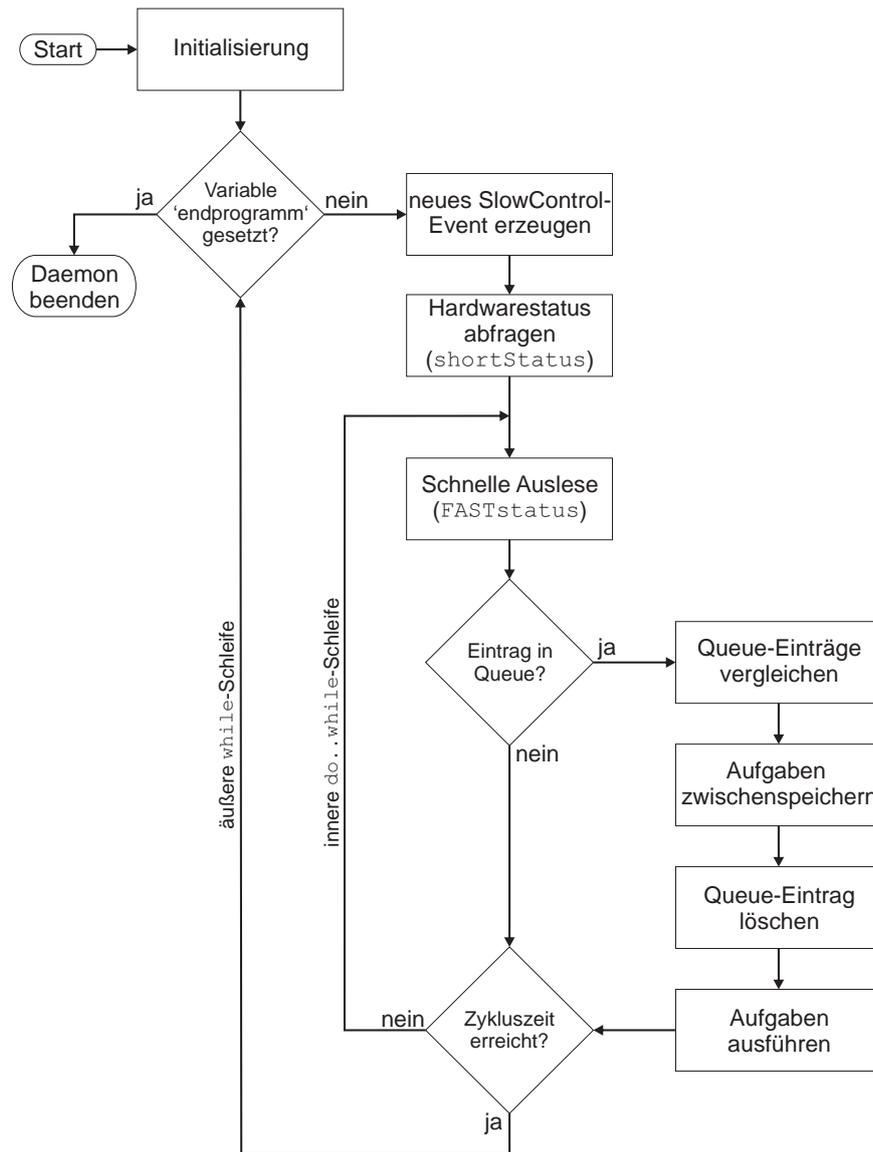


Abbildung 5.1: Flussdiagramm des Hauptprogramms `SlowTPC.cpp`.

Den Anfang der `while`-Schleife bilden mehrere Datenbankzugriffe: Die Tabelle `AKTUELL` wird nach dem Programmstart und danach alle zwei Stunden von ungültig gewordenen Speicherbereichen bereinigt, die Eventnummer hochgezählt und die letzte und somit höchste Eventnummer ausgelesen. Jeder Durchlauf dieser Schleife benötigt die in der

CONFIG-Tabelle eingestellte Zykluszeit und bildet auf diese Weise ein neues SlowControl-Event, bei dem für die verbundenen Hardware-Komponenten die Parameter ausgelesen und in den Datentabellen und der Tabelle AKTUELL gespeichert werden. Während beim ersten Durchlauf über die `completeStatus`-Funktionen der Schnittstellenklassen alle verfügbaren Parameter abgefragt werden, ist dies bei allen weiteren Schleifendurchläufen lediglich für einen eingeschränkten Status (`shortStatus`) der Fall, da sich einige der Parameter nur selten oder gar nicht ändern.

Um einen Überblick über den Zustand der Hardware zu bekommen, ist die Abfrage der Parameter einmal pro SlowControl-Event ausreichend. Für eine Echtzeitüberwachung, insbesondere bei einem noch im Test befindlichen Detektor, sind Zykluszeiten von 10 bis 15 Minuten, wie sie im CBELSA/TAPS-Experiment verwendet werden, jedoch merklich zu lang. Eine Verringerung der Zykluszeiten auf wenige Sekunden würde zwar die Anzahl der aufgezeichneten Parameter deutlich verbessern, dabei aber die Datentabellen in einem solchen Maße anwachsen lassen, dass sich die Zugriffszeiten um ein Vielfaches erhöhen und ein Betrachten der Daten in Echtzeit unmöglich machen würden: Die Abfrage der ausgelesenen Spannungen an der TestBench beispielsweise nimmt bei einer Tabellengröße von mehr als 9 Millionen Zeilen über 2,5 s in Anspruch, während bei lediglich 1000 Zeilen die Zugriffszeit bei wenigen Millisekunden liegt. Die für das Ausführen eines Abfragebefehls benötigte Zeit lässt sich in PostgreSQL über ein Voranstellen von `EXPLAIN ANALYZE` nachprüfen.

In der inneren `do..while`-Schleife werden daher nur die wichtigsten Parameter mit Hilfe der `FASTstatus`-Funktion der jeweiligen Schnittstellenklassen abgefragt. Bei den MPOD-Crates sind dies beispielsweise nur die Spannungs- und Stromwerte sowie der Status der einzelnen Kanäle. Einerseits lässt sich hierdurch die insgesamt zu speichernde Menge an Parametern reduzieren, andererseits wird mit den ausgelesenen Werten vornehmlich die Tabelle AKTUELL aktualisiert. Ein Eintrag in die eigentliche Datentabelle erfolgt nur, falls sich der letzte Messwert signifikant vom vorherigen unterscheidet. Die Größen und darüber die Zugriffszeiten der Datentabellen wachsen so nur langsam an, während die Auslesezeiten der AKTUELL-Tabelle durch ihre feste Größe konstant bei unter 10 ms bleiben.

Um die Gesamtdauer der `FASTstatus`-Abfragen weiter zu minimieren, werden diese Funktionen als unabhängig voneinander und parallel ablaufende Prozesse, sogenannte Threads⁴⁶, gestartet. Insgesamt lässt sich eine Ausleserate von 1 - 2 Hz erreichen, nur beschränkt von der benötigten Auslesezeit der Hardware-Komponenten und einer Pause, die sich aus der Wartezeit auf noch nicht beendete Threads ergibt.

Die Überprüfung der QUEUE-Tabelle auf neue Einträge findet ebenfalls in der inneren Schleife statt. Die vorhandenen Resultate werden mit den für die verbundene Hardware möglichen Befehlen verglichen. Bei einer Übereinstimmung wird eine Befehls-ID, die zugehörige Kanalnummer und der neue Sollwert in entsprechenden Arrays zwischengespeichert und der QUEUE-Eintrag anschließend mit Hilfe seiner `queue_id` aus der Tabelle gelöscht. Die Weitergabe und Verarbeitung der Befehle erfolgt erst nach Abschluss der QUEUE-Abfrage anhand der Befehls-IDs. Hierdurch lassen sich die Befehle zeitlich enger zusammen liegend ausführen, was beispielsweise beim gleichzeitigen Anschalten mehrerer Hochspannungskanäle von Bedeutung ist.

⁴⁶thread (engl.) - Faser, Strang, Faden

5.2.3 Kommunikation mit der Datenbank

Die Kommunikation des Daemon mit der Datenbank findet über die von PostgreSQL in der Datei `libpq-fe.h` bereitgestellten Funktionen statt. Bevor ein Befehl an die Datenbank gesendet werden kann, muss mit Hilfe der Funktion `PGconn *PQconnectdb(const char *conninfo)` eine TCP/IP⁴⁷-Verbindung zur Datenbank auf dem Server aufgebaut werden. Die übergebene Zeichenkette mit der Verbindungsinformation `conninfo` setzt sich aus dem Datenbank-, Server- und Benutzernamen sowie dem Benutzerpasswort zusammen. Der Rückgabewert der Funktion vom Typ `PGconn` erlaubt den Zugriff auf die erstellte Verbindung.

Abfrage- und Schreibbefehle lassen sich über die Funktion `PGresult *PQexec(PGconn *conn, const char *query)` an die Datenbank senden, wobei die SQL-Kommandos als Zeichenkette `query` übergeben werden. Über Funktionen wie `int PQntuples(const PGresult *res)`, welche die Anzahl ausgelesener Zeilen angibt, oder `char *PQgetvalue(const PGresult *res, int tup_num, int field_num)`, welche den Wert einer bestimmten Zeile (`tup_num`) und Spalte (`field_num`) zurück gibt, kann auf die Ergebnisse einer solchen Abfrage zugegriffen werden, die als Rückgabewert `PGresult` verfügbar sind. Im Folgenden ist beispielhaft der notwendige Code-Ausschnitt zur Abfrage der QUEUE-Tabelle dargestellt:

```

1  conn = PQconnectdb(conninfo);
2  sprintf(query, "SELECT command,param1,param3,queue_id FROM queue ORDER
   BY queue_id");
3  res=PQexec(conn,query);
4  ...
5  PQclear(res);
6  PQfinish(conn);

```

Um Speicherlecks zu vermeiden, muss nach dem Verarbeiten einer Abfrage der vom Rückgabewert belegte Speicherplatz mit `void PQclear(PGresult *res)` freigegeben werden. Die Verbindung zur Datenbank lässt sich mit der Funktion `void PQfinish(PGconn *conn)` schließen.

5.2.4 Schnittstellenklassen

Die implementierten Schnittstellenklassen stellen die Funktionen für die Kommunikation mit den einzelnen Hardware-Komponenten zur Verfügung und unterscheiden sich im Wesentlichen durch die möglichen Befehle zum Auslesen und Setzen von Parametern sowie durch die verwendeten Kommunikationsprotokolle. Die entsprechenden Header-Dateien sind in Anhang D zu finden.

a) Kommunikationsprotokolle

Wie in Kapitel 4 erläutert wurde, erfolgt die Kommunikation mit den verschiedenen Hardware-Komponenten über unterschiedliche Schnittstellen und dementsprechend über verschiedene Protokolle:

⁴⁷TCP/IP - Transmission Control Protocol/Internet Protocol

- Kommunikation über SNMP (MPOD-Crates):
Die MPOD-Crates werden über die in der frei verfügbaren Net-SNMP-Bibliothek zur Verfügung gestellten Funktionen angesteuert. Diese ermöglichen das Senden von SNMP-Befehlen über einen UDP⁴⁸-Socket. UDP ist ein minimales, verbindungsloses Netzwerkprotokoll zur Prozess-zu-Prozess-Übertragung, bei dem die Daten in Paketen, bestehend aus einem Header mit Quell- und Ziel-Port, Länge der Daten und einer Prüfsumme, sowie einer Zeichenkette mit den eigentlichen Daten, gesendet werden. Mit Hilfe des Ziel-Ports werden die Daten dem richtigen Programm auf dem Zielrechner zugeordnet, welcher über den Quell-Port eine mögliche Antwort zurücksenden kann. Mit der übermittelten Prüfsumme kann die Übertragung auf Fehler überprüft werden. Nach dem Erstellen des Sockets muss vor einem Übertragungsbeginn keine neue Verbindung aufgebaut werden, so dass Sender und Empfänger schneller mit dem Datenaustausch beginnen können. Gerade beim Austausch kleinerer Datenmengen bringt dies eine deutliche Zeiterparnis.
Die an der Hardware abzufragenden Parameter und deren Einheit werden durch eine MIB⁴⁹-Datei definiert, in der die relevanten Informationen in Form einer Baumstruktur angelegt sind. W-IE-NE-R stellt für ihre MPOD-Crates die Datei WIENER-CRATE-MIB.txt zur Verfügung [103].
- Kommunikation über RS-232 (Unichiller, HMP4040, Gassysteme, optional beim HPn300):
Für die Kommunikation über RS-232 lässt sich mit Hilfe der `connect`-Funktion aus der Datei `sys/socket.h` eine TCP/IP-Verbindung zu den XPorts aufbauen. Über diesen Socket können mit den Funktionen `int send(SOCKET sock, const char *buffer, int buf_length, int flags)` beziehungsweise `int recv(..)` Zeichenketten an die Hardware gesendet und von dieser empfangen werden. Die Zeichenketten und die hierdurch zur Verfügung stehenden Befehle sind durch die jeweils auszulesende Hardware-Komponente vorgegeben (siehe [107, 109, 112, 116]).
Auch die Übertragung der Daten zum HAMEG Labornetzgerät erfolgt über eine solche TCP/IP-Socket-Verbindung, da sich die vordefinierten SCPI-Befehle ebenfalls mittels der Funktionen `int send(..)` und `int recv(..)` senden und empfangen lassen (siehe [121]).
- Kommunikation über I²C (Pt100-Ausleseplatine):
Mit Hilfe des Ethernet-I²C-Adapters ist es möglich, mit den ADCs auf der Pt100-Ausleseplatine zu kommunizieren. Hierzu wird ein UDP-Socket angelegt, über den die einzelnen Speicherregister auf den ADCs anhand ihrer ADC- und Sub-Adressen ausgelesen werden können. Mit der Funktion `bool I2CWrite(unsigned char adc_address, int num_bytes, unsigned char *data)` muss der angesprochene ADC zuerst dazu veranlasst werden, den Inhalt der adressierten Register als Datenstrom zu versenden. Dieser Datenstrom kann dann mit `bool I2CRead(unsigned char adc_address, int num_bytes, unsigned char* data)` empfangen und ausgewertet werden.

⁴⁸UDP - User Datagram Protocol

⁴⁹MIB - Management Information Base

- Kommunikation über LIBNODAVE (SPS):
LIBNODAVE ist eine frei verfügbare Programmbibliothek, die Funktionen zur Kommunikation mit der CPU einer SIEMENS SIMATIC S7 bereitstellt. Vor dem Erstellen einer Verbindung zur CPU muss ein serielles Interface, ein `daveInterface`, der MPI-Adapter und eine `daveConnection` initialisiert werden. Mit Hilfe der Funktionen `daveReadBytes(int daveConnection *dc, int area, int DB, int start, int len, void *buffer)` und `float daveGetFloat(daveConnection *dc)` können im Anschluss Daten von der SPS über einen Zwischenspeicher ausgelesen oder mit `int daveWriteBytes(daveConnection *dc, int area, int DB, int start, int len, void *buffer)` an die SPS gesendet werden.

b) Funktionen zur Weitergabe von Befehlen an die Hardware

Die Weitergabe von Befehlen an die Hardware erfolgt in zwei Schritten durch eine Auslese- und eine Übermittlungsfunktion. In der Auslesefunktion, in der Regel durch ein vorangestelltes `get...` oder `set...` zu identifizieren, wird aus dem auszuführenden Befehl, der übergebenen Kanalnummer und einem möglichen Sollwert eine Zeichenkette erstellt. Diese Zeichenkette wird mit Hilfe einer Übermittlungsfunktion an die entsprechende Hardware gesendet. Für die meisten Hardware-Komponenten sind die Übermittlungsfunktionen mit `sendCommand(...)` oder `sendRecieveCommand(...)` bezeichnet. Lediglich für die Kommunikation mit den MPOD-Crates sind verschiedene Übermittlungsfunktionen für die einzelnen Datentypen notwendig und beispielsweise als `getFloat(...)` oder `setInt(...)` implementiert.

Die von der Hardware zurückgesendete Antwort wird von der Übermittlungsfunktion an die Auslesefunktion übergeben, von dieser ausgewertet und gegebenenfalls in der Datenbank gespeichert. Als Rückgabewert erhält die Übermittlungsfunktion die Anzahl empfangener beziehungsweise gesendeter Zeichen oder einen Wert von -1 bei einer fehlerhaften Übertragung.

Um zum Beispiel die Sollspannungen eines Kanals am MPOD-Crate auszulesen, wird die Funktion `void getVoltage(int channel)` aus der MPOD-Crate-Klasse aufgerufen:

```

1 void MPOD_new::getVoltage (int channel){
2     float value;
3     char temp[40];
4     int a;
5
6     sprintf(temp, "outputVoltage.%d", channel);
7     a = getFloat(temp, value);
8
9     if ((a!=-1) && WRITE_LOG) logFloat("'GetVoltage'", channel, value);
10    if (WRITE_ERG) printf("ausgelesener Wert (%s)?: %f\n", temp, value);
11 }

```

In der Variablen `temp` wird der entsprechende Befehl (`outputVoltage`) zusammen mit der Kanalnummer (`channel`) als Zeichenkette gespeichert (Zeile 5). Mit der Übermittlungsfunktion `getFloat(temp, value)` wird in Zeile 6 die Zeichenkette an das MPOD-Crate gesendet und der ausgelesene Spannungswert als `value` zurückgegeben. Tritt bei der Auslese kein Fehler auf und ist die Speicherung in der Datenbank über die Konstante `WRITE_LOG` aktiviert, wird der Spannungswert mit `logFloat("GetVoltage", channel,`

value) in der Datenbank abgespeichert (Zeile 9). Zudem können der Befehl und der ausgelesene Werte auf der Konsole ausgegeben werden (Zeile 10).

c) Status-Funktionen

Um beim Start des Daemon den aktuellen Zustand der Hardware-Komponenten zu erhalten, sind die `completeStatus`-Funktionen in den einzelnen Schnittstellenklassen implementiert. Hier werden in einer Funktion die Abfragen aller Parameter und für alle verfügbaren Kanäle der jeweiligen Hardware aufgerufen.

In den `shortStatus`-Funktionen hingegen sind nur Abfragen der wichtigsten Parameter zusammengefasst. Hierzu zählen vor allem solche Werte, die regelmäßig ausgelesen werden sollen, wie beispielsweise die Spannungen, Ströme, Statuswerte oder Temperaturen.

d) Funktionen zum Speichern der Parameter in der Datenbank

Für die Speicherung der ausgelesenen Daten in der Datenbank sind in allen Schnittstellenklassen nahezu die gleichen Funktionen implementiert:

```
void logFloat (char command[40], int channel, float value);
void logString (char command[40], int channel, char value[8]);
void logInt (char command[40], int channel, int value);
void logChange (char command[40], int channel);
void logCommand (char command[40]);
void logError (char command[40], int channel, char value[8], int
    send_mail);
```

Jede dieser Funktionen öffnet über `PQconnectdb` eine Verbindung zur Datenbank, speichert den übergebenen Befehl (`command`), die Kanalnummer (`channel`) und den Wert (`value`) in der passenden Datentabelle sowie in der Tabelle `AKTUELL` und schließt die Verbindung wieder, wie hier für die Funktion `logFloat` der `MPOD-Crate`-Klasse exemplarisch gezeigt:

```
1 void MPOD_new::logFloat (char command[40], int channel, float value){
2     char query[500];
3     int error=12;
4
5     memset(query,0,sizeof(query));
6     PGconn * conn;
7     conn=sql_connect();
8
9     sprintf(query,"INSERT INTO %s VALUES ((SELECT max(event) FROM events),
10             nextval('%s'),NULL,NOW(),%s,%d,NULL,%f)", TABLE_MPOD,SEQ_MPOD,
11             command,channel,value);
12     WriteSQL(conn,query,&error);
13
14     bzero(query,500);
15     sprintf(query,"UPDATE aktuell SET param3=%f, last_operation_time=NOW()
16             , event_nr=(SELECT max(event) FROM events) WHERE device='%s' AND
17             command=%s AND param1=%d",value,TABLE_MPOD,command,channel);
18     WriteSQL(conn,query,&error);
19 }
```

```

16  sql_disconnect(conn);
17 }

```

Über die Funktion `logError` können Einträge in der Tabelle `ERROR_LIST` angelegt und mit dem Übergabewert `send_mail` das Versenden einer Email mit der passenden Fehlermeldung ausgelöst werden.

e) FAST-Funktionen

Für eine schnelle Auslese sind in allen Klassen mehrere FAST-Funktionen implementiert. Im Gegensatz zu den normalen Auslesefunktionen werden hier die aktuellen Daten (`value`) mit den zuvor ausgelesenen Werten (`OLDgetVoltage[i]`) verglichen, wie anhand der `FASTgetVoltage`-Funktion für die schnelle Auslese der MPOD-Crate-Spannungen gezeigt ist:

```

1 void MPOD_new::FASTgetVoltage (int channel, int i){
2     int changed = 0, a;
3     float value;
4     char temp[40];
5
6     sprintf(temp, "outputVoltage.%d", channel);
7     a = getFloat(temp, value);
8
9     if (OLDgetVoltage[i] != (int) roundf(value*100)) { changed = 1; }
10    if (a!=-1) OLDgetVoltage[i] = (int) roundf(value*100);
11
12    if ((a!=-1) && WRITE_LOG) FASTlogFloat("'GetVoltage'", channel, value,
13        changed);
14    if (WRITE_ERG) printf("ausgelesener Wert (%s)? : %f\n", temp, value);
15 }

```

Stimmen die Werte im Rahmen der festgelegten Genauigkeit überein, wird der neue Wert über die `FASTlog...`-Funktionen lediglich in der Tabelle `AKTUELL` gespeichert. Die Genauigkeiten für die Spannungen und Ströme am MPOD-Crate sind beispielsweise auf 10 mV und 1 nA definiert. Nur bei einer Abweichung wird der Wert zusätzlich in der zugehörigen Datentabelle abgelegt und somit dauerhaft gespeichert. Neben einer Zeitersparnis beim Schreiben durch weniger Datenbankzugriffe führt dies vor allem zu einer langsamer anwachsenden Tabellengröße und hierdurch zu langsamer ansteigenden Zugriffszeiten.

5.3 Web-Oberfläche

Für die Darstellung der SlowControl-Daten und die Eingabe neuer Parameter kann wie beim CBELSA/TAPS-Experiment eine Web-Oberfläche verwendet werden. Die SlowControl-Webseiten sind auf den jeweiligen Servern abgelegt und plattformunabhängig über einen Webbrowser unter [122] beziehungsweise [123] zu erreichen.

Die zur Umsetzung verwendete Open-Source-Skriptsprache PHP zeichnet sich durch eine umfangreiche Datenbankunterstützung und die Möglichkeit zur Gestaltung dynamischer Webseiten aus, bei der der Quelltext auf dem Webserver interpretiert und lediglich

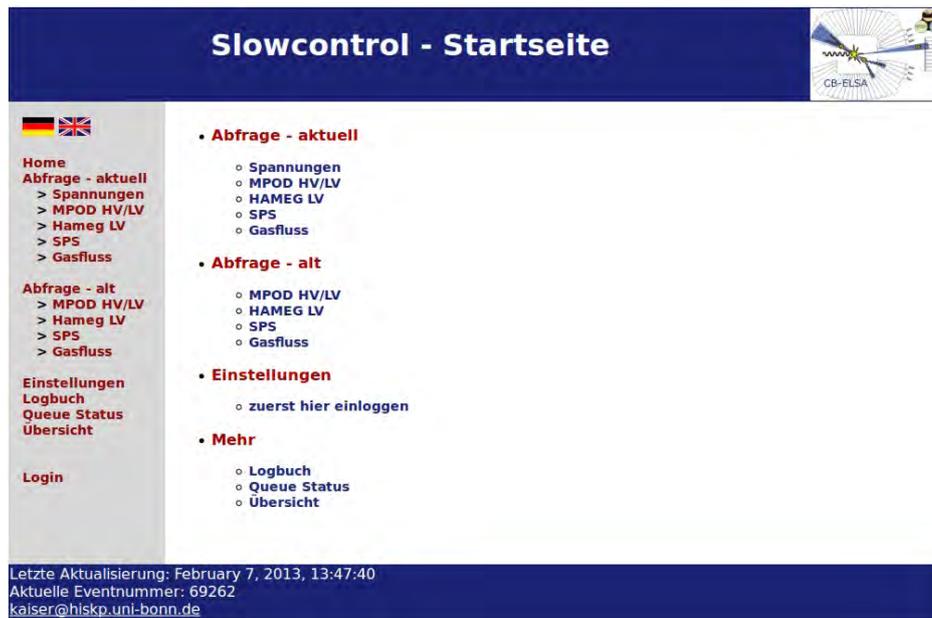


Abbildung 5.2: Die Startseite der SlowControl-Web-Oberfläche für die TestBench.

die Ausgabe dieses PHP-Interpreters an den Browser geschickt wird. Die Darstellung der Messwerte in Form von Graphen lässt sich mit JpGraph, einer PHP-Bibliothek zur Erstellung von Diagrammen, realisieren.

Auf der in Abbildung 5.2 gezeigten Startseite der Web-Oberfläche für die TestBench befinden sich die Links zu den Abfragen der aktuellen und der alten Werte jeder einzelnen Hardware-Komponenten, zum Logbuch, zu den noch auszuführenden Aktionen in der Queue-Tabelle und zu einer allgemeinen Übersichtsseite. Die Seiten zur Änderung von Parametern oder allgemeinen SlowControl-Einstellungen sind nur für registrierte Benutzer nach einem Login zugänglich.

Eine ausführliche Beschreibung aller Unterseiten und Funktionen der Web-Oberfläche ist in Anhang C.1 zu finden.

5.4 Graphische Benutzeroberfläche (SlowControl-GUI)

Während der ersten Tests stellte sich die verwendete PHP-Web-Oberfläche als zu langsam und zu unhandlich für die Steuerung der TPCs heraus. Gerade beim Hoch- und Herunterfahren der Spannungen ist eine Kontrolle der Parameter in Echtzeit notwendig, um schnell auf eventuelle Abweichungen der Messwerte und Störungen reagieren zu können und somit Schäden an den Detektoren vorzubeugen.

Daher wurde zusätzlich zur Web-Oberfläche eine graphische Benutzeroberfläche (GUI) für die SlowControl entwickelt, die alle Messwerte aus der Datenbank liest, übersichtlich und in Echtzeit darstellt und Änderungen an den Parametern in die QUEUE-Tabelle der Datenbank schreibt.

Die SlowControl-Benutzeroberfläche ist in Qt realisiert, einer C++-Klassenbibliothek zur plattformübergreifenden Programmierung graphischer Benutzeroberflächen [124], in

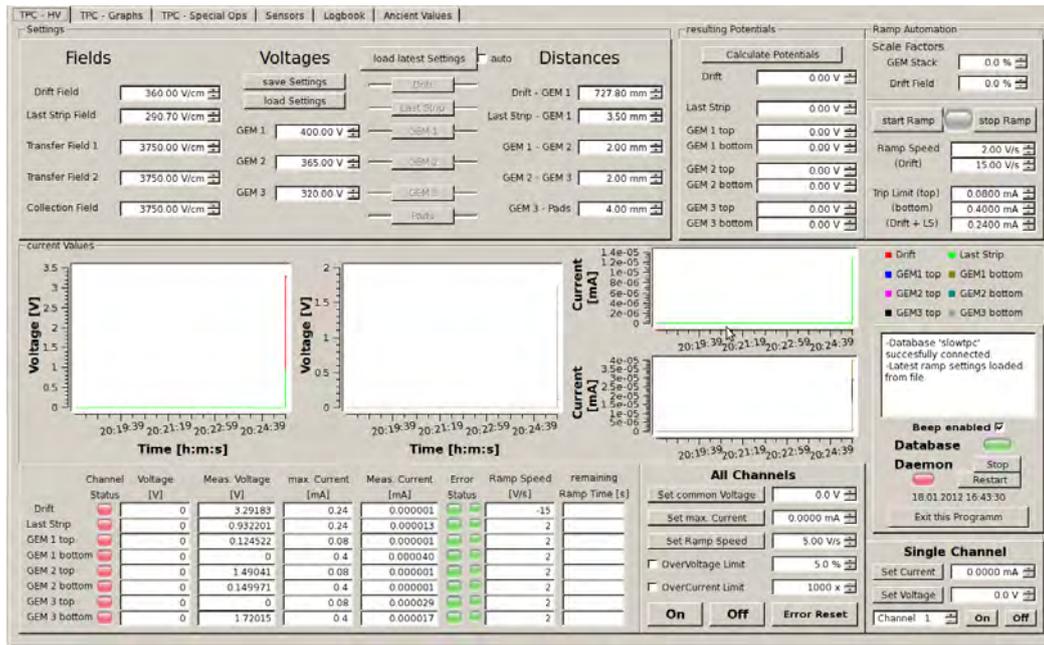


Abbildung 5.3: Registerkarte 'TPC - HV' zur Steuerung und Überwachung der Spannungen, Ströme und Rampgeschwindigkeiten der GEM-TPC.

welcher viele der gewünschten Funktionen wie Datenbankkommunikation, Eingabefelder oder Interaktionen über Schaltflächen bereits integriert sind. Auf den SlowControl-Servern ist die Linux-Variante Qt/X11 in der Version 4.7.2 installiert, welche unter der LGPL⁵⁰ verfügbar ist.

Analog zu den beiden Hauptprogrammen des SlowControl-Daemon (Kapitel 5.2) mussten auch zwei Benutzeroberflächen erstellt und jeweils an die Hardware der GEM-TPC und der TestBench angepasst werden. Um alle Funktionen und Parameter übersichtlich und lesbar darstellen zu können, sind die Benutzeroberflächen in mehrere Registerkarten unterteilt, welche in Anhang C.2 und Anhang C.3 umfassend beschrieben sind. Die SlowControl-GUI für die GEM-TPC besteht aus insgesamt sechs Registerkarten: Die Einstellungen und Werte der TPC sind der Übersichtlichkeit halber auf drei Registerkarten aufgeteilt. Auf der ersten Registerkarte, dargestellt in Abbildung 5.3, lassen sich die einzelnen Spannungen und Ströme an der GEM-TPC berechnen und setzen sowie die gemessenen Werte über Graphen und Textfelder kontrollieren. Zudem besteht die Möglichkeit, die Hochspannungseinstellungen abzuspeichern oder zu laden. Die zweite Registerkarte zeigt für jeden der acht Hochspannungskanäle der TPC die gemessenen Spannungen und Ströme in einem separaten Graphen. Auf der dritten Registerkarte lassen sich die Hochspannungskanäle individuell anpassen. Die ausgelesenen Werte des Unichillers, der Temperatur- und der Gassensoren werden gemeinsam auf einer Registerkarte angezeigt. Der Inhalt des elektronischen Logbuchs kann auf der entsprechenden Registerkarte angezeigt und bearbeitet werden. Auf der letzten Registerkarte lassen sich alle Werte, die von der SlowControl in der Datenbank abgespeichert worden sind, graphisch und tabellarisch darstellen.

⁵⁰LGPL - GNU Lesser General Public License [125]

Die SlowControl-GUI für die TestBench umfasst neben den drei Registerkarten für die Test-TPC und den beiden Registerkarten für das Logbuch und die alten SlowControl-Werte drei weitere Registerkarten. Diese dienen zur Betrachtung und Steuerung der restlichen Hochspannungskanäle, der Niederspannungen sowie der Temperaturen und der Werte des Gassystems.

5.5 Run-Datenbank

Für eine Analyse der Daten, welche mit der GEM-TPC im Inneren des FOPI-Spektrometers aufgenommen wurden, müssen der Analyse-Software mehrere Parameter vorgegeben werden. Neben der Geometrie des Detektors und der Ausleseebene sind dies beispielsweise die Stärke der elektrischen Felder, die Gaszusammensetzung oder die Driftgeschwindigkeit. Da es auch für die Erstellung eines Parametersatzes für die Simulation der Driftgeschwindigkeit sinnvoll ist, die tatsächlichen Messwerte der SlowControl zu verwenden, wurde eine Run-Datenbank angelegt. In dieser sind die benötigten Parameter und weitere Informationen für jeden einzelnen Run gespeichert. Alle Werte lassen sich über eine graphische Benutzeroberfläche eingeben, bearbeiten und als Tabelle oder Graph abrufen.

5.5.1 Datenbank

Die Run-Datenbank ist als zusätzliche Tabelle (`rundb`) innerhalb der SlowControl-Datenbank realisiert.

Zur eindeutigen Identifizierung müssen für jeden der eingetragenen Runs eine Run-Nummer (`run_nr`) und der Name der gespeicherten Datendatei (`filename`) in der Tabelle abgelegt sein. Die Spalte `run_type` gibt Auskunft darüber, ob die Daten im Rahmen einer Strahlzeit (Physics), mit kosmischer Strahlung (Cosmic), zur Kalibrierung der GEM-TPC (Krypton) oder der Elektronik (Pedestal) oder lediglich zu Testzwecken aufgezeichnet wurden. Die Auslese der GEM-TPC kann dabei durch den Teilchenstrahl (Beam), die Szintillationszähler (Barrel) oder zufällig (Random) ausgelöst worden sein, was als Triggereinstellung in der Spalte `trigger` festgehalten ist. Die Einstellungen der ADCs, zu denen beispielsweise die Abtastrate, der Auslesemodus, die Anzahl ausgelesener Samples oder die Position des Zeitfensters gehören, sind ebenfalls relevant für die Analyse der Daten. Die aus der Datenbank für die Ausleseelektronik extrahierten Hexadezimal-Werte sind daher in der Spalte `t2k_setting` abgespeichert. Die Position des Zeitfensters ist zusätzlich als Dezimalzahl in der Spalte `time_window` abgelegt. Aus den Datendateien lassen sich der Zeitstempel des ersten und letzten Ereignisses (`start_time`, `end_time`) und die Anzahl vorhandener Events (`events`) extrahieren, so dass diese in der Run-Datenbank ebenso zusammengetragen werden können, wie die Konzentration der verschiedenen Gase (`gas_n`, `gas_ar`, `gas_ne`, `gas_co2` in %) und die Magnetfeldstärke (`magnet` in T). Aus den Werten der SlowControl lassen sich zudem für jeden einzelnen Run die Skalierungsfaktoren für die Drift- und die GEM-Spannungen (`scale_drift`, `scale_gems` in %) sowie die Mittelwerte der gemessenen Spannungen (`mean_drift`, `mean_laststrip`, `mean_gem1top`, usw. in V), Temperaturen (`mean_temp_gasin`, `mean_temp_1`, `mean_temp_2`, usw. in °C), Drücke (`pressure_in`,

The screenshot shows the RunDB software interface. At the top, there are menu options: RunDB, RunDB Graph, Logbook, Errors, and Ancient Values. Below the menu is a toolbar with various checkboxes for displaying data: show run type, trigger, T2K settings, start+end time, events, gases, magnet, scales, voltages, temperatures, pressures, drift velocity, fields, R, errors, and show R. A 'go to run_nr' button is also present.

The main part of the interface is a table with the following columns: Run nr, Filename, Run Type, Trigger, T2K settings, Time Window, Start Time, Stop Time, Events, and Gas (N) [%]. The table contains multiple rows of data, with the row for Run nr 4101 highlighted in blue.

On the right side, there are several control panels:

- Run Nr: 4101 (clear)
- Filename: runC_4101
- Run Type: Cosmic
- Trigger: Barrel
- T2K settings: E=0x61 0x100F=0x0E
- Time Window: 480
- Start Time: 2011-11-18 03:24
- End Time: 2011-11-18 03:42
- Events: 100000
- Nitrogen: 0.00 %
- TPC Argon: 0.00 %
- Gases Neon: 90.00 %
- CO 2: 10.00 %
- Magnetic Field: 0.60 T
- Scale Factor Drift: 89.90 %
- Scale factor GEMs: 71.60 %
- Buttons: save NEW entry, save changes, save list to file, delete entry
- Calculate Mean Values: voltages, temperatures (all), pressure (all for this run)
- Calculate Scale values: run
- Calculate Drift Velocity: run
- Drift: 26.4538 V
- Last Strip: 2696.68 V
- GEM1 top: 2929.69 V
- GEM1 bottom: 2641.68 V
- GEM2 top: 2104.57 V
- GEM2 bottom: 1841.76 V
- GEM3 top: 1304.83 V
- GEM3 bottom: 1074.23 V
- Buttons: Exit this Programm

Abbildung 5.4: Registerkarte ‘RunDB’ der graphischen Benutzeroberfläche der Run-Datenbank.

$pressure_out$) in bar), die Stärke der elektrischen Felder ($drift_field$, $last_strip_field$, $trans_field_1$, in V/cm) und die Standardabweichung als Fehler dieser Werte ($sigma_drift$, $sigma_laststrip$, usw.) berechnen.

Wie in Kapitel 7.2 erläutert wird, ist es zur Berechnung der Driftgeschwindigkeit notwendig, die Lage der Kanten im Zeitspektrum zu bestimmen. Diese Werte sind ebenso in der Run-Datenbank gesammelt ($edge_pads$, $edge_end$) wie die ermittelten Driftgeschwindigkeiten ($drift_velocity$ in cm/ μ s) sowie die zugehörigen Fehler ($sigma_pads$, $sigma_end$, $sigma_velocity$).

Aus den gemessenen Drift- beziehungsweise Last-Strip-Spannungen sowie den entsprechenden Strömen können über

$$R_{Drift} = \frac{U_{Drift} - U_{LastStrip}}{I_{Drift}}$$

$$R_{LastStrip} = \frac{U_{LastStrip}}{I_{Drift} + I_{LastStrip}}$$

die vom Feldkäfig gebildeten Widerstände berechnet werden (r_drift , r_last_strip in M Ω). Diese sind zwar für eine Analyse der Daten nicht notwendig, können aber auf eine eventuelle Beschädigung des Detektors hinweisen.

Eine Erweiterung der Run-Datenbank um beispielsweise die Verstärkungsfaktoren der GEM-Folien aus der Kryptoneichung ist leicht möglich und wird in nächster Zeit erfolgen.

5.5.2 Graphische Benutzeroberfläche

Für die Run-Datenbank wurde ebenfalls eine graphische Benutzeroberfläche entwickelt, welche technisch auf der SlowControl-GUI basiert und in fünf Registerkarten unterteilt ist. Auf der ersten Registerkarte sind die in der Run-Datenbank gespeicherten Werte als Tabelle (siehe Abbildung 5.4) dargestellt. Über Schaltflächen lassen sich die Mittelwerte der benötigten SlowControl-Parameter für die einzelnen Runs bilden, auf die eingestellten Skalierungsfaktoren und elektrischen Felder zurückrechnen oder die Driftgeschwindigkeiten berechnen. Auf der zweiten Registerkarte können die gespeicherten Werte in einem Graphen angezeigt und miteinander verglichen werden. Die weiteren Registerkarten zeigen den Inhalt des Logbuchs, die Hardware-Fehler aus der Datenbanktabelle `error_list` und die alten SlowControl-Werte. Alle Funktionen der Benutzeroberfläche sind in Anhang C.4 erläutert.

Ein Programm das nicht
getestet wurde, arbeitet nicht.

(Bjarne Stroustrup)

6 Leistungsfähigkeit der SlowControl

Sowohl die GEM-TPC als auch die Detektoren auf der TestBench wurden mit der im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten SlowControl bei mehreren Strahlzeiten und Testmessungen über einen längeren Zeitraum betrieben. Insbesondere die Echtzeitüberwachung der Spannungen und Ströme leisteten dabei zusammen mit der einfachen Bedienbarkeit und Fehlersicherheit der SlowControl-GUI einen wichtigen Beitrag zum stabilen und sicheren Betrieb der Detektoren.

Für alle SlowControl-Komponenten ist es möglich, die wichtigsten Parameter und Statuswerte mit einer Rate von 1 - 2 Hz auszulesen und mit der SlowControl-GUI in Echtzeit darzustellen. Mit einer vergleichbaren, LabVIEW-basierten Benutzeroberfläche für die GEM-TPC konnten bei zu Vergleichszwecken durchgeführten Tests weder diese maximale Ausleserate noch die gute Bedienbarkeit der SlowControl-GUI erreicht werden. Inzwischen ist die SlowControl-Software mit den notwendigen Modifikationen daher auch bei den Testmessungen für die Umrüstung der ALICE-TPC auf eine Verstärkung mit GEM-Folien [126, 127] sowie bei Messungen mit einer kleinen Driftkammer mit einem GEM-Stack aus vier GEM-Folien an der Universität Frankfurt [128] erfolgreich im Einsatz.

Die wichtigsten, von der SlowControl überwachten Parameter sind in Tabelle 6.1 mit ihrer maximal möglichen Messgenauigkeit und deren Stabilität aufgelistet. Während des normalen Betriebs werden lediglich die Werte der Hochspannungsmodule mit der maximalen Rate ausgelesen. Bei den weiteren Sensoren ist diese Echtzeitüberwachung nicht notwendig, so dass in der Tabelle zusätzlich die tatsächliche Häufigkeit angegeben ist, mit der die Parameter während des normalen Betriebs abgefragt werden.

Neben einem stabilen Betrieb der Detektoren ist die erreichte Stabilität der Hochspannungen, Temperaturen und Drücke sowie deren Genauigkeit auch für die Simulation der Driftgeschwindigkeiten von großer Bedeutung. Hierüber lässt sich, wie in Kapitel 3.5 ausgeführt wird, eine Aussage über die Abweichung der Simulationsergebnisse von der tatsächlichen Driftgeschwindigkeit und deren Verwendbarkeit treffen.

6.1 Hochspannung

Für die Spannungen konnten Messgenauigkeiten von 12 mV mit den Modulen in den beiden MPOD-Crates beziehungsweise 150 mV mit dem 30 kV-Modul für die Driftspannung an der GEM-TPC erreicht werden. Diese Werte liegen deutlich unter den vom Hersteller spezifizierten Werten. Selbiges gilt auch für die Langzeitstabilität, bei der mit 50 mV

Gerät	Parameter	Messbereich	Messgenauigkeit	Langzeitstabilität	Auslese
Module im MPOD-Crate	Spannung	0- 6/8 kV	12 mV	50 mV	alle 1 s
	Strom	0- 1 mA	2 nA	30 nA	alle 1 s
HPn 300	Spannung	0- 30 kV	150 mV	1,5 V	alle 1 s
	Strom	0- 10 mA	20 nA	200 nA	alle 1 s
Unichiller	Temperatur	0- 150 °C	0,1 °C	0,2 °C	alle 20 s
ASF 1400	Gasfluss	0- 30 l/h	25 ml/h	100 ml/h	alle 20 s
	Temperatur	0- 70 °C	0,5 °C	1 °C	alle 20 s
M5100	Druck	0- 3,5 bar	50 mbar	50 mbar	alle 20 s
I ² C Sensoren	Temperatur	0- 250 °C	0,2 °C	1 °C	alle 10 s
MKS 647b	Gasfluss	0- 24 l/h	10 ml/h	20 ml/h	alle 20 s
SPS	Spannung	-10- 10 V	3 mV	13 mV	alle 20 s
	Strom	4- 20 mA	1 µA	15 µA	alle 20 s
	Temperatur	-50- 150 °C	0,1 °C	1 °C	alle 20 s
Hameg 4040	Spannung	0- 32 V	1 mV	1 mV	alle 10 s
	Strom	0- 10 A	100 µA	2 mA	alle 10 s

Tabelle 6.1: Die wichtigsten, von der SlowControl überwachten Parameter mit ihrem Messbereich, Messgenauigkeit, Stabilität und Ausleserate durch den Daemon. Die Stabilität hängt dabei - insbesondere bei den Temperaturen - von den äußeren Bedingungen ab.

(MPOD-Crates) und 1,5 V (30 kV-Modul) um einen Faktor zwei bessere Werte gegenüber der erwarteten Stabilität von 100 mV beziehungsweise 3 V erreicht wurden. Dies ist in Abbildung 6.1 exemplarisch anhand der gemessenen Spannungen an der Driftkathode (links) und der Oberseite der ersten GEM-Folie (rechts) über einen Zeitraum von vier Tagen während einer Strahlzeit im Juni 2011 dargestellt.

Mit der Messgenauigkeit des 30 kV-Moduls ergibt sich eine Unsicherheit im Driftfeld von 0,002 V/cm über die gesamte Länge der GEM-TPC, was einer sehr geringen Änderung der Driftgeschwindigkeit in ArCO₂ (90:10) von maximal 0,0007 % entspricht. In NeCO₂ (90:10) beträgt der Fehler maximal 0,0006 %. Auch bei Berücksichtigung der Stabilität von 1,5 V ist die Unsicherheit mit maximal 0,007 % (in ArCO₂ (90:10)) beziehungsweise 0,006 % (in NeCO₂ (90:10)) so gering, dass die simulierten Driftgeschwindigkeiten bei bekannten Spannungen den tatsächlichen Werten entsprechen.

Die Driftspannung der Test-TPC wird über ein Modul im MPOD-Crate zur Verfügung gestellt, so dass sich auch hier vernachlässigbar kleine Abweichungen von der simulierten Driftgeschwindigkeit von maximal 0,004 % ergeben.

6.2 Temperatur

Die Temperaturen auf der Ausleseebene der GEM-TPC wurden mit der erwarteten Genauigkeit von 0,2 °C gemessen, während die Gasflusssensoren am Media-Flansch jedoch statt der vorgegebenen Auflösung von 0,1 °C lediglich Werte mit einer Genauigkeit von 0,5 °C lieferten. Mit Hilfe der Sensoren an der Test-TPC wurde mit 0,15 °C eine bessere

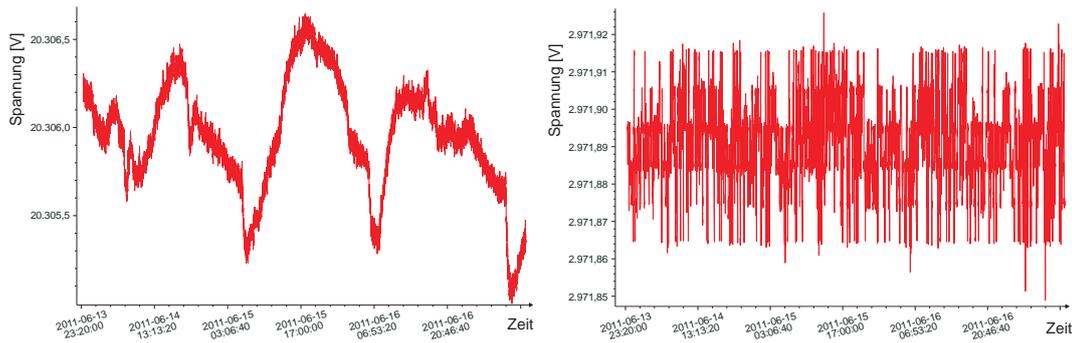


Abbildung 6.1: Langzeitstabilität der gemessenen Spannung an der Driftkathode (links) und der Oberseite der ersten GEM-Folie (rechts) über einen Zeitraum von vier Tagen.

Genauigkeit erreicht, als anhand der Spezifikationen erwartet werden konnte.

Für die Langzeitstabilität der Temperatur lässt sich kein einheitlicher Wert angeben, da diese in hohem Maße von den Bedingungen außerhalb der Zeitprojektionskammern abhängt, wie Abbildung 6.2 für einen Temperatursensor auf der Ausleseebene der GEM-TPC zeigt. Während bei der Strahlzeit im Juni 2011 (links) beispielsweise die Temperatur auf unter 1°C , für die Dauer der einzelnen Runs sogar auf unter $0,4^\circ\text{C}$, stabil war, stieg die Temperatur bei den Messungen im November 2011 (rechts) wegen eines Defekts am Unichiller von anfangs $22,5^\circ\text{C}$ bis auf 33°C an. Die Temperaturstabilität während der Runs konnte jedoch auch hier bei unter $0,4^\circ\text{C}$ gehalten werden, für die sich eine Änderung in der Driftgeschwindigkeit von unter $0,15\%$ ergibt. Bei der Test-TPC liegen die Temperaturstabilität und die hiermit verbundene Ungenauigkeit bei der Driftgeschwindigkeit in der gleichen Größenordnung.

6.3 Druck

Mit den beiden Drucksensoren am Gaseinlass und am Gasauslass der GEM-TPC lässt sich lediglich eine Auflösung von 50 mbar erreichen. Die gute Langzeitstabilität beider

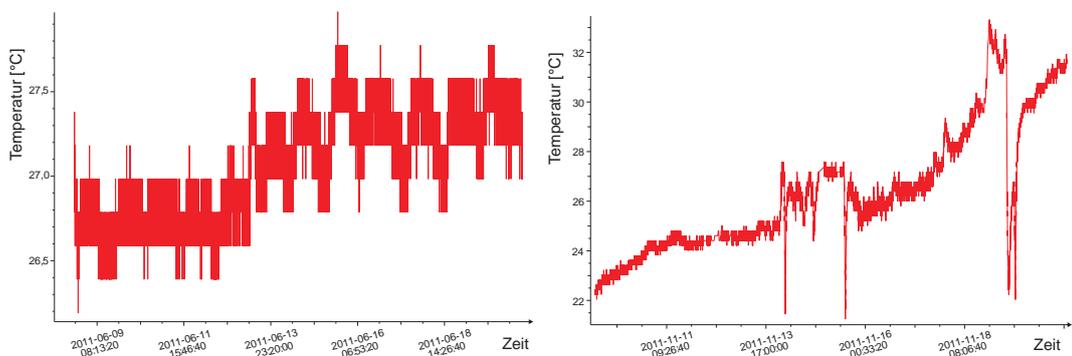


Abbildung 6.2: Gemessene Temperatur auf der Ausleseebene der GEM-TPC mit Kühlung im Juni 2011 (links) und ohne Kühlung im November 2011 (rechts).

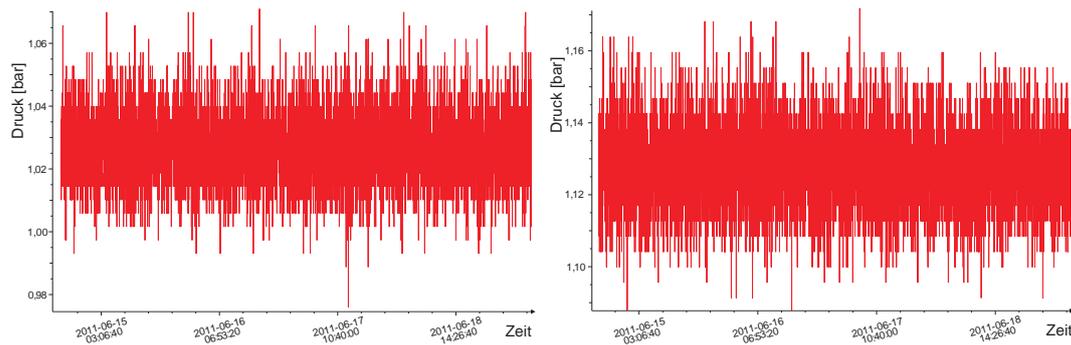


Abbildung 6.3: Gemessener Druck am Gaseinlass (links) und am Gasauslass (rechts) der GEM-TPC im Juni 2011.

Sensoren wird dementsprechend stark von der Messgenauigkeit überlagert, wie Abbildung 6.3 veranschaulicht. Für eine Druckänderung in dieser Größenordnung liegt die Änderung der Driftgeschwindigkeit jedoch bei über 5%, so dass die simulierten Werte nur bedingt für die Rekonstruktion der z -Komponente verwendet werden können. Am Gasauslass wird zudem ein um 100 mbar höherer Druck gemessen, der durch Staudruck am Auslass oder einen systematischen Versatz bei der Spannungsausgabe des Sensors zustande kommen kann und in einer weiteren Unsicherheit für die simulierte Driftgeschwindigkeit resultiert.

Durch den fehlenden Drucksensor an der Test-TPC kann hier keine verlässliche Aussage getroffen werden. Um den Fehler der Simulationsergebnisse dennoch abschätzen zu können, wird ein Fehler in der gleichen Größenordnung wie bei der GEM-TPC angenommen.

6.4 Konzentration der Driftgase

Die Konzentration der Gase in den beiden Zeitprojektionskammern ist ebenfalls ein relevanter Parameter für die Simulation der Driftgeschwindigkeiten. Sie kann jedoch noch nicht mit der SlowControl überwacht werden, wie in den Abschnitten 4.1.3 und 4.2.4 erläutert wurde. Die Konzentrationsschwankungen in den vorgemischten Gasen lagen nach Herstellerangaben bei maximal $\pm 0,1\%$, was einer Änderung der Driftgeschwindigkeit von maximal 1,5% entspricht. Für die GEM-TPC wurde ArCO_2 mit dem geschlossenen Gassystem gemischt und bereitgestellt und die Zusammensetzung mit einem Massenspektrometer stichprobenartig überwacht. Die Genauigkeit der vorhandenen Konzentrationsmessungen lag hier ebenfalls im Bereich von $\pm 0,1\%$ [70].

6.5 Einfluss auf die Verwendbarkeit der Simulationsergebnisse

Aus den Messgenauigkeiten und der Stabilität der für die Simulationen in Kapitel 3.5 betrachteten Parameter ist ersichtlich, dass der Gesamtfehler der simulierten Driftgeschwindigkeiten deutlich durch den Fehler der Druckmessung dominiert wird. Auch die

Ungenauigkeiten durch Abweichungen in der Konzentration der Detektorgase tragen erkennbar zum Gesamtfehler bei, welcher für ArCO₂ (90:10) bei einem Driftfeld von 100 % und Standardbedingungen nach Gleichung 3.1 bei

$$\begin{aligned}\Delta v_{\text{drift}} &= \sqrt{0,004^2 + 0,024^2 + 1,625^2 + 0,31^2} \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \\ &= 1,654 \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \quad \left(= 5,77 \% \text{ von } 28,66 \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \right)\end{aligned}$$

liegt. Für NeCO₂ (90:10) bei den gleichen Einstellungen ergibt sich ein Fehler von

$$\begin{aligned}\Delta v_{\text{drift}} &= \sqrt{0,0029^2 + 0,016^2 + 1,225^2 + 0,192^2} \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \\ &= 1,240 \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \quad \left(= 5,21 \% \text{ von } 23,83 \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \right) .\end{aligned}$$

Dabei unterscheiden sich die Werte für die GEM-TPC und die Test-TPC, abgesehen von der fehlenden Druckmessung an der Test-TPC, nur minimal. Durch den großen Fehler der simulierten Werte ergibt sich auch für die rekonstruierte z -Koordinate ein Fehler, der die Größenordnung der gewünschten Ortsauflösung von wenigen mm übersteigt. Für einen ersten Anhaltspunkt und eine erste Rekonstruktion der aufgezeichneten Daten sind die Simulationsergebnisse somit zwar verwendbar, für eine präzisere Rekonstruktion der z -Koordinate ist es jedoch notwendig, die Driftgeschwindigkeit aus den Daten zu bestimmen. Die Bestimmung der Driftgeschwindigkeit aus den Daten wird in Kapitel 7 insbesondere für die Messungen mit der GEM-TPC erläutert.

Das, wobei unsere Berechnungen
versagen, nennen wir Zufall.

(Albert Einstein)

7 Bestimmung der Driftgeschwindigkeit

Wie in Kapitel 6 ausgeführt wurde, ist es für eine möglichst genaue Bestimmung der z -Koordinate notwendig, die tatsächliche Driftgeschwindigkeit der Primärelektronen aus den aufgezeichneten Daten zu extrahieren. Aus den Datendateien wird hierzu ein Zeitspektrum der nachgewiesenen Spurpunkte rekonstruiert (siehe Abschnitt 7.1) und die Zeit bestimmt, welche die Primärelektronen für eine definierte Driftstrecke benötigen. Die Driftstrecke ist im einfachsten Fall durch die maximale Strecke zwischen der Kathodenendkappe und der ersten GEM-Folie der Zeitprojektionskammer gegeben. In diesem Fall sind im Zeitspektrum zwei deutliche Kanten zu erkennen (siehe Abbildung 7.1), aus deren Abstand sich die benötigte Driftzeit berechnen lässt. Diese Methode, wie sie in Abschnitt 7.2.2 genauer beschrieben wird, ist jedoch nur auf einen Teil der mit der GEM-TPC aufgezeichneten Daten anwendbar. Ist beispielsweise das Driftfeld zu niedrig eingestellt oder das Zeitfenster des Triggers nicht optimal gewählt, kann aufgrund der Architektur der verwendeten Ausleseelektronik nur eine oder keine der beiden Kanten im Zeitspektrum identifiziert werden. Diese Schwierigkeit lässt sich für einige Datendateien durch die Wahl einer anderen, definierten Driftstrecke und die Extraktion der passenden Driftzeit umgehen (siehe Abschnitt 7.2.3).

Eine weitere Methode zur Bestimmung der Driftgeschwindigkeit bestünde in der Vermessung definierter Spuren in der Zeitprojektionskammer, deren z -Position durch externe Detektoren eindeutig bestimmt ist. Für die GEM-TPC kann diese Methode jedoch nicht angewendet werden, da die Auflösung der umgebenden FOPI-Detektoren mit 5 cm in z -Richtung deutlich zu groß ist, um verlässliche Werte für die Driftgeschwindigkeit zu erhalten.

Für alle Daten, bei denen nicht auf ein physikalisches Ereignis getriggert wurde, ist hingegen keine dieser Methoden anwendbar. Dies gilt insbesondere für die Daten der Kalibration mit ^{83m}Kr , bei der ein zufälliger Trigger verwendet wurde und daher keine Bestimmung der Driftgeschwindigkeit durchgeführt werden kann.

7.1 Rekonstruktion der Daten

Jedes Pad auf der Ausleseebene erzeugt ein eigenes Signal, welches durch die Front-End-Karten kontinuierlich mit einer einstellbaren Abtastrate SR abgefragt und als sogenanntes *sample*⁵¹ im Analog-Ring-Speicher der T2K/AFTER-Chips zwischengespeichert wird. Ein *sample* hat damit eine durch die Abtastrate SR festgelegte Dauer.

⁵¹sample (engl.) - Beispiel, Muster, Probe

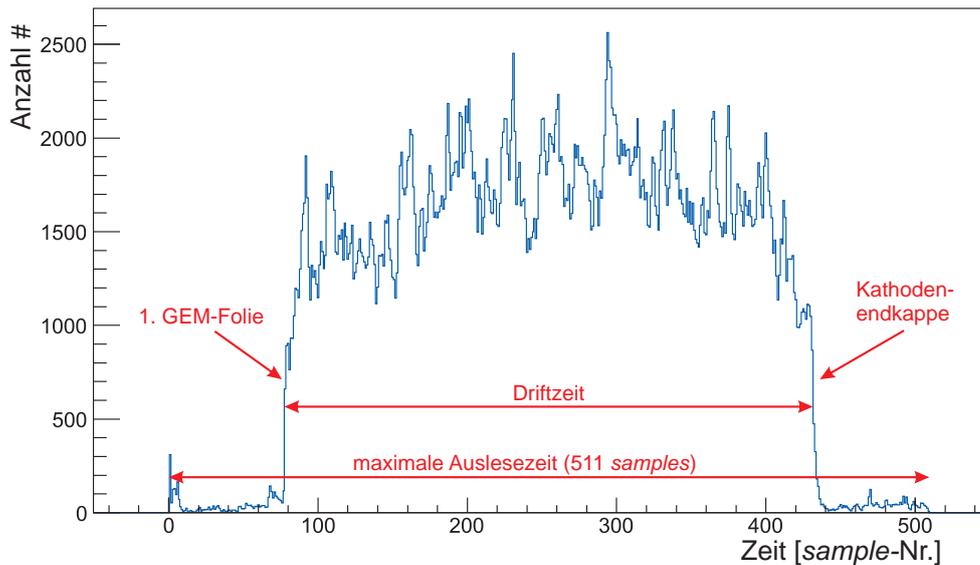


Abbildung 7.1: Bestimmung der Driftgeschwindigkeit aus den Daten: Im einfachsten Fall können die Kathodenendkappe und die erste GEM-Folie als klare Kanten im Zeit-Spektrum identifiziert und aus deren Abstand die Driftzeit bestimmt werden. Die 511 *samples* entsprechen für den dargestellten Run einer maximale Auslesezeit von $32,86 \mu\text{s}$.

Durch die Architektur der verwendeten Analog-Ring-Speicher können pro Kanal jeweils nur 511 zeitlich aufeinander folgende *samples* gespeichert werden, bevor die erste Speicherzelle mit einem neuen Wert überschrieben wird. Hierdurch ergibt sich ein Auslesefenster, welches auf eine zeitliche Länge von $511/SR$ beschränkt ist und sich durch die Angabe einer Verzögerung (siehe Abbildung 7.2) verschieben lässt. Ausgelöst durch ein Triggersignal werden die 511 aktuellen *samples* durch den angeschlossenen ADC digitalisiert und nach Abzug eines festgelegten, als Pedestal⁵² bezeichneten Untergrundes und einer Null-Wert-Unterdrückung in der Datendatei abgespeichert.

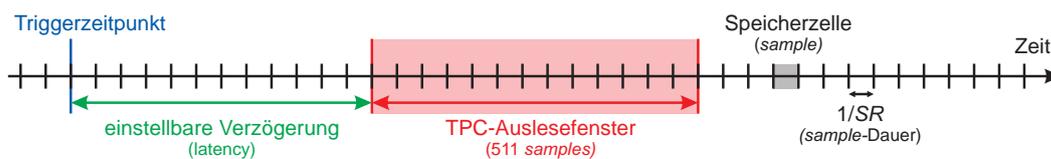


Abbildung 7.2: Die 511 Speicherzellen im Analog-Ring-Speicher werden kontinuierlich mit neuen Daten überschrieben. Ausgelöst durch ein Triggersignal werden die aktuellen *samples* (rote Markierung) durch den ADC ausgelesen und digitalisiert.

Für die Rekonstruktion und Analyse dieser Rohdaten wird das in C++ implementierte Softwarepaket „fopiroot“ verwendet, welches auf dem FairRoot-Paket [129] und dem zugrunde liegenden ROOT-Framework⁵³ [130] basiert. Die als eigenständige Funktionen programmierten Rekonstruktions- und Analyseschritte (Tasks⁵⁴) lassen sich über die

⁵²pedestal (engl.) - Sockel, Standfuß

⁵³framework (engl.) - Rahmenstruktur, Programmiergerüst

⁵⁴task (engl.) - Aufgabe, Funktion

Eingabe von Parametern justieren und bei der Verarbeitung der Daten je nach Bedarf zu- oder abschalten.

In einem ersten Rekonstruktionsschritt werden die einzelnen ADC-*samples* in den Rohdaten mit Hilfe eines PSA⁵⁵-Algorithmus zu sogenannten Pad-Treffern zusammengefasst (**TpcPSATask**), welche die totale, integrierte Signalhöhe, die eindeutige Identifikationsnummer des getroffenen Pads (Pad-ID) und die Position im Auslesefenster als Zeitstempel beinhalten [131]. Anhand der Pad-ID und des Zeitstempels werden die Pad-Treffer anschließend auf ein dreidimensionales Koordinatensystem abgebildet und in kartesischen (x, y, z) sowie Zylinderkoordinaten (R, ϕ, z) gespeichert. Bereits für diesen Schritt ist die Angabe einer Driftgeschwindigkeit notwendig, die für die erste Rekonstruktion der Daten aus einer Simulation stammen muss.

Zeitlich und räumlich zusammenhängende Pad-Treffer werden danach zu Clustern zusammengefasst (**TpcClusterFinderTask**), denen die aufsummierte Amplitude der einzelnen Pad-Treffer, deren gewichteter Schwerpunkt als Position des Clusters im dreidimensionalen Raum und ein kovarianter Ellipsoid als räumliche Ausdehnung zugewiesen wird. Durch die Cluster-Bildung wird die Genauigkeit der Positionsbestimmung verbessert, die Datenmenge weiter reduziert und Untergrundereignisse herausgefiltert.

Im nächsten Rekonstruktionsschritt werden die gefundenen Cluster nach ihrer z -Koordinate, ihrer radialen Position R oder ihrem Winkel ϕ sortiert, über einen Spurfinde-Algorithmus zu kleinen Spurstücken zusammengefasst und auf eine Riemann-Sphäre abgebildet (**TpcRiemannTrackingTask**, [132]). Die Abbildung auf eine Riemann-Sphäre ist vor allem für die Rekonstruktion nicht-linearer Teilchenspuren im Magnetfeld notwendig. Die Spurstücke werden anschließend zu vollständigen Spuren verbunden (**TpcTrackInitTask**), und diese mit Hilfe eines Kalman-Filters aus dem GENFIT-Framework parametrisiert (**TpcKalmanTask**, [133]). Eine ausführlichere Beschreibung der gesamten Spurrekonstruktion findet sich in [70] oder [97].

Als weitere (Analyse-)Schritte können anschließend beispielsweise die Spuren in der GEM-TPC mit denjenigen in den FOPI-Detektoren zusammengeführt, die Residuen der Spuren als Maß für die Ortsauflösung bestimmt, der spezifische Energieverlust extrahiert oder die Bestimmung der Driftgeschwindigkeit durchgeführt werden.

7.2 Bestimmung der Driftgeschwindigkeit aus den Daten

Zur Bestimmung der Driftgeschwindigkeit wird aus den rekonstruierten Daten ein Zeitspektrum für jeden Run erstellt. Hierzu werden die als Zeitstempel gespeicherten Positionen der einzelnen Pad-Treffer im Auslesefenster des ADCs, im Weiteren als *sample*-Nummer bezeichnet, in ein Histogramm eingetragen. Das Auslesefenster entspricht der Größe des Ring-Speichers, so dass im Zeitspektrum nur *sample*-Nummern zwischen 0 und 510 enthalten sein können. Über die Abtastrate ist die Dauer eines *samples* auf $1/SR$ festgelegt. Die Abstände, welche in allen Zeitspektren als Differenz von *sample*-Nummern angegeben werden, lassen sich daher für die Bestimmung der Driftgeschwindigkeit in Zeiten umrechnen.

⁵⁵PSA - Pulse Shape Analysis (engl.) - Pulsformanalyse

7.2.1 Selektion der Einträge

Um nur physikalisch sinnvolle Einträge zu verwenden, lassen sich mit der für die Bestimmung der Driftgeschwindigkeit erstellten Funktion `TpcDriftVelocityTask` mehrere Schnitte auf die Daten anwenden:

- **Cluster-Zugehörigkeit:** Im ersten Schnitt wird die Zugehörigkeit der Pad-Treffer zu einem Cluster gefordert, so dass Untergrund- und Rauschereignisse deutlich reduziert werden.
Für eine noch präzisere Selektion kann zusätzlich die Zugehörigkeit zu einer rekonstruierten Spur verlangt werden.
- **Cluster-Größe und Gesamtamplitude:** Der Cluster wird danach auf eine minimale Größe (`aMinSize`), die der Anzahl enthaltener Pad-Treffer entspricht, und eine minimale Gesamtamplitude (`aMinAmp`) überprüft. Diese beiden Schnitte sind notwendig, da auch einzelne Pad-Treffer oder zufällig benachbarte Untergrundeignisse als Cluster identifiziert werden können.
- **Cluster-Position:** Um sicher zu stellen, dass der Schwerpunkt der Cluster innerhalb des Gasvolumens rekonstruiert wurde, wird auf eine minimal und maximal erlaubte radiale Position R geschnitten (`aMinR`, `aMaxR`). Mit diesem Schnitt lassen sich zudem Cluster herausfiltern, die sehr nah am Feldkäfig entstanden sind und daher nicht eindeutig nachweisbar sind.

Bei der Analyse aller Daten wurden die im Folgenden aufgeführten Werte für die Schnitte verwendet:

Cluster-Eigenschaft	Variable	Wert
Größe	<code>aMinSize</code>	> 2 Pad-Treffer
Gesamtamplitude	<code>aMinAmp</code>	> 50 ADC-Kanäle
radiale Position	<code>aMinR</code>	> 57 mm
	<code>aMaxR</code>	< 148 mm

Der Effekt der durchgeführten Schnitte wird in Abbildung 7.3 exemplarisch für einen Run mit starkem Untergrund dargestellt. Die verwendeten Daten wurden mit der GEM-TPC mit kosmischer Strahlung bei einem Driftfeld von 360 V/cm und ArCO₂ (90:10) als Driftgas aufgenommen. Im Zeitspektrum nach Anwendung aller Schnitte (blau) sind hier deutlich die Kathodenendkappe und die erste GEM-Folie als Kanten zu erkennen, während diese im Zeitspektrum aller einzelnen Pad-Treffer (rot), insbesondere für die erste GEM-Folie, kaum vom Untergrund zu unterscheiden sind.

7.2.2 Bestimmung über die gesamte Länge der GEM-TPC

War das Driftfeld, und somit auch die Driftgeschwindigkeit, hoch genug und die Verzögerung nach dem Triggerzeitpunkt richtig eingestellt, lässt sich im Zeitspektrum sowohl der Anfang (erste GEM-Folie) als auch das Ende der Kammer (Kathodenendkappe) beobachten, wie in Abbildung 7.1 gezeigt ist. Die minimale Driftgeschwindigkeit, bei der dies noch möglich ist, kann aus der maximalen Driftstrecke und der maximal möglichen Auslesezeit bestimmt werden. Für die GEM-TPC liegt dieser Wert bei $v_{\text{drift, minimal}} =$

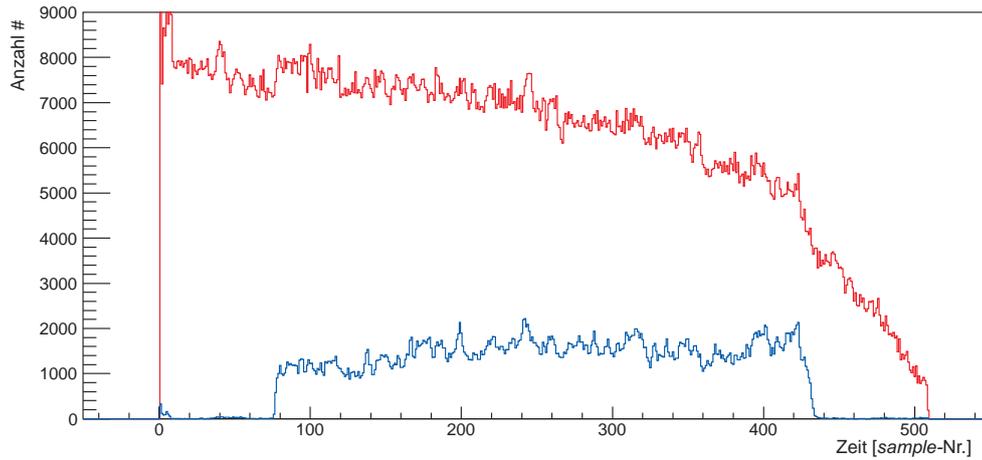


Abbildung 7.3: Zeitspektrum mit (blau) und ohne (rot) durchgeführte Schnitte. Die Daten wurden mit der GEM-TPC mit kosmischer Strahlung bei einem Driftfeld von 360 V/cm und ArCO₂ (90:10) als Driftgas aufgenommen.

22,59 mm/ μ s, was einem minimalen Driftfeld für ArCO₂ (90:10) unter Standardbedingungen von 83 % $E_{\text{drift,max}}$ (298,8 V/cm) und für NeCO₂ (90:10) von 95 % $E_{\text{drift,max}}$ (342,0 V/cm) entspricht. Bei der Test-TPC sind durch die deutlich kürzere Driftstrecke von 76,9 mm immer beide Kanten im Zeitspektrum zu identifizieren. Hier liegt die minimale Driftgeschwindigkeit bei lediglich $v_{\text{drift,minimal}} = 2,34$ mm/ μ s und entspricht damit einem Driftfeld von 10 % $E_{\text{drift,max}}$ (36,0 V/cm) für ArCO₂ (90:10) und NeCO₂ (90:10) beziehungsweise 30 % $E_{\text{drift,max}}$ (108,0 V/cm) für ArCO₂ (70:30).

Um die zeitliche Position der ersten GEM-Folie beziehungsweise der Kathodenendkappe zu finden, werden mit der Fehlerfunktion

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (7.1)$$

und der komplementären Fehlerfunktion

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \quad (7.2)$$

zwei Stufenfunktionen der Form

$$y_{\text{GEM-Folie}} = a_0 \cdot \text{erf}\left(\frac{x - a_1}{a_2}\right) + a_3 \quad (7.3)$$

und

$$y_{\text{Kathode}} = a_0 \cdot \text{erfc}\left(\frac{x - a_1}{a_2}\right) + a_3 \quad (7.4)$$

an das geschnittene Zeitspektrum angepasst. Die Position der Kanten ist durch den jeweiligen Wendepunkt der Funktionen und somit durch den Parameter a_1 gegeben. Die weiteren Parameter geben Auskunft über die Steigung (a_2), die Höhe (a_0) und den Versatz (a_3) der Funktionen. Für eine automatisierte Anpassung der Stufenfunktionen ist es für alle Parameter notwendig, Startwerte in der richtigen Größenordnung anzugeben. Diese Startwerte lassen sich aus dem Mittelwert aller Einträge im Bereich der Kante

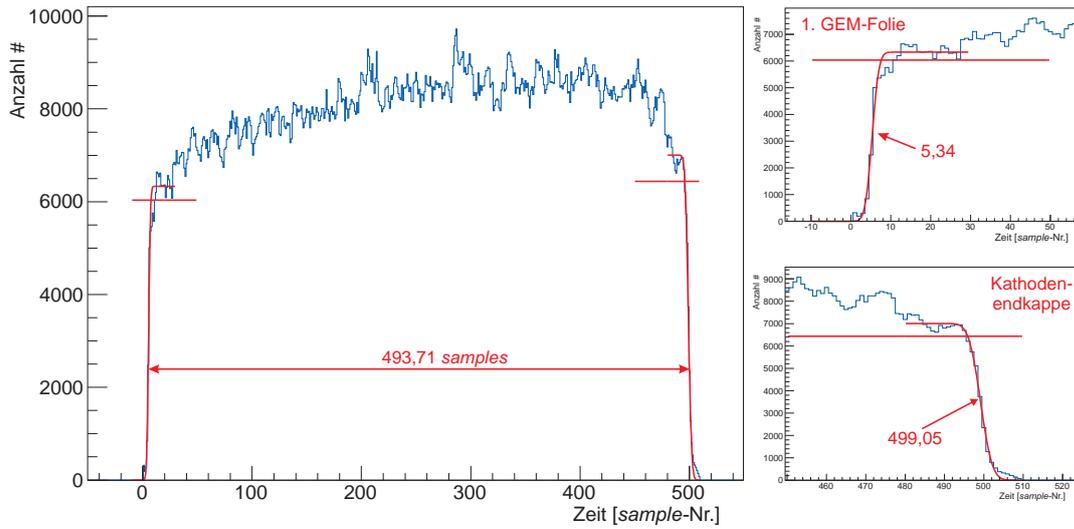


Abbildung 7.4: Gesamtes Zeitspektrum für Run 3706 (links) mit angepassten Stufenfunktionen zur Bestimmung der Position der ersten GEM-Folie (rechts oben) und der Kathodenendkappe (rechts unten). Die Daten wurden mit der GEM-TPC mit kosmischer Strahlung bei einem Driftfeld von $309,6 \text{ V/cm}$ und ArCO_2 (90:10) als Driftgas aufgenommen.

generieren. Diese Konstanten sind in Abbildung 7.4 zusammen mit den beiden Stufenfunktionen für einen mit der GEM-TPC und kosmischer Strahlung bei einem Driftfeld von $309,6 \text{ V/cm}$ und ArCO_2 (90:10) als Driftgas aufgenommen Run dargestellt.

Mit dem Abstand der beiden Kanten, der Ausleserate SR der Front-End-Elektronik und der bekannten Driftstrecke kann nun die Driftgeschwindigkeit über

$$v_{drift} = \frac{l \cdot SR}{(t_{Kathode} - t_{GEM-Folie})} \quad (7.5)$$

berechnet werden, wobei l die Driftstrecke, $t_{Kathode}$ die Position der hinteren und $t_{GEM-Folie}$ die Position der vorderen Kante im Zeitspektrum bezeichnen. Die Driftstrecke ist durch die maximal mögliche Driftstrecke innerhalb der Zeitprojektionskammer mit $l = (727,8 \pm 2,0) \text{ mm}$ gegeben. Die Abtastrate wird durch einen, in der Datenbank der Ausleseelektronik abgespeicherten Divisor aus der maximal möglichen Abtastrate von $SR_{max} = 77,76 \text{ MHz}$ berechnet.

Für den in Abbildung 7.4 gezeigten Run mit der Nummer 3706 ergibt sich daher mit Hilfe der Position der beiden Kanten von $t_{GEM-Folie} = 5,34 \pm 1,00$ und $t_{Kathode} = 499,05 \pm 1,00$ sowie einer Ausleserate von $SR = SR_{max}/5 = (15,55 \pm 0,10) \text{ MHz}$ eine rekonstruierte Driftgeschwindigkeit von

$$v_{drift} = (22,926 \pm 0,164) \text{ mm}/\mu\text{s} .$$

Für die Fehler in der Position der Kanten ist eine obere Abschätzung angegeben, die mit $\pm 1,00 \text{ sample}$ gerade einer falsch zugeordneten Speicherzelle im Analog-Ring-Speicher entspricht. Die Positionen aller Kanten sind in der Run-Datenbank abgespeichert.

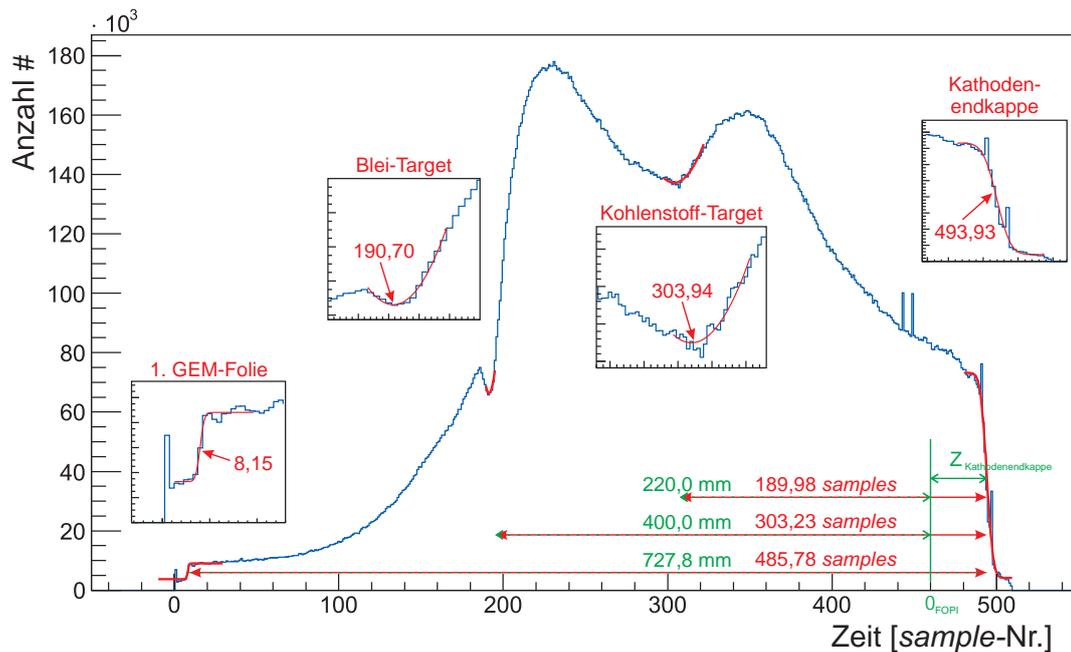


Abbildung 7.5: Zeitspektrum für Run 3062 mit angepassten Stufenfunktionen zur Bestimmung der Position der ersten GEM-Folie und der Kathodenendkappe sowie angepassten Parabeln für die Position des Blei- und des Kohlenstofftargets. Die Daten wurden mit der GEM-TPC mit einem π^- -Strahl bei einem Driftfeld von 302,4 V/cm und ArCO₂ (90:10) als Driftgas aufgenommen.

7.2.3 Alternative Bestimmung über die Targetposition

Die GEM-TPC konnte aufgrund von Problemen mit dem Feldkäfig während einer der Strahlzeiten nur mit einem Driftfeld von 65 % $E_{\text{drift, max}}$ (234 V/cm) betrieben werden, so dass lediglich ein Teilstück der Zeitprojektionskammer entlang der z -Achse ausgelesen werden konnte und nur eine der beiden Kanten im Zeitspektrum zu erkennen ist. Da gerade die Daten dieser Strahlzeit von großer Bedeutung für das physikalische Programm des FOPI-Experiments sind, musste ein anderer Weg gefunden werden, um die Driftgeschwindigkeit aus den Daten zu extrahieren.

Bei dieser Strahlzeit im Juni 2011 wurden Daten mit einem π^- -Strahl genommen, welcher zunächst auf ein Blei- und anschließend auf ein Kohlenstofftarget trifft. Im Verlauf der Strahlzeit wurden die beiden Targets nach und nach durch einzelne Kupfer-, Kohlenstoff- und Bleitargets ersetzt. Durch den Aufbau des FOPI-Experiments mit einem fest installierten Target ist die Teilchenrate aufgrund des Lorentzboosts in Vorwärtsrichtung deutlich erhöht. Durch die räumliche Ausdehnung der Targets in x - und y -Richtung lässt sich die Position der Targets im Zeitspektrum durch ein Minimum in der Zählrate identifizieren (siehe Abbildung 7.5). Da die Position der Targets im Koordinatensystem des FOPI-Experiments auf ± 2 mm genau bekannt ist, kann somit zwischen der Kathodenendkappe und den Targets eine Driftstrecke definiert werden, die sich zur Bestimmung der Driftgeschwindigkeit eignet.

In einem ersten Schritt musste hierzu die genaue Position der Kathodenendkappe

im FOPI-Koordinatensystem bestimmt werden. Bei fünf Runs zu Beginn der Juni-Strahlzeit mit den Run-Nummern 3058-3062 war das Driftfeld mit 302,4 V/cm hoch genug eingestellt, um zunächst die Driftgeschwindigkeit über die Position der Kathodenendkappe und der ersten GEM-Folie im Zeitspektrum berechnen zu können. Wie in Abbildung 7.5 dargestellt ist, konnte neben den beiden Kanten auch die Position des Blei- sowie des Kohlenstofftargets im Zeitspektrum durch das Anpassen einer Parabel ermittelt werden. In der verwendeten Scheitelpunktform

$$y_{\text{Target}} = a_0 \cdot (x - a_1)^2 + a_2 \quad (7.6)$$

der Parabel gibt der Parameter a_1 die gewünschte Position, a_2 den Versatz entlang der y -Achse und a_0 die Stauchung an. Eine Parabel beschreibt zwar nicht immer den exakten Verlauf der Zeitspektren an der Stelle des Targets, eignet sich jedoch sehr gut zur Bestimmung der Position der Minima in der Zählrate.

Aus der Targetposition, der Ausleserate und den zuvor berechneten Driftgeschwindigkeiten kann die Länge der Driftstrecke zwischen den Targets und der Kathodenendkappe über

$$l_{\text{Target}} = \frac{(t_{\text{Kathode}} - t_{\text{Target}}) \cdot v_{\text{drift}}}{SR} \quad (7.7)$$

bestimmt werden.

Für das Bleitarget, welches während der fünf untersuchten Runs im FOPI-Koordinatensystem bei $Z_{\text{Bleitarget}} = (-400 \pm 2)$ mm angebracht war, ergibt sich ein Mittelwert von

$$l_{\text{Bleitarget}} = (454,27 \pm 0,20) \text{ mm} \quad ,$$

wodurch sich die Position der Kathodenendkappe im FOPI-Koordinatensystem zu

$$Z_{\text{Kathodenendkappe}} = (54,27 \pm 2,01) \text{ mm}$$

festlegen lässt.

Das Kohlenstofftarget hat im Gegensatz zum Blei- und Kupfertarget mit 10 mm eine nicht vernachlässigbare Ausdehnung entlang der z -Achse. Während die Position im FOPI-Koordinatensystem mit $Z_{\text{Kohlenstofftarget}} = (-220 \pm 2)$ mm für den Rand des Targets angegeben ist, wird die Zählrate für eine Position innerhalb des Targets minimal. Dadurch ergibt sich aus dem Mittelwert der rekonstruierten Driftstrecken von

$$l_{\text{Kohlenstofftarget}} = (282,79 \pm 3,85) \text{ mm}$$

eine abweichende Z -Koordinate für die Kathodenendkappe:

$$Z_{\text{Kathodenendkappe, Kohlenstoff}} = (62,79 \pm 4,34) \text{ mm} \quad .$$

Dieser Wert entspricht nicht der tatsächlichen Position der Kathodenendkappe, berücksichtigt jedoch die Ausdehnung des Kohlenstofftargets und muss daher für alle Runs mit dem Kohlenstofftarget verwendet werden.

Bei einem Großteil der Runs der π^- -Strahlzeit war lediglich ein Target an der Position $Z_{\text{Targets}} = (-200 \pm 2)$ mm installiert, so dass sich für das Blei- und Kupfertarget eine Driftstrecke von

$$l_{\text{Pb-,Cu-Target}} = (254,27 \pm 2,01) \text{ mm}$$

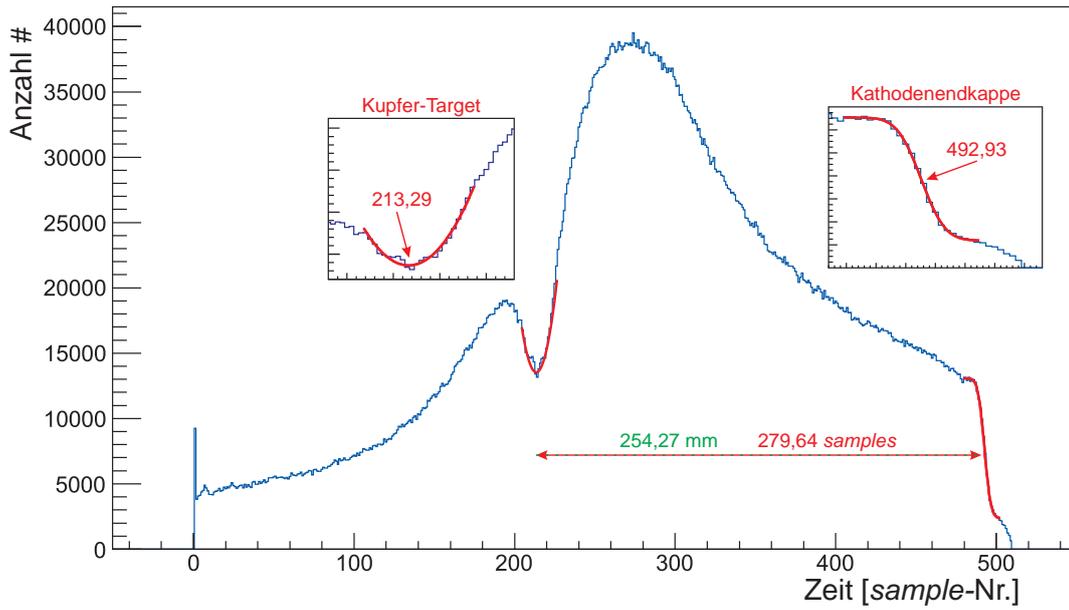


Abbildung 7.6: Zeitspektrum für Run 3572 mit angepasster Stufenfunktion zur Bestimmung der Position der Kathodenendkappe sowie angepasster Parabel für die Position des Kupfertargets. Die Daten wurden mit der GEM-TPC mit einem π^- -Strahl bei einem Driftfeld von 234 V/cm und ArCO₂ (90:10) als Driftgas aufgenommen.

und von

$$l_{C\text{-Target}} = (262,79 \pm 4,34) \text{ mm}$$

für das Kohlenstofftarget ergibt. Die anschließende Bestimmung der Driftgeschwindigkeit für alle Runs mit dem zu niedrigen Driftfeld erfolgt mit den nun bekannten Driftstrecken aus dem zeitlichen Abstand der Targets zur Kathodenendkappe. Dieser wird, wie in Abbildung 7.6 für den Run mit der Nummer 3572 dargestellt ist, über das Anpassen einer Parabel an die Targetposition beziehungsweise einer Stufenfunktion an die Kante der Kathodenendkappe im Zeitspektrum ermittelt. Für den dargestellten Run ergibt sich mit

$$v_{drift} = \frac{l_{\text{Pb-Cu-C-Target}} \cdot SR}{(t_{\text{Kathode}} - t_{\text{Target}})} \quad (7.8)$$

aus $t_{\text{Kupfertarget}} = 213,29 \pm 1,00$ und $t_{\text{Kathode}} = 492,93 \pm 1,00$ somit eine Driftgeschwindigkeit von

$$v_{drift} = (14,141 \pm 0,160) \text{ mm}/\mu\text{s} .$$

Während für die Fehler in der Position und der Ausleserate hier die gleichen oberen Abschätzungen vorgenommen wurden, wie bei der Bestimmung der Driftgeschwindigkeit über die gesamte Länge der GEM-TPC, ist der Fehler auf die Driftstrecke erwartungsgemäß größer. Trotzdem ergibt sich für die berechneten Driftgeschwindigkeiten eine deutlich geringere Unsicherheit als dies aufgrund der Messungenauigkeiten bei den simulierten Werten der Fall ist.

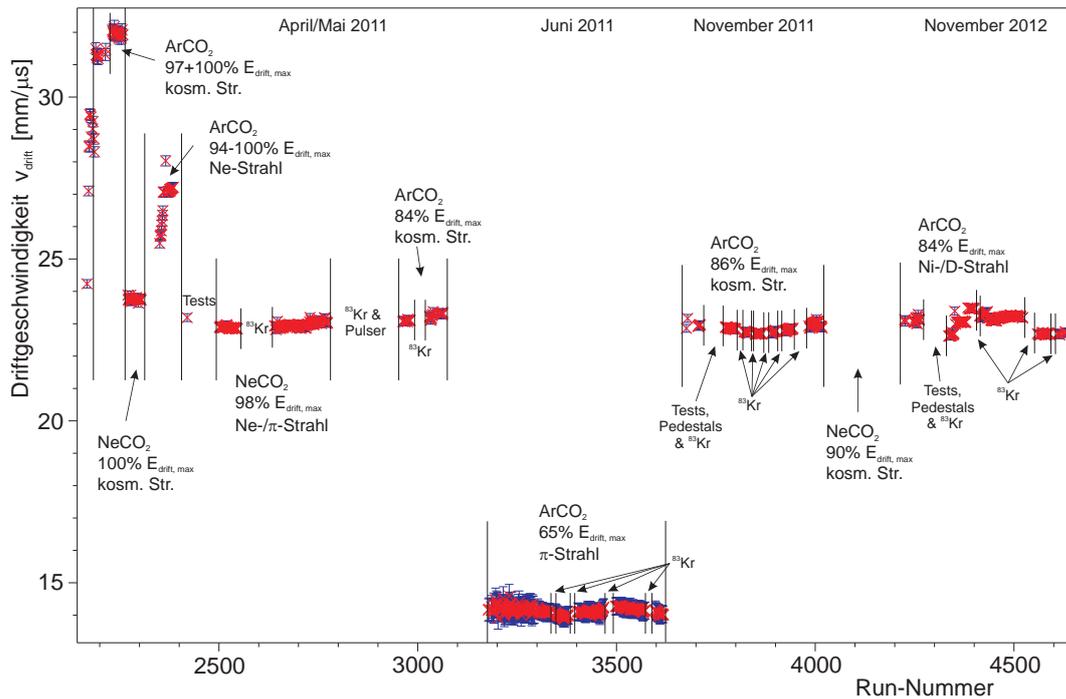


Abbildung 7.7: Aus den Daten der GEM-TPC rekonstruierte Driftgeschwindigkeiten, aufgetragen gegen die Nummer des zugehörigen Runs. Die Anzahl an Ereignissen in den Runs und die jeweilige Startzeit sind in Anhang E aufgelistet.

7.3 Diskussion der Ergebnisse

Von den insgesamt 2429 mit der GEM-TPC aufgezeichneten Runs konnte bei 914 Runs die Driftgeschwindigkeit aus dem Zeitspektrum bestimmt werden. Alle rekonstruierten Driftgeschwindigkeiten sind in Abbildung 7.7 gegen die entsprechende Run-Nummer aufgetragen und tabellarisch in Anhang E aufgelistet. Für die einzelnen Testmessungen und Strahlzeiten sind zudem die verwendeten Driftgase und Driftfelder aufgeführt. Darüber hinaus ist zu entnehmen, ob mit einem Teilchenstrahl (655 Runs) oder kosmischer Strahlung (259 Runs) gemessen wurde. In der Tabelle sind außerdem die Anzahl der Ereignisse in den jeweiligen Datendateien sowie die Dauer der Runs angegeben.

Die vorhandenen Lücken ergeben sich vor allem durch die Kalibrationsmessungen mit ^{83m}Kr (397 Runs), durch sogenannte Pedestal-Runs zur Untergrundbestimmung der ADCs (310 Runs) oder anderweitige Testmessungen (197 Runs) sowie durch Runs mit zu geringen Driftfeldern oder zu geringer Statistik (611 Runs). Für die Runs mit den Nummern 4010 bis 4219 konnten beispielsweise keine Driftgeschwindigkeiten bestimmt werden, da mit dem eingestellten Driftfeld von 90% $E_{\text{drift,max}}$ bei einer Messung mit NeCO_2 (90:10) maximal eine der beiden Kanten im Zeitspektrum identifizierbar ist und sich durch die gleichmäßige Verteilung von Ereignissen über die gesamte Länge der GEM-TPC, bedingt durch die Messung mit kosmischer Strahlung, keine weitere definierte Driftstrecke ergibt.

Ein Vergleich mit den simulierten Werten zeigt in Anbetracht der in Kapitel 6 ausgeführten Messungsgenauigkeiten eine gute Übereinstimmung. Bei den meisten Runs liegen

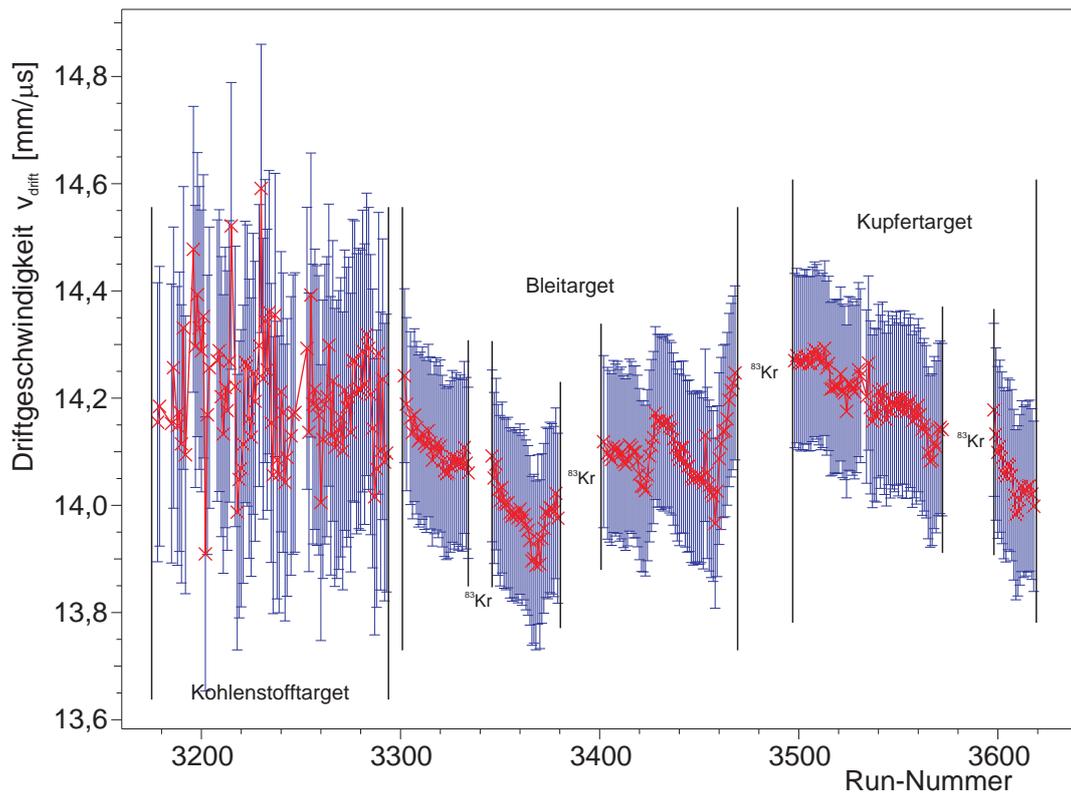


Abbildung 7.8: Für die π^- -Strahlzeit im Juni 2011 rekonstruierte Driftgeschwindigkeiten, aufgetragen gegen die Nummer des zugehörigen Runs. Die verhältnismäßig großen Fehler ergeben sich vor allem aus dem Fehler der Driftstrecke $l_{\text{Pb-Cu-C-Target}}$.

die mit Hilfe der Parameter aus der Run-Datenbank simulierten und die berechneten Driftgeschwindigkeiten weniger als 1,0% auseinander. Bedingt durch Messungenauigkeiten oder fehlende Messwerte ergeben sich für einige Runs jedoch auch größere Abweichungen. Für den Run mit der Nummer 3062 beispielsweise, welcher zur Bestimmung der Targetpositionen verwendet wurde, ist die simulierte Driftgeschwindigkeit mit $v_{\text{drift Magboltz}} = (23,30 \pm 0,04) \text{ mm}/\mu\text{s}$ identisch mit den berechneten Werten von $v_{\text{drift Daten}} = (23,30 \pm 0,12) \text{ mm}/\mu\text{s}$. Bei Run 4630 hingegen weichen die simulierte ($v_{\text{drift Magboltz}} = (23,10 \pm 0,17) \text{ mm}/\mu\text{s}$) und die berechnete Driftgeschwindigkeit ($v_{\text{drift Daten}} = (22,73 \pm 0,12) \text{ mm}/\mu\text{s}$) um 1,6% voneinander ab.

7.3.1 Stabilität der Driftgeschwindigkeit

Die rekonstruierten Driftgeschwindigkeiten streuen über die Dauer der unterschiedlichen Messperioden in der Größenordnung der berechneten Fehler von 1,5%. Wie zuvor bereits diskutiert, hängt die Stabilität der Driftgeschwindigkeit jedoch von äußeren Faktoren ab. Wechselnde Hochspannungseinstellungen, beispielsweise während der Testmessungen im April und Mai 2011, oder eine stark schwankende Anzahl an Ereignissen in den Runs haben größere Änderungen der Driftgeschwindigkeit zur Folge. Letzteres zeigt sich zum Beispiel bei den in Abbildung 7.8 dargestellten Messungen mit dem Kohlenstofftarget

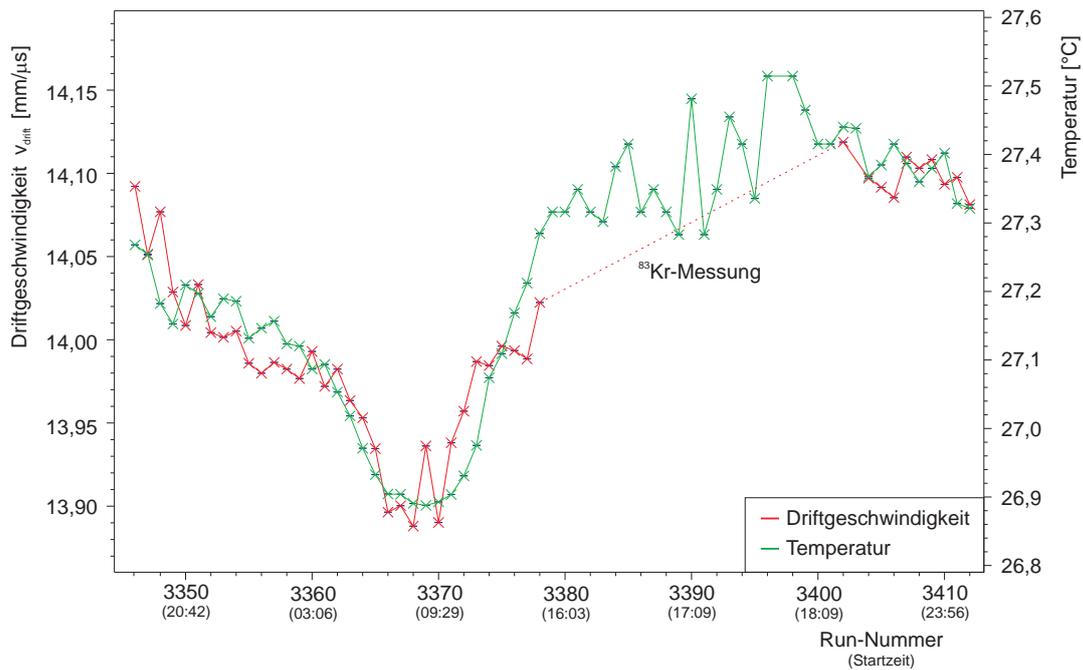


Abbildung 7.9: Verlauf der rekonstruierten Driftgeschwindigkeit (rot) und der gemessenen Temperatur (grün) über einen Zeitraum von 28 Stunden. Der Fehler der Driftgeschwindigkeit wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen.

während der π^- -Strahlzeit im Juni 2011. Für zusammenhängende Runs über kürzere Zeiträume konnten auch deutlich stabilere Driftgeschwindigkeiten mit Variationen von unter 1,0% erreicht werden, wie Abbildung 7.8 für die Messungen mit dem Blei- und Kupfertarget zu entnehmen ist.

7.3.2 Temperaturabhängigkeit

Wie anhand der Simulationen zu erwarten ist, lässt sich ein direkter Zusammenhang zwischen der Temperatur und der rekonstruierten Driftgeschwindigkeit feststellen.

Besonders deutlich ist dies in Abbildung 7.9 dargestellt. Hier sind der Verlauf der rekonstruierten Driftgeschwindigkeit und derjenige der gemessenen Temperatur auf der Ausleseebene über einen Zeitraum von 28 Stunden während der π^- -Strahlzeit im Juni 2011 gemeinsam aufgetragen. Das Absinken der Temperatur während der Nacht und der Anstieg am Tag werden erkennbar auf die Driftgeschwindigkeit übertragen, welche bei sonst gleich bleibenden Einstellungen dem Temperaturverlauf exakt folgt.

Ein weiteres Beispiel für die Temperaturabhängigkeit der Driftgeschwindigkeit zeigt Abbildung 7.10. Die Temperaturerhöhung zwischen den dargestellten Messungen an drei aufeinanderfolgenden Tagen Ende Oktober 2012 ist hier ebenfalls in der Erhöhung der Driftgeschwindigkeit wiederzufinden.

In beiden Beispielen fällt die Änderung der Driftgeschwindigkeit jedoch stärker aus, als von der Simulation vorhergesagt. Dies liegt vor allem daran, dass hier die Temperaturen auf der Ausleseebene betrachtet werden. Deren Änderung fällt durch die Kühlung der Ausleseelektronik weniger stark aus als für die Temperaturen im Inneren der TPC.

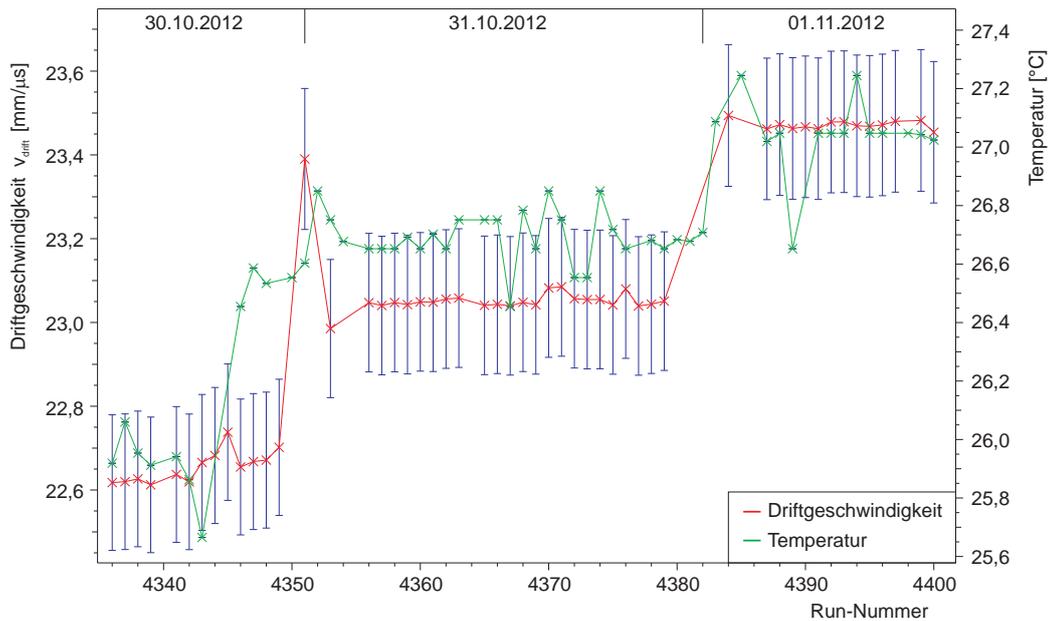


Abbildung 7.10: Verlauf der rekonstruierten Driftgeschwindigkeit (rot) und der gemessenen Temperatur (grün) für Messungen an drei aufeinander folgenden Tagen Ende Oktober 2012. Die Messdauer an den einzelnen Tagen betrug jeweils ca. drei Stunden.

Die Werte der Sensoren auf dem Feldkäfig zeigen zudem für die dargestellten Runs eine Temperaturzunahme entlang der z -Achse in einer Größenordnung von 2°C . Neben der Temperaturänderung können auch weitere äußere Einflüsse zu einer Änderung der Driftgeschwindigkeit beitragen.

7.3.3 Positionsabhängigkeit

Um eine mögliche Abhängigkeit der Driftgeschwindigkeit von der x - und y -Position der Teilchenspuren innerhalb der GEM-TPC auszuschließen, wurden die Einträge im Zeitspektrum zusätzlich über den Winkel ϕ auf die Zugehörigkeiten zu einzelnen Winkelabschnitten und auf die radiale Position R der rekonstruierten Cluster gefiltert.

Abhängigkeit vom Winkel ϕ : Für die verschiedenen Winkelabschnitte mit einer untersuchten Breite von 15° konnten innerhalb der einzelnen Runs keine Unterschiede für die Lage der Kanten im Zeitspektrum festgestellt werden. Die Driftgeschwindigkeit ist somit symmetrisch in ϕ .

Abhängigkeit von der radialen Position R : Bei der Darstellung des Zeitspektrums in Abhängigkeit von der radialen Position der Cluster sind hingegen Unregelmäßigkeiten für große Driftzeiten und kleine Radien zu erkennen. Wie Abbildung 7.11 am Beispiel von Run 3572 zeigt, ist die Zählrate in diesem Bereich deutlich geringer als erwartet und weicht von einer gleichmäßigen, rechteckigen Verteilung ab. Dieser Effekt wird durch

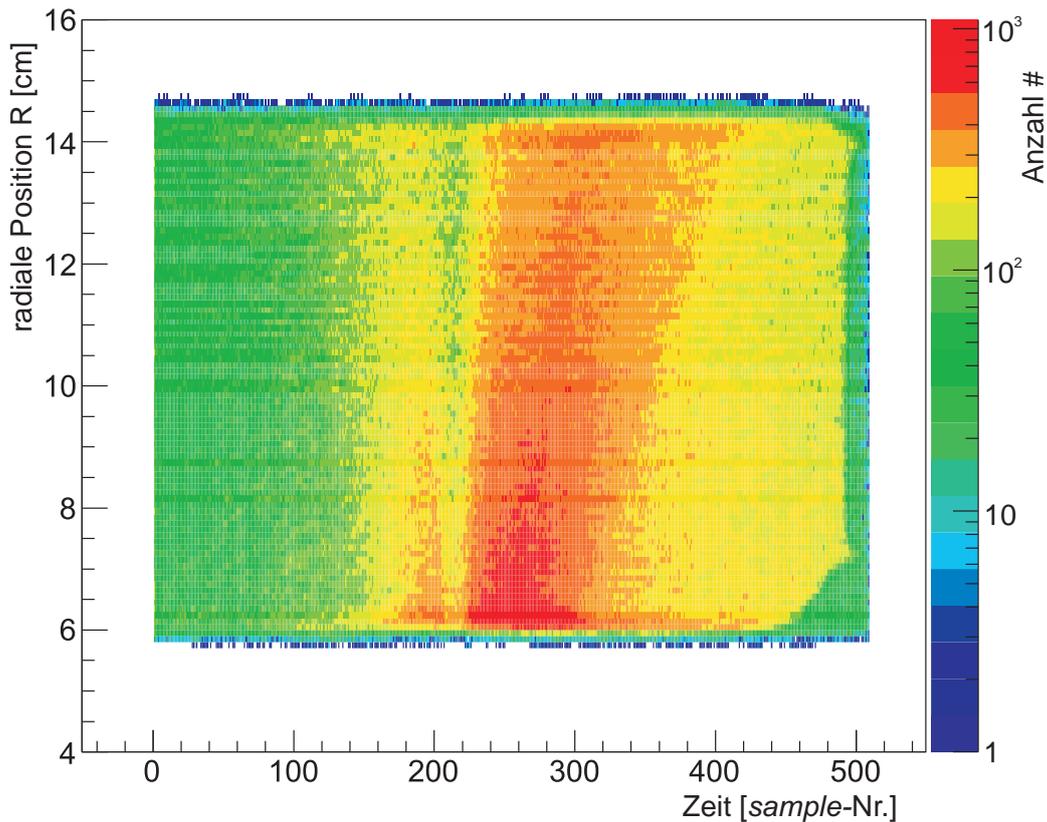


Abbildung 7.11: Logarithmisch dargestellte Häufigkeit der Driftzeit in Abhängigkeit von der radialen Position der rekonstruierten Cluster für Run 3572 (π^- -Strahl, Kupfer-target, 234 V/cm, ArCO₂ (90:10)).

Verzerrungen des elektrischen Feldes hervorgerufen, die an dieser Stelle durch den Übergang des inneren Feldkäfigs zur Kathodenendkappe entstehen. Am äußeren Feldkäfig ist dies ebenfalls in abgeschwächter Form zu beobachten. Obwohl ein Einfluss auf die Lage der Kante im Zeitspektrum (siehe Abbildung 7.6) und somit auf die Bestimmung der Driftgeschwindigkeit nicht nachgewiesen werden konnte, werden die Feldverzerrungen zur Zeit ausführlich durch das Detektorlabor der GSI untersucht.

Abhängigkeit von der Position auf der z -Achse: Das Verhalten der Driftgeschwindigkeit entlang der z -Achse konnte bisher nicht zufriedenstellend untersucht werden. Für diese Messungen ist eine externe Referenz notwendig, um mit hoher Präzision auf Ereignisse mit einer definierten z -Position filtern zu können. Die Ortsauflösung der FOPI-Detektoren ist hierfür allerdings nicht ausreichend, so dass weitere Studien, beispielsweise mit Hilfe der Detektoren auf der TestBench, notwendig sind.

7.3.4 Abhängigkeit von Druck und Gaszusammensetzung

Wie aufgrund der Messgenauigkeit der Drucksensoren zu erwarten war, lässt der gemessene Druck am Gasein- und Gasauslass der GEM-TPC keinen Rückschluss auf die

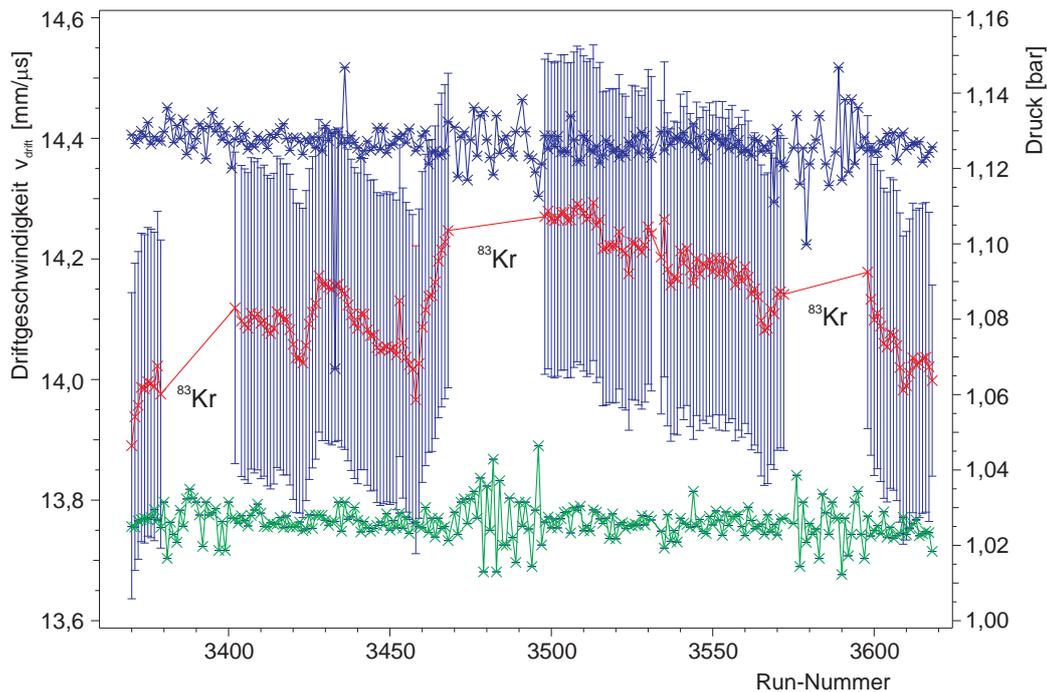


Abbildung 7.12: Verlauf der rekonstruierten Driftgeschwindigkeit (rot) und der gemessenen Drücke am Gasein- (grün) und Gasauslass (blau) der GEM-TPC.

Abhängigkeit der Driftgeschwindigkeit vom Druck zu. In Abbildung 7.12 sind beispielhaft die Mittelwerte der gemessenen Drücke über den Zeitraum des jeweiligen Runs zusammen mit der entsprechenden Driftgeschwindigkeit dargestellt. Während bei der Driftgeschwindigkeit ein klarer Verlauf zu erkennen ist, schwanken die Messwerte der Drucksensoren lediglich von Run zu Run in einer Größenordnung von 15 mbar, ohne erkennbare Korrelation mit der Driftgeschwindigkeit.

Auch über die Abhängigkeit der Driftgeschwindigkeit von der genauen Gaszusammensetzung kann keine Aussage getroffen werden, da für die Argon-, Neon- beziehungsweise Kohlenstoffdioxidkonzentration bisher nur wenige exakte Messwerte zur Verfügung stehen.

7.4 Weitere Analysen der Daten

Die Bestimmung der Driftgeschwindigkeit aus den Daten der Test-TPC und weiterführende Analysen aller aufgezeichneten Daten werden im Rahmen der GEM-TPC und der FOPI-Kollaboration durchgeführt.

Die weiteren Analysen umfassen beispielsweise die Untersuchung des Auflösungsvermögens der GEM-TPC. Wie in Abbildung 7.13 gezeigt und in [70, 127] ausgeführt ist, konnte für die x - und y -Koordinaten mit kosmischer Strahlung, ArCO_2 (90:10) als Driftgas und einem Driftfeld von $360 \text{ V}/\text{cm}$ eine Ortsauflösung von $\approx 230 \mu\text{m}$ für kurze Driftstrecken bestimmt und die Erwartungen an den Detektor somit voll erfüllt werden. Für die Auflösungsbestimmung wurden die Residuen der rekonstruierten Spuren

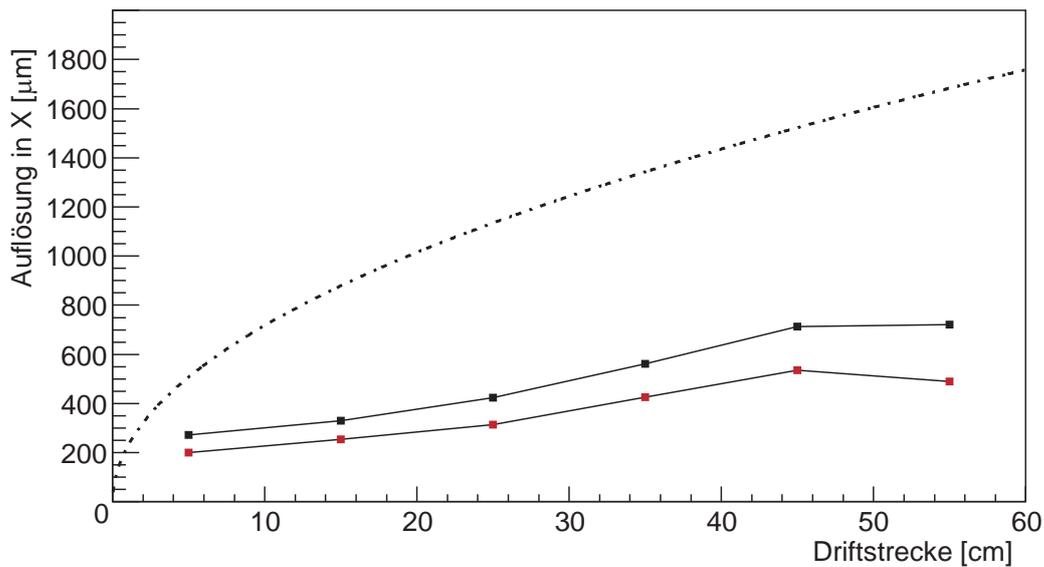


Abbildung 7.13: Aus den Residuen bestimmtes Auflösungsvermögen der x - und y -Koordinate in der GEM-TPC in Abhängigkeit von der Driftstrecke [127]. Die roten Punkte geben dabei das Sigma der schmaleren Gauß-Verteilung, die schwarzen Punkte den gewichteten Mittelwert der beiden Gauß-Verteilungen und die gestrichelte Linie die simulierte, transversale Diffusion für einzelne Elektronen an.

in jeweils 10 cm breiten Abschnitten der Driftstrecke zusammengefasst und zwei gewichtete Gauß-Funktionen an diese Verteilung angepasst. Das Sigma der schmalen Gauß-Verteilung (rote Punkte) sowie der gewichtete Mittelwert beider Gauß-Verteilungen (schwarze Punkte) geben dann in guter Näherung die erreichte Auflösung wieder.

Ein wichtiger Aspekt bei der Rekonstruktion und Analyse der Daten stellt die Anbindung der Spuren in der GEM-TPC an die detektierten Spuren in den Detektoren des FOPI-Experimentes dar. Wie Abbildung 7.14 für ein durch einen ^{22}Ne -Strahl an einem Al-Target hervorgerufenen Ereignis zeigt, funktioniert diese Spuranpassung ohne Berücksichtigung der z -Koordinate zuverlässig für 99 % aller Spuren [131]. Durch die Verwendung der rekonstruierten Driftgeschwindigkeiten sind hier noch weitere Verbesserungen zu erwarten.

Neben der erreichten Verbesserung der Impulsauflösung der FOPI-Detektoren um 30 % konnte durch die Verwendung der GEM-TPC erwartungsgemäß auch die Genauigkeit in der Bestimmung der Position rekonstruierter Vertices deutlich gesteigert werden. Abbildung 7.15 zeigt die erzielte Auflösung von besser als 10 mm aus der gemeinsamen Verwendung von CDC- und GEM-TPC-Daten anhand der Verteilung der z -Koordinate für die Wechselwirkung eines π -Strahls mit einem 10 mm dicken Kohlenstofftarget. Die Daten wurden mit ArCO_2 (90:10) als Driftgas und einem Driftfeld von 234 V/cm aufgenommen. Bei alleiniger Verwendung der CDC-Daten lässt sich lediglich eine Auflösung von $\mathcal{O}(10\text{ cm})$ erreichen.

Eine erste Analyse des spezifischen Energieverlustes dE/dx geladener Teilchen in der GEM-TPC und der daraus resultierenden Fähigkeit zur Identifizierung dieser Teilchen

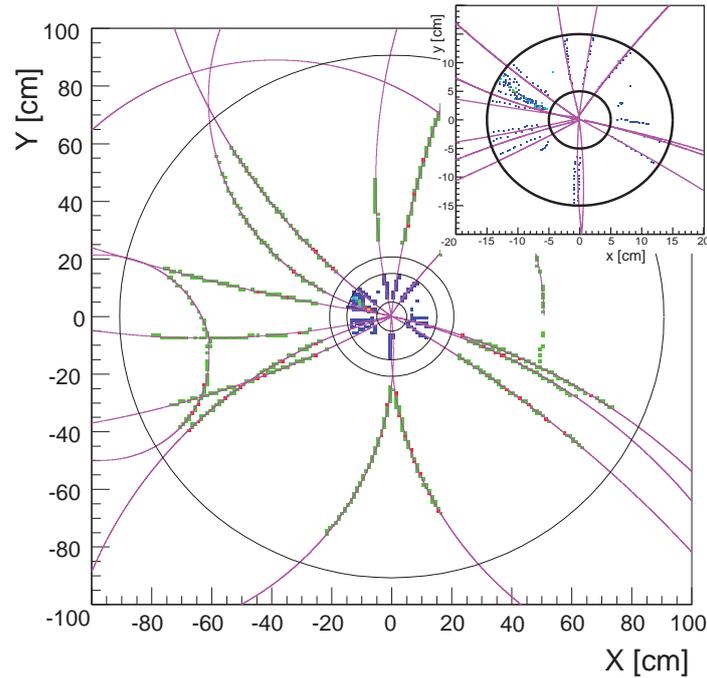


Abbildung 7.14: x - y -Projektion eines angepassten Ereignisses in der GEM-TPC (innere Ringe, blaue Punkte) und der CDC (äußere Ringe, grüne Punkte) mit den rekonstruierten Teilchenspuren (blaue Linien).

ist in [131] ausführlich dargestellt. Für eine Zeitprojektionskammer dieser Größenordnung mit GEM-Folien zur Verstärkung sind diese, in Abbildung 7.16 gezeigten Ergebnisse bisher einzigartig. Mit Hilfe der durchgeführten Energiekalibration der einzelnen Auslesekanäle (siehe Kapitel 2.7) konnte eine den Erwartungen entsprechende dE/dx -Auflösung von 14-17% erreicht werden. Mit weiteren Verbesserungen in der Analyse und durch die Verwendung der tatsächlichen Driftgeschwindigkeit lassen sich auch die in etablierten Zeitprojektionskammern, wie der ALICE TPC, erreichten dE/dx -Auflösungen von unter 10,5% realisieren.

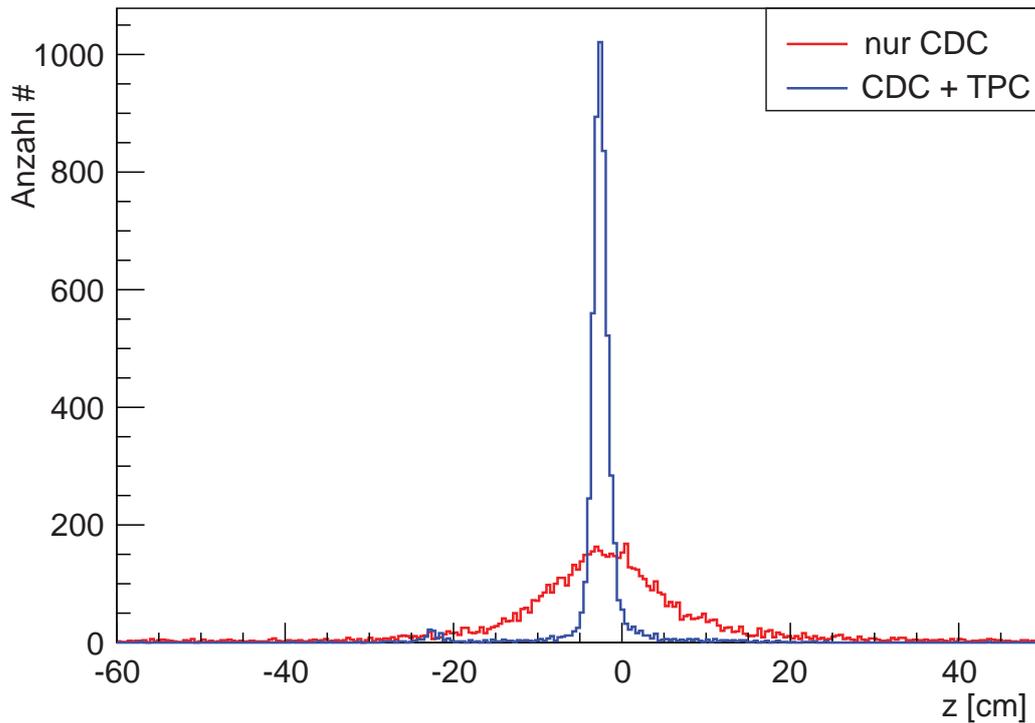


Abbildung 7.15: Verteilung der z -Koordinate rekonstruierter Vertices aus der Wechselwirkung eines π -Strahls mit einem 10 mm dicken Kohlenstofftarget unter Verwendung der CDC-Daten alleine (rot) und in Verbindung mit den Daten der GEM-TPC (blau) [127].

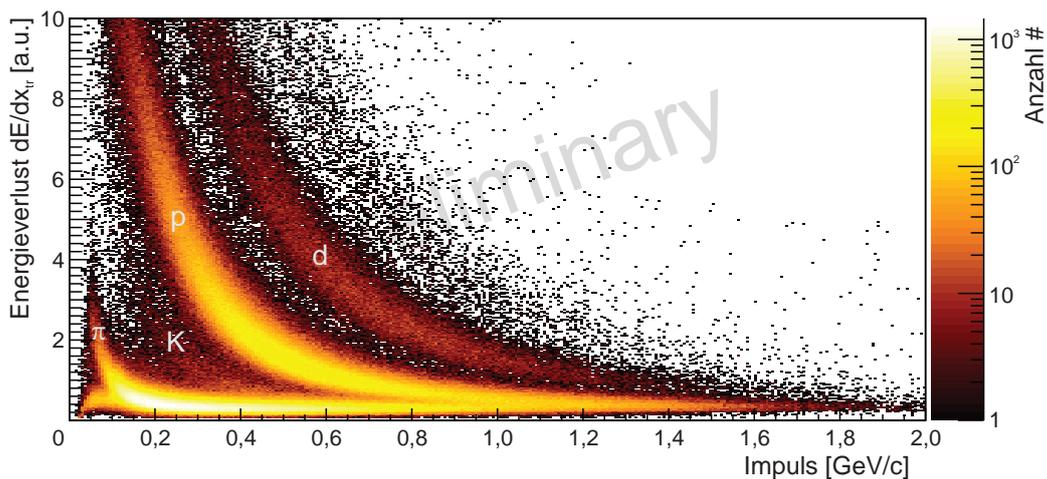


Abbildung 7.16: Spezifischer Energieverlust dE/dx geladener Teilchen in der GEM-TPC in Abhängigkeit vom ihrem Impuls bei einem Magnetfeld von 0,6 T und ArCO_2 (90:10) als Driftgas [131].

Inmitten der Schwierigkeiten
liegt die Möglichkeit.

(Albert Einstein)

8 Zusammenfassung und Ausblick

Als wichtiger Schritt in Richtung eines vollständigen Experiments wird der bestehende Innendetektor des CBELSA/TAPS-Experiments in den kommenden Jahren durch eine Zeitprojektionskammer mit GEM-Folien zur Ladungsverstärkung ersetzt. Dieser Spurdetektor ermöglicht unter anderem eine bessere Winkelauflösung von unter $0,1^\circ$, die Bestimmung der Teilchenart aus dem spezifischem Energieverlust, die Messung geladener Reaktionskanäle für bereits untersuchte Reaktionen sowie den Nachweis geladener Reaktionen, die mit dem Crystal-Barrel-Detektor bisher nicht nachgewiesen werden konnten.

Neben einer kleinen Test-TPC auf einer TestBench mit mehreren Detektoren zur externen Spurdefinition wurde eine erste GEM-TPC mit den Abmessungen für das CBELSA/TAPS-Experiment gebaut und als Spurdetektor im Inneren des FOPI-Experiments an der GSI in Betrieb genommen.

Zur Steuerung und Überwachung der beiden Zeitprojektionskammern sowie der weiteren Detektoren auf der TestBench wurde die dafür notwendige Hard- und Software im Rahmen dieser Arbeit entwickelt, gebaut und während mehrerer Testmessungen und Strahlzeiten an ELSA, am CERN und an der GSI erfolgreich eingesetzt.

Viele Hardwarekomponenten mussten für diese SlowControl neu konstruiert werden, beispielsweise das Gassystem für die TestBench und insbesondere die Auslese der meisten Sensoren. Die Kommunikation zwischen den Hardwarekomponenten und der Datenbank erfolgt einheitlich über Ethernet und wird über einen speziell entwickelten Daemon gesteuert. In der Datenbank als zentraler Komponente der SlowControl sind die auszuführenden Befehle, die ausgelesenen Daten und Einstellungen aller Subdetektoren, das elektronische Logbuch und eine Run-Datenbank gespeichert.

Zur Darstellung und Kontrolle aller Parameter und Messwerte und zur Eingabe neuer Parameter stehen eine PHP-Web-Oberfläche und eine graphische Benutzeroberfläche zur Verfügung. Während sich die PHP-Web-Oberfläche vor allem durch ihre Plattformunabhängigkeit auszeichnet, lassen sich die Parameter und Statuswerte mit der Qt-basierten SlowControl-GUI entsprechend ihrer maximalen Ausleserate von 1-2 Hz in Echtzeit darzustellen. Zusätzlich bietet die SlowControl-GUI eine hohe Benutzerfreundlichkeit, hohe Fehlersicherheit beim Umgang mit den Hochspannungen an den TPCs und die Möglichkeit, Einstellungen abzuspeichern oder zu laden. Aufgrund dieser Eigenschaften wird die SlowControl-Software bereits bei anderen Projekten, wie den Testmessungen für die Umrüstung der ALICE-TPC auf eine Verstärkung mit GEM-Folien oder den Messungen an einem GEM-Stack aus vier Folien an der Universität Frankfurt, erfolgreich eingesetzt.

Während der Strahlzeiten und Testmessungen konnte für die Spannungen und Ströme eine Messgenauigkeit besser als $0,0005\% V_{\max}$ beziehungsweise $0,0002\% A_{\max}$ und eine gute Langzeitstabilität von unter $0,005\% V_{\max}$ beziehungsweise $0,003\% A_{\max}$ gewährleistet werden. Die Messgenauigkeiten der Temperatursensoren entsprach ebenso den Erwartungen wie die Werte des Gassystems für die TestBench, des Unichillers, der SPS oder der Niederspannungsversorgung und deren Langzeitstabilitäten. Lediglich bei der Druckmessung an der GEM-TPC sind Verbesserungen zwingend nötig, da die bauartbedingte Auflösung mit 50 mbar deutlich zu schlecht ist. Weiterhin ist die Integration der Werte des geschlossenen Gassystems für die GEM-TPC und der Temperatursensoren auf dem Feldkäfig in die SlowControl derzeit ebenso in Bearbeitung, wie eine Umsetzung der SlowControl-GUI als Applikation für Smartphones und Tablets.

Eine konstante Überwachung der Parameter ist nicht nur für einen stabilen Betrieb der Detektoren notwendig. Für eine präzise Rekonstruktion der Teilchenspuren ist neben einer guten Auflösung in x - und y -Richtung die genaue Kenntnis der Driftgeschwindigkeit zur Bestimmung der z -Komponente von großer Bedeutung. Wie die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen zur Driftgeschwindigkeit und deren Abhängigkeit von der Driftspannung, dem Druck, der Gaszusammensetzung und der Temperatur zeigen, ist die Messung und Überwachung dieser Parameter für eine sinnvolle Verwendung der simulierten Driftgeschwindigkeit unumgänglich.

Für eine präzisere Rekonstruktion der z -Koordinate war es jedoch erforderlich, die Driftgeschwindigkeit zusätzlich aus den mit der GEM-TPC aufgezeichneten Daten zu bestimmen. Hierzu wurde die benötigte Driftzeit für eine definierte Strecke aus dem Zeitspektrum über die Position der Kathodenendkappe sowie der ersten GEM-Folie beziehungsweise den Targets extrahiert. Die berechneten Werte sind in guter Übereinstimmung mit den simulierten Driftgeschwindigkeiten, weisen jedoch einen deutlich geringeren Fehler auf. Hierdurch können die bisher durchgeführten und noch ausstehenden Analysen der GEM-TPC- und FOPI-Daten weiter verbessert werden.

A Platinendesign

Pt100-Ausleseplatine

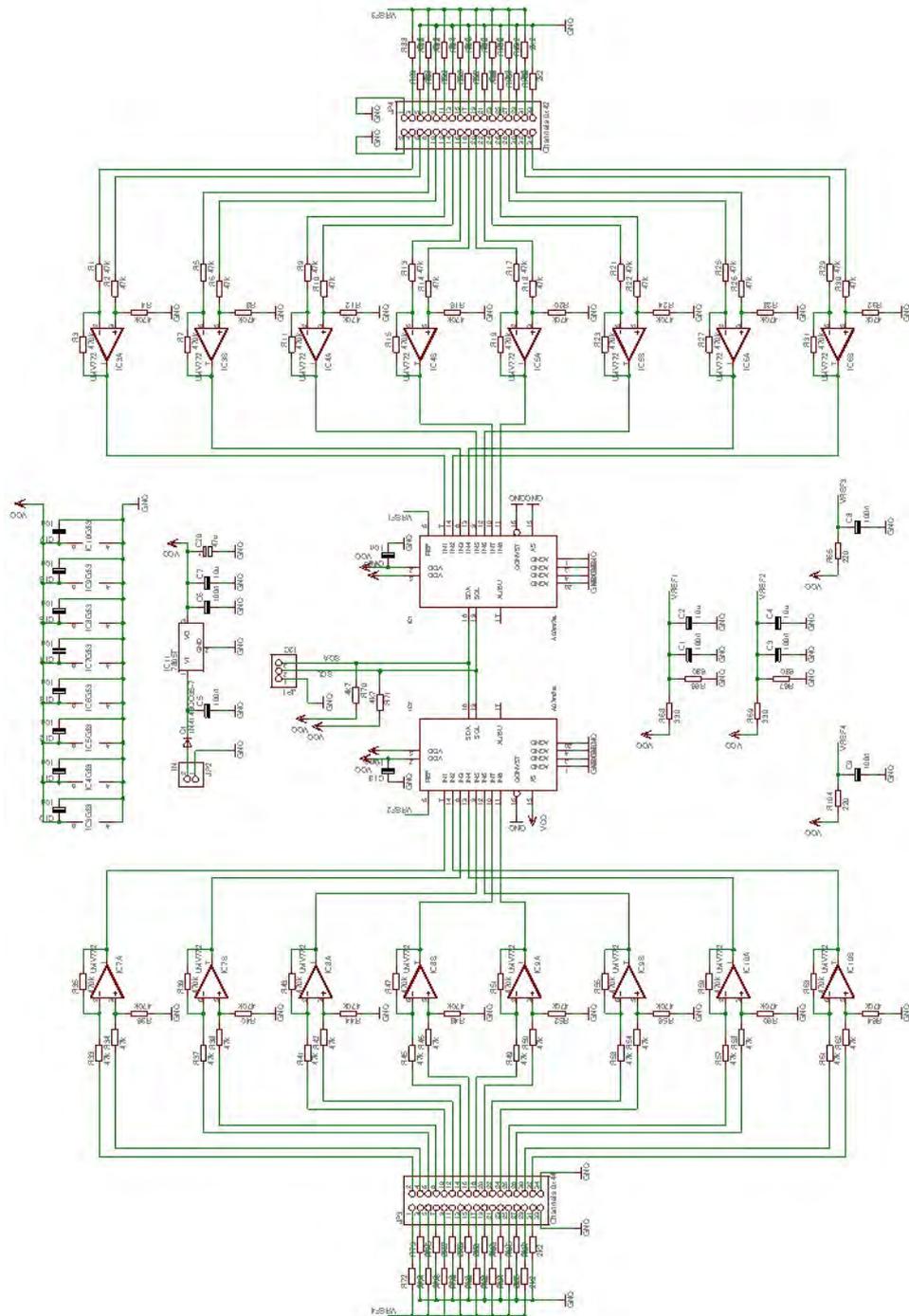


Abbildung A.1: Schaltplan der Pt100-Ausleseplatine

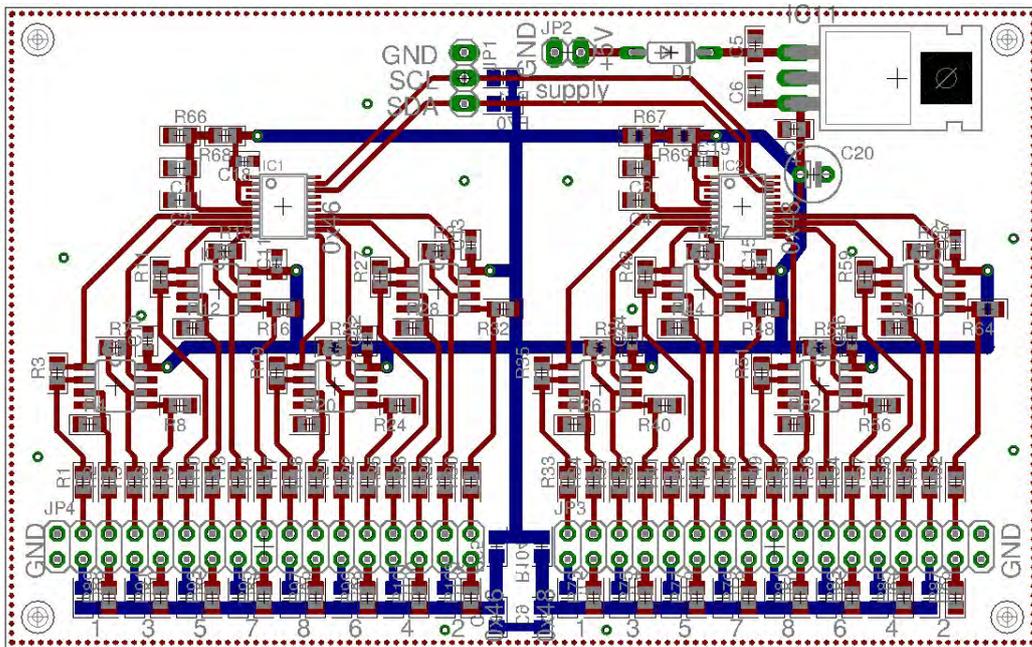


Abbildung A.2: Design der Pt100-Ausleseplatine

Dual-XPort-Platine

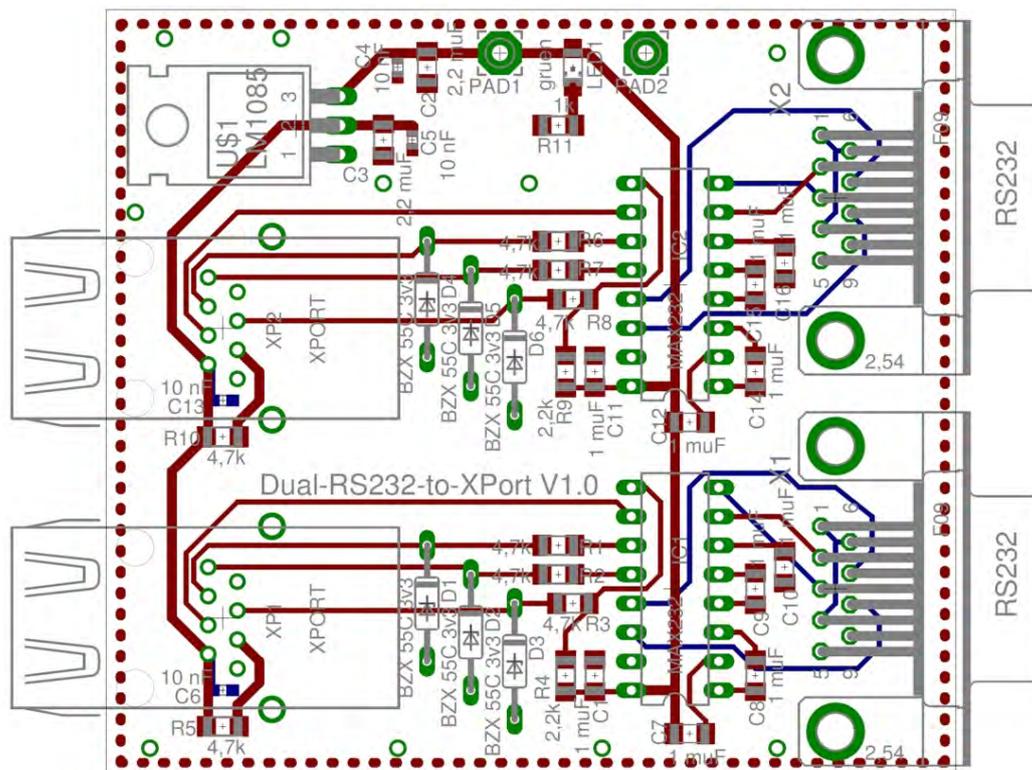


Abbildung A.3: Design der Dual-XPort-Platine

B Kalibrationstabellen

Kalibrierung der Pt100-Ausleseplatinen

Kanalnr.	Steigung $m \pm \Delta m$ [$\Omega/\text{ADC-Kanal}$]	Achsenabschnitt $b \pm \Delta b$ [Ω]
1	$0,076747 \pm 0,000222$	$-2,511092 \pm 0,389005$
2	$0,076784 \pm 0,000217$	$-2,141894 \pm 0,378107$
3	$0,076441 \pm 0,000269$	$-2,724105 \pm 0,473684$
4	$0,077048 \pm 0,000216$	$-4,040114 \pm 0,380777$
5	$0,076751 \pm 0,000202$	$-2,934317 \pm 0,354460$
6	$0,076903 \pm 0,000217$	$-4,146090 \pm 0,383493$
7	$0,076524 \pm 0,000223$	$-1,238453 \pm 0,388246$
8	$0,076870 \pm 0,000176$	$-3,274450 \pm 0,309581$
9	$0,076779 \pm 0,000211$	$-2,367490 \pm 0,367641$
10	$0,076751 \pm 0,000260$	$-4,183783 \pm 0,457227$
11	$0,077046 \pm 0,000212$	$-2,743225 \pm 0,368993$
12	$0,076869 \pm 0,000229$	$-4,745763 \pm 0,403679$
13	$0,076903 \pm 0,000218$	$-2,659269 \pm 0,380533$
14	$0,076795 \pm 0,000214$	$-2,040073 \pm 0,373002$
15	$0,076857 \pm 0,000233$	$-2,886953 \pm 0,407628$
16	$0,077016 \pm 0,000149$	$-1,781456 \pm 0,258419$

Tabelle B.1: Kalibrierung der ersten Pt100-Ausleseplatine. Über die Beziehung $R = m \cdot x + b$ lassen sich die gemessenen ADC-Werte (x) in Widerstandswerte (R) umrechnen.

Kanalnr.	Steigung $m \pm \Delta m$ [$\Omega/\text{ADC-Kanal}$]	Achsenabschnitt $b \pm \Delta b$ [Ω]
1	$0,076370 \pm 0,000204$	$-3,366167 \pm 0,360458$
2	$0,076485 \pm 0,000223$	$-3,174985 \pm 0,392760$
3	$0,076468 \pm 0,000215$	$-2,921522 \pm 0,379374$
4	$0,076544 \pm 0,000211$	$-3,268056 \pm 0,370888$
5	$0,076668 \pm 0,000222$	$-3,632042 \pm 0,391645$
6	$0,076452 \pm 0,000208$	$-2,434883 \pm 0,364975$
7	$0,076409 \pm 0,000121$	$-1,924656 \pm 0,211009$
8	$0,076182 \pm 0,000243$	$-1,786424 \pm 0,426580$
9	$0,076367 \pm 0,000223$	$-2,786837 \pm 0,392502$
10	vorgesehen für eine direkte Spannungsmessung	
11	$0,076130 \pm 0,000216$	$-2,509236 \pm 0,380679$
12	vorgesehen für eine direkte Spannungsmessung	
13	$0,076291 \pm 0,000228$	$-2,973635 \pm 0,402398$
14	$0,076558 \pm 0,000213$	$-3,102816 \pm 0,374940$
15	$0,076571 \pm 0,000134$	$-3,946511 \pm 0,237149$
16	$0,076447 \pm 0,000255$	$-3,438807 \pm 0,449764$

Tabelle B.2: Kalibrierung der zweiten Pt100-Ausleseplatine. Über die Beziehung $R = m \cdot x + b$ lassen sich die gemessenen ADC-Werte (x) in Widerstandswerte (R) umrechnen.

C Benutzerhandbücher

Die folgenden Abschnitte geben eine detaillierte Beschreibung aller Funktionen auf den Unterseiten der Web-Oberfläche (Abschnitt C.1) sowie auf den Registerkarten der graphischen Benutzeroberflächen für die GEM-TPC (Abschnitt C.2), die TestBench (Abschnitt C.3) und die Run-Datenbank (Abschnitt C.4) und sollen als Benutzerhandbuch dienen.

C.1 Web-Oberfläche

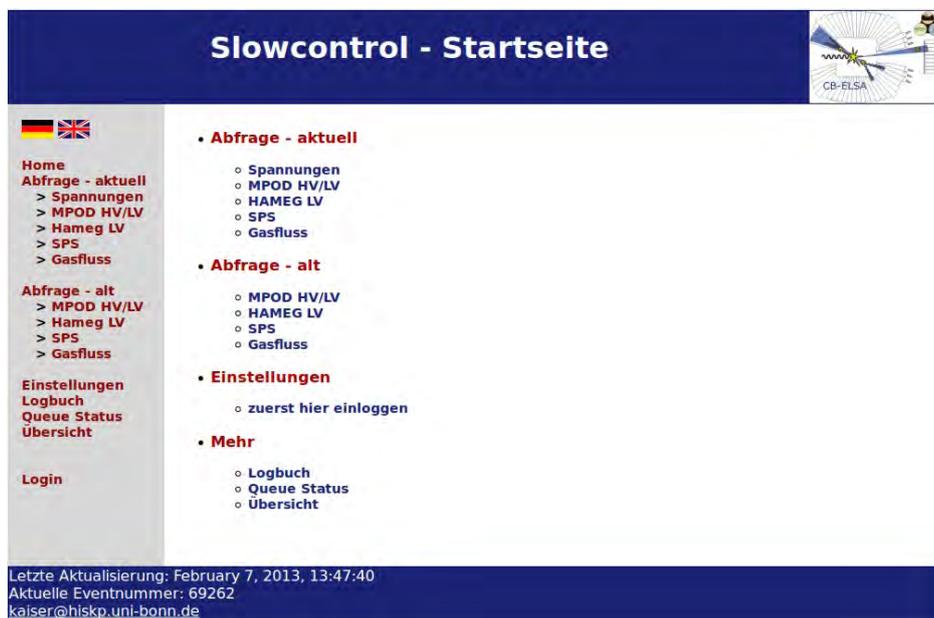


Abbildung C.1: Die Startseite der SlowControl-Web-Oberfläche für die TestBench.

Auf der in Abbildung C.1 gezeigten Startseite der Web-Oberfläche für die TestBench befinden sich die Links zu den Abfragen der aktuellen und der alten Werte jeder einzelnen Hardware-Komponenten, zum Logbuch, zu den noch auszuführenden Aktionen in der Queue-Tabelle und zu einer allgemeinen Übersichtsseite. Die Seiten zur Änderung von Parametern oder allgemeinen SlowControl-Einstellungen sind nur für registrierte Benutzer nach einem Login zugänglich. Im Menü auf der linken Seite gibt es zusätzlich die Möglichkeit, zwischen Deutsch und Englisch als Sprache für die Web-Oberfläche zu wählen.

Abfrage - aktuell

Die zuletzt ausgelesenen Werte der überwachten Komponenten werden bei einem Aufruf der entsprechenden „aktuellen“ Abfrage-Seiten aus der Tabelle AKTUELL gelesen und nach Kanalnummer sortiert als Tabelle dargestellt. Wie in Abbildung C.2 für die



Slowcontrol - Letzte Werte

MPOD HV+LV: Neu laden an Neu auslesen Voreinstellungen

MPOD page direct
Letzte Auslese: 2013-02-08 15:39

Kanal	Name	Status	An	Aus	Spannung	gem. Terminal-Sp.	Strom	gem. Strom	Kill?
101	TPC Last Strip	●	☐	☐	2756.98 V	2757 V	0.035000 mA	0.024936 mA	●
102	TPC Skirt	●	☐	☐	2741.85 V	2741.9 V	0.035000 mA	0.000000 mA	●
103	TPC GEM 1 top	●	☐	☐	2701.35 V	2701.4 V	0.035000 mA	0.000000 mA	●
104	TPC GEM 1 bottom	●	☐	☐	2377.35 V	2377.4 V	0.035000 mA	0.000000 mA	●
105	TPC GEM 2 top	●	☐	☐	1769.85 V	1769.9 V	0.005000 mA	0.000000 mA	●
106	TPC GEM 2 bottom	●	☐	☐	1474.2 V	1474.2 V	0.005000 mA	0.000000 mA	●
107	TPC GEM 3 top	●	☐	☐	866.7 V	866.7 V	0.005000 mA	0.000000 mA	●
108	TPC GEM 3 bottom	●	☐	☐	607.5 V	607.5 V	0.005000 mA	0.000000 mA	●
201	LV Silicon Strips 1	●	☐	☐	0 V	0 V	0.005000 mA	0.000001 mA	●
202	LV Silicon Strips 2	●	☐	☐	0 V	0 V	0.005000 mA	0.000001 mA	●
203	LV Silicon Strips 3	●	☐	☐	0 V	0 V	0.005000 mA	0.000001 mA	●
204	LV Silicon Strips 4	●	☐	☐	0 V	0 V	0.005000 mA	0.000001 mA	●
205	empty	●	☐	☐	0 V	0 V	0.005000 mA	0.000001 mA	●
206	empty	●	☐	☐	0 V	0 V	0.005000 mA	0.000001 mA	●
207	empty	●	☐	☐	0 V	0 V	0.005000 mA	0.000001 mA	●
208	empty	●	☐	☐	0 V	0 V	0.005000 mA	0.000001 mA	●

Fehler zurücksetzen - alle LV Kanäle

Abbildung C.2: Anzeige der zuletzt ausgelesenen Werte des MPOD-Crates.

Werte des MPOD-Crates zu sehen, enthält die Tabelle neben den Kanalnummern und den gemessenen Werten auch die dazugehörigen Sollwerte, die in der entsprechenden Datentabelle gespeicherten Alias-Namen sowie die Information darüber, ob der Kanal an- oder ausgeschaltet ist. Liegt für einen Kanal eine Fehlermeldung vor oder ist dieser nicht eingeschaltet, so wird dies anhand einer farbigen Statusmeldung deutlich gemacht und eine kurze Fehlererläuterung gegeben.

Standardmäßig wird die Seite alle 20s automatisch neu geladen, um die angezeigten Werte auf dem aktuellsten Stand zu halten. Diese Funktion kann über die Schaltfläche *‘Neu laden aus/an’* ausgestellt werden. Die Schaltfläche *‘Neu auslesen’* veranlasst den Daemon außerhalb des normalen Auslesezyklus die Parameter der Hardware abzufragen. Die *‘Voreinstellungen’*-Schaltfläche ist mit der passenden Änderungsseite verknüpft.

Je nach abgefragter Hardware lassen sich einige Parameter auch direkt in der Tabelle ändern und diese Änderungen über den Button *‘weiter’* in die Queue-Tabelle eintragen. Mit *‘Fehler zurücksetzen’* beim MPOD-Crate und dem Durchführen eines *‘Powercycle’* bei der SPS sind weitere direkte Aktionen über die passenden Schaltflächen möglich. Für diese Änderungen muss der Benutzer jedoch eingeloggt sein.

Abfrage - alte Werte

Um einzelne Kanäle über einen längeren Zeitraum beobachten oder miteinander vergleichen zu können, lassen sich über diese Seiten alle gespeicherten Werte eines bestimmten Zeitraums ausgeben. Hierzu besteht die Möglichkeit über Kontrollkästchen die gewünschten Kanäle und über ein Pull-Down-Menü den gewünschten Parameter

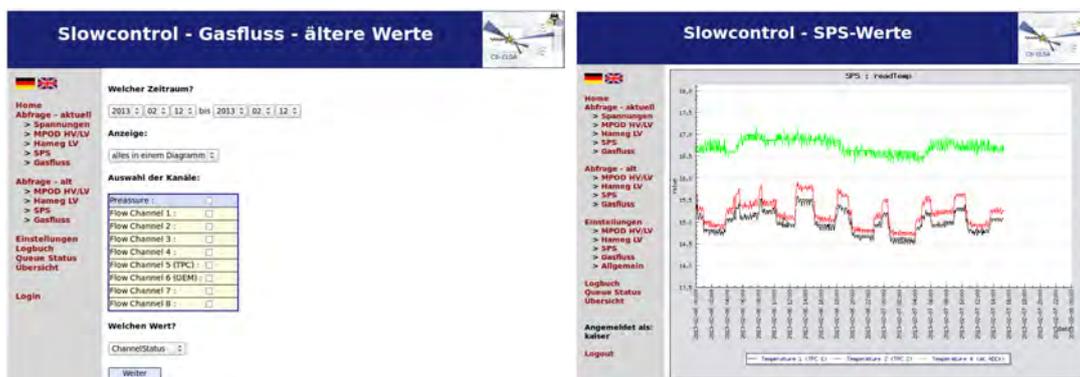


Abbildung C.3: Darstellung alter Abfragewerte: Webseite zur Auswahl von Zeitraum, Darstellungsart, Kanälen und des Parameters (links) und Graph mit dem zeitlichen Verlauf von drei abgefragten Temperaturen an der TestBench (rechts).

auszuwählen. Die Ausgabe erfolgt nach Benutzerwunsch als Textdatei, als Tabelle, kanalweise in einzelnen Graphen oder als gemeinsamer Graph für alle Kanäle, wie in Abbildung C.3 für drei Temperaturen an der TestBench gezeigt.

Änderungen



Abbildung C.4: Webseite zur Änderung der Parameter am Gassystem der TestBench.

Über die Änderungsseiten können verschiedene Parameter der jeweils gewählten Hardwarekomponente geändert werden. Um unberechtigte Zugriffe zu verhindern, sind diese Seiten nur registrierten und eingeloggten Benutzern zugänglich. Die Autorisierung wird beim Aufruf der Seite über einen beim Einloggen angelegten Cookie erfragt. Sollte dieser nicht vorhanden sein, wird der Benutzer zunächst zur Login-Seite umgeleitet. Abbildung C.4 zeigt beispielhaft die Änderungsseite für die Gasflussregler der TestBench, bei denen sich der Messbereich, der Sollwert, der Gaskorrekturfaktor, die obere

und untere Fehlergrenze sowie der An-/Aus-Zustand ändern lassen. Die zuletzt ausgelesenen Werte werden in editierbaren Feldern angezeigt und können über Schaltflächen neu aus der Datenbank geladen (*'Neu laden'*) oder neu an der Hardware abgefragt (*'Neu auslesen'*) werden. Ein weiterer Button (*'aktuelle Abfrage'*) führt zur passenden Abfrage-Seite der Hardwarekomponente.

Modifiziert der Benutzer einen oder mehrere der angezeigten Werte wird die Schaltfläche *'weiter'* zum Senden der neuen Werte freigeschaltet. Zur Sicherheit werden alle Änderungen auf der folgenden Seite aufgelistet und müssen nochmals bestätigt werden, bevor sie endgültig in die Queue-Tabelle eingetragen werden.

Allgemeine Einstellungen

Slowcontrol - Änderungen

SlowTPC-Dämon Status:

	Abfragestatus	Status im Dämon	
SPS	<input checked="" type="radio"/> Letzte Werte	<input checked="" type="radio"/> Deaktivieren	Dauert mindestens 5 Sekunden!
MKS	<input checked="" type="radio"/> Letzte Werte	<input checked="" type="radio"/> Deaktivieren	Dauert mindestens 5 Sekunden!
MPOD	<input checked="" type="radio"/> Letzte Werte	<input checked="" type="radio"/> Deaktivieren	Dauert mindestens 5 Sekunden!
HAMEG	<input checked="" type="radio"/> Letzte Werte	<input checked="" type="radio"/> Deaktivieren	Dauert mindestens 5 Sekunden!

SlowTPC-Dämon Steuerung:

SlowTPC Intervall: 600 s

Letzte Event Nummer: 69974 um 2013-02-12 16:45:05.974769+01

Beende SlowTPC-Dämon :

SlowTPC-Dämon neu starten: Dauert mindestens 5 Sekunden!

Setze SPS auf RUN :

Setze SPS auf STOP :

Schalte MPOD ein/aus :

Database:

VACUUM and ANALYZE

VACUUM only

ANALYZE only

Kanäle umbenennen:

Tabelle wählen: GasFlow

Neuer User:

Abbildung C.5: Übersicht über die allgemeinen SlowControl-Einstellungen.

Unter den allgemeinen Einstellungen (siehe Abbildung C.5) kann im ersten Abschnitt der Status der einzelnen Hardwarekomponenten im Daemon beobachtet und geändert werden. Der Abfragestatus zeigt für jede Komponente an, ob die letzte Abfrage innerhalb der eingestellten Auslesezeit erfolgt ist und gibt somit Auskunft über die Aktivi-

tät des Daemon. Der Button *‘letzte Werte’* führt zur entsprechenden Abfrage-Seite. Weiterhin ist für jede Komponente angezeigt, ob die Auslese in der `HARDWARE`-Tabelle aktiviert ist. Dieser Status im Daemon kann über die Schaltfläche *‘Aktivieren’* beziehungsweise *‘Deaktivieren’* modifiziert werden. Um die Änderung wirksam werden zu lassen, ist ein Neustart des Daemon erforderlich, welcher nach einer kurzen Wartezeit automatisch stattfindet.

Neben einem manuellen Neustart oder dem Ausschalten des Daemon kann im nächsten Abschnitt auch die Zeit eines Abfragezyklus eingestellt werden. Die aktuelle Abfragezeit wird hier ebenso angezeigt wie die zuletzt erzeugte Eventnummer. Über entsprechende Schaltflächen lassen sich die SPS und das MPOD-Crate ein- beziehungsweise ausschalten.

Die Datenbank muss von Zeit zu Zeit von ungültig gewordenen Speicherbereichen, also gelöschten Tabelleneinträgen, bereinigt werden. Der entsprechende `VACUUM`-Befehl wird im Regelfall von PostgreSQL automatisch ausgeführt, kann über die Schaltflächen *‘go for it’* jedoch auch manuell durchgeführt werden. Der Befehl `ANALYZE` aktualisiert die für eine Datenbankabfrage notwendigen Statistiken über den belegten Speicherplatz und die Gesamtzahl der Einträge in den Tabellen und ist dadurch in der Lage die Geschwindigkeit von Abfragen in einem gewissen Rahmen zu erhöhen.

Der vorletzte Abschnitt der allgemeinen Einstellungen erlaubt die Bearbeitung der in den Datentabellen abgespeicherten Alias-Namen: Nach der Auswahl einer Datentabelle aus dem Pull-Down-Menü werden die vorhandenen Alias-Namen aus der Tabelle gelesen und können auf der neu geöffneten Webseite geändert oder durch weitere Kanäle ergänzt werden.

Das Anlegen neuer Benutzer im letzten Abschnitt erfolgt ebenfalls auf einer eigenen Seite durch Eingabe eines Benutzernamens, eines Passworts und der Vergabe von Zugangsrechten mit Hilfe von Kontrollkästchen.

Logbuch

Auf der Logbuch-Startseite (siehe Abbildung C.6) lassen sich neue Logbucheinträge anlegen. Werden dabei nur die gelben Felder für den Namen und den Text ausgefüllt, so wird der Eintrag als Kommentar behandelt, andernfalls als ein Run-Eintrag mit voreingestellten Werten für nicht ausgefüllte Felder.

Für Änderungen an einem alten Eintrag muss dieser über ein Pull-Down-Menü ausgewählt und auf einer neuen Seite berichtigt werden.

Für die Abfrage alter Logbucheinträge kann ein Zeitraum eingestellt und zwischen der Darstellung aller oder gefiltert nach Kommentar- oder Run-Einträgen gewählt werden. Die Ausgabe erfolgt auf einer neuen Seite in Form einer Tabelle oder über den letzten Eintrag auf der Logbuch-Startseite als Textdatei.

Zusätzlich sind die Einträge der `LOG`-Tabelle und die gespeicherten Fehler in der Tabelle `ERROR_LIST` aus einem bestimmten oder dem gesamten vorhandenen Zeitraum abruf- und als Tabelle darstellbar.

Abbildung C.6: Startseite des elektronischen Logbuchs.

Übersicht

Die Übersichtsseite (Abbildung C.7) gibt eine kurze Zusammenfassung aller wichtigen Status- und Abfragewerte und wird alle 20s aktualisiert.

Auf der linken Seite befinden sich die Statusanzeigen des Daemon (SlowTPC), der einzelnen Komponenten (mit einer Schaltfläche, um zu den Abfrage-Seiten zu gelangen) und eine Anzeige, die Auskunft darüber gibt, ob die Hochspannung am MPOD-Crate angeschaltet ist. Ebenso ist hier der letzte Eintrag des Logbuchs dargestellt.

Auf der rechten Hälfte sind für alle angeschlossenen Kanäle die wichtigsten Abfragewerte zusammen mit dem Alias-Namen aufgelistet. Darüber hinaus wird farblich angezeigt, ob die Werte im Bereich der eingestellten Sollwerte liegen.

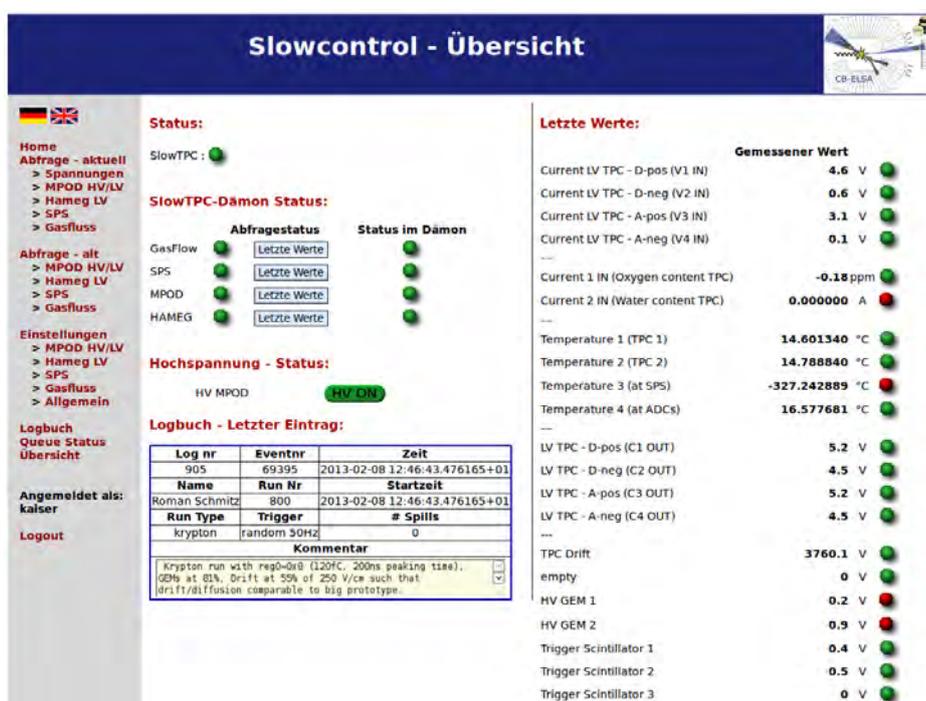


Abbildung C.7: Übersichtsseite mit allen SlowControl-Werten.

C.2 Graphische Benutzeroberfläche für die GEM-TPC

Die SlowControl-GUI für die GEM-TPC besteht aus insgesamt sechs Registerkarten: Die Einstellungen und Werte der TPC sind der Übersichtlichkeit halber auf drei Registerkarten aufgeteilt, alle zugrunde liegenden Funktionen jedoch in einer einzelnen Klasse definiert. Die weiteren Registerkarten zeigen Werte der Temperatur- und Gassensoren, das Logbuch sowie eine Übersicht über die alten, in der Datenbank gespeicherten Werte. Ihre Funktionalität erhalten sie jeweils über eigene Klassendeklarationen. Konstante Werte, wie die Anmeldeinformationen für die Datenbank, Zeitkonstanten oder die Zuordnung der Kanalnummern der einzelnen Spannungen an der TPC, werden über eine separate Datei (`SlowControl_const.h`) definiert und können während der Programmaufzeit nicht geändert werden.

Die Verbindung zur Datenbank wird beim Programmstart geöffnet und über die gesamte Programmaufzeit aufrecht erhalten. Hierdurch können verschiedene Programmteile auf diese Verbindung zurückgreifen, ohne sich gegenseitig zu blockieren. Darüber hinaus wird eine höhere Auslesegeschwindigkeit erreicht, als wenn die Verbindung für jeden Lese- oder Schreibvorgang neu aufgebaut würde.

Die regelmäßige Abfrage der Parameter aus der Datenbank wird über zwei Zeitgeber vom Typ `QTimer` realisiert (`timer_read_hv` und `timer_read_sensors`). Beim Programmstart werden diese initialisiert und gestartet. Zusätzlich sind drei weitere Zeitgeber implementiert, über die regelmäßige Überprüfungen initiiert werden, die Auskunft darüber geben, ob der Daemon nach wie vor ausgeführt wird (`timerDaemon()`), es neue aufgezeichnete Datendateien gibt (`checkNewRun()`) und wieviel Zeit die einzelnen TPC-Kanäle beim Hoch- beziehungsweise Herunterfahren der Spannungen noch benötigen (`timerRamp()`).

Startoptionen

Die GUI für die GEM-TPC lässt sich mit verschiedenen Optionen starten:

- **-h:** Es werden nur die möglichen Startoptionen angezeigt, ohne die GUI zu starten.
- **-c:** 'change-TPC-HV-anyway'-Option
Bei jedem Programmstart wird überprüft, ob bereits eine oder mehrere Instanzen der SlowControl-GUI gestartet wurden. Ist dies der Fall, wird die Steuerung der TPC-Hochspannungen bei der neu gestarteten Instanz aus Sicherheitsgründen blockiert, um das gleichzeitige Senden entgegengesetzter Befehle durch zwei verschiedene Instanzen zu verhindern. Das Betrachten der Werte ist jedoch weiterhin möglich. Um im Notfall dennoch Änderungen vornehmen zu können, kann das Programm mit dieser Option gestartet werden.
- **-l:** 'auto-logbook-entry'-Option
Diese Option ermöglicht das Benutzen des 'Auto-save'-Kontrollkästchens auf der Logbuch-Registerkarte (siehe entsprechender Abschnitt).
- **-a:** 'only-ancient-values'-Option
Mit dieser Option werden alle Zeitgeber gestoppt und die Registerkarten für die

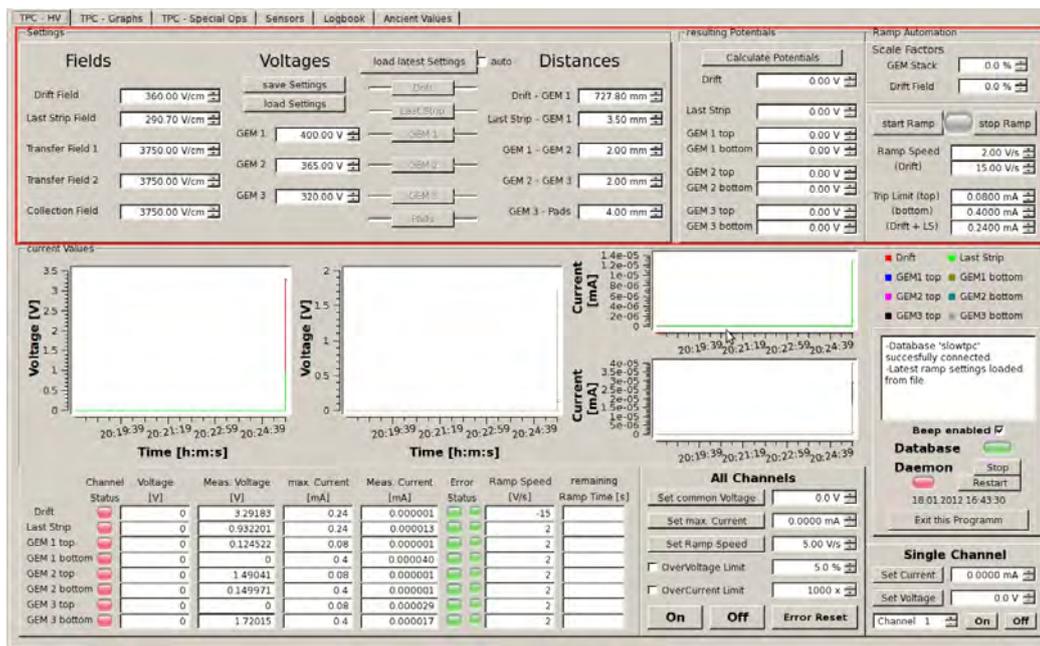


Abbildung C.8: Registerkarte 'TPC - HV' zur Steuerung und Überwachung der Spannungen, Ströme und Rampgeschwindigkeiten der GEM-TPC.

TPC und die weiteren Sensoren vollständig deaktiviert. Hierdurch werden keine aktuellen Parameter aus der Datenbank abgefragt und es sind lediglich das Logbuch und die alten Werte zugänglich.

TPC - Hochspannungseinstellungen

Über die Registerkarte 'TPC - HV' (Abbildung C.8) lassen sich die Spannungen, Ströme und Rampgeschwindigkeiten für die GEM-Folien und die Driftkathode überwachen und steuern.

Im oberen Drittel, rot markiert in Abbildung C.8, können die Stärke der elektrischen Felder (**Fields**, in Volt/Zentimeter), die Spannung zwischen Ober- und Unterseite der drei GEM-Folien (**Voltages**, in Volt) und die Abstände innerhalb der TPC (**Distances**, in Millimeter) sowie jeweils ein Skalierungsfaktor (**Scale Factors**, in %) für die GEM- und die Driftspannungen über numerische Eingabefelder vom Typ `QDoubleSpinBox` angegeben werden. Über die Schaltflächen *'save Settings'* und *'load Settings'* ist es möglich, diese Werte zusammen mit den eingestellten Rampgeschwindigkeiten und maximalen Strömen (zu finden im Abschnitt **Ramp Automation**) in einer Textdatei mit der Endung `.tpcset` zu speichern oder aus solch einer Datei zu laden. Somit lässt sich schnell zwischen verschiedenen Feldeinstellungen für die TPC wechseln.

Durch Drücken der *'Calculate Potentials'*-Schaltfläche oder automatisch bei jeder Änderung der eingestellten Werte werden die resultierenden Spannungen für die entsprechenden Kanäle des MPOD-Crates berechnet und im Abschnitt **resulting Potentials** für jeden Kanal angezeigt. Die Berechnung erfolgt über

$$\begin{aligned}
U_{GEM3 \text{ bottom}} &= D_{Pad-GEM3} \cdot F_{Collection} \cdot SF_{GEMs} \\
U_{GEM3 \text{ top}} &= U_{GEM3 \text{ bottom}} + U_{GEM3} \cdot SF_{GEMs} \\
U_{GEM2 \text{ bottom}} &= U_{GEM3 \text{ top}} + D_{GEM3-GEM2} \cdot F_{Transfer 1} \cdot SF_{GEMs} \\
U_{GEM2 \text{ top}} &= U_{GEM2 \text{ bottom}} + U_{GEM2} \cdot SF_{GEMs} \\
U_{GEM1 \text{ bottom}} &= U_{GEM2 \text{ top}} + D_{GEM2-GEM1} \cdot F_{Transfer 2} \cdot SF_{GEMs} \\
U_{GEM1 \text{ top}} &= U_{GEM1 \text{ bottom}} + U_{GEM1} \cdot SF_{GEMs} \\
U_{Last Strip} &= U_{GEM1 \text{ top}} + D_{GEM1-LS} \cdot F_{Last Strip} \cdot SF_{Drift} \\
U_{Drift} &= U_{Last Strip} + (D_{GEM1-DRIFT} - D_{GEM1-LS}) \cdot F_{Drift} \cdot SF_{Drift} .
\end{aligned}$$

Hierbei bezeichnet U die Spannung, F die Stärke des elektrischen Feldes, D den Abstand, beispielsweise zwischen zwei Folien, und SF den Skalierungsfaktor. Diese zu setzenden Spannungen sind bei Bedarf noch veränderbar, bevor sie mit Hilfe der Schaltfläche ‘*start Ramp*’ aus den Eingabefeldern ausgelesen und zusammen mit den eingestellten Rampgeschwindigkeiten und maximalen Strömen in die QUEUE-Tabelle geschrieben werden. Alle Kanäle werden zeitgleich eingeschaltet, die akustische Warnung bei Fehlern über das Kontrollkästchen ‘*Beep enabled*’ aktiviert und die verwendeten Werte in der Datei `latestTPCSettings.tpcset` abgespeichert. Diese zuletzt gesetzten Werte können somit auch in anderen Instanzen der SlowControl-GUI übernommen werden. Dies geschieht entweder manuell über die Schaltfläche ‘*load latest Settings*’ oder automatisch, sofern das Kontrollkästchen ‘*auto*’ neben dieser Schaltfläche gesetzt ist. Die Schaltfläche ‘*stop Ramp*’ schreibt die aktuell gemessenen Spannungen als Sollwert für jeden Kanal in die QUEUE-Tabelle. Hierdurch wird ein Hoch- beziehungsweise Herunterfahren der Spannungen unterbrochen, ohne dass die Kanäle ganz ausgeschaltet werden. Ob das MPOD-Crate gegenwärtig die Spannungen hoch oder herunter fährt, wird über eine gelbe LED zwischen dem beiden ‘*Ramp*’-Schaltflächen signalisiert.

Die gemessenen Drift- und die Last-Strip-Spannungen der letzten 15 Minuten werden im linken der beiden größeren Graphen in der Mitte der Registerkarte dargestellt, die sechs Spannungen an den GEM-Folien im unmittelbar daneben liegenden Graphen. In den beiden kleineren Graphen sind die entsprechenden Ströme aufgetragen. Die Legende am rechten Rand gibt Auskunft darüber, welche Kurve welchem Kanal zugeordnet ist. Bei allen Graphen wird die Skalierung der y -Achse automatisch an die jeweils größten und kleinsten aufgetragenen Werte angepasst. Die x -Achsen sind auf die Darstellung der zugehörigen Uhrzeit (hh::mm::ss) formatiert.

In dem Textfeld im Abschnitt rechts neben den Graphen werden alle vorgenommenen Änderungen, aufgetretenen Fehler oder sonstigen Informationen, welche die TPC betreffen, seit dem Start dieser SlowControl-GUI-Instanz aufgelistet. Darunter befindet sich das Kontrollkästchen ‘*Beep enabled*’, mit dem sich die akustische Warnung durch einen Systemton beim Auftreten eines Fehlers aktivieren lässt. Über zwei LEDs wird zudem darüber informiert, ob die Verbindung zur Datenbank besteht und ob der Daemon innerhalb der letzten Sekunden Werte in der Datenbank aktualisiert hat und folglich noch ausgeführt wird. Datum und Uhrzeit der letzten Aktualisierung werden als Text angezeigt. Über die Schaltflächen ‘*Stop*’ und ‘*Restart*’ ist es möglich, den Daemon zu beenden oder neu zu starten. Der Button ‘*Exit this Programm*’ beendet die GUI.

Im unteren Drittel der Registerkarte sind die Sollspannungen (**Voltage**), die gemessenen Spannungen (**Meas. Voltage**), die maximalen Ströme (**max. Current**), die gemessenen

Ströme (**Meas. Current**) und die eingestellten Rampgeschwindigkeiten für alle TPC-Kanäle wiedergegeben. Beim Rampen der Spannungen wird die verbleibende Zeit bis zum Erreichen der Sollspannung in der Spalte **remaining Ramp Time** angezeigt, positiv beim Hoch- und negativ beim Herunterfahren. Die LEDs in der ersten Spalte (**Channel Status**) illustrieren in grün, ob der zugehörige Kanal angeschaltet und fehlerfrei ist. Die kleinere der beiden LEDs in der Spalte **Error Status** gibt Auskunft darüber, ob die KILL-Option für diesen Kanal angeschaltet ist und dieser somit bei einem zu hohen Strom hardwareseitig direkt abgeschaltet wird, ohne die Spannung langsam herunter zu fahren (siehe Abschnitt 4.1.1). Ein solcher Trip wird durch die linke, größere LED in dieser Spalte angezeigt.

Zur Sicherheit lassen sich nach einem Trip die betroffenen Kanäle nicht direkt wieder anschalten. Die Fehler müssen zunächst über den Button *'Error Reset'* im Abschnitt **All Channels** zurückgesetzt werden.

Um einen Trip zu vermeiden, können eine Überspannungs- und eine Überstromschutzfunktion über entsprechende Kontrollkästchen aktiviert und angepasst werden. Die Überspannungsschutzfunktion (*'Overvoltage Limit'*) soll insbesondere die GEM-Folien vor nicht beabsichtigten Spannungserhöhungen schützen. Hierzu wird für jeden Kanal der Mittelwert der jeweils 20 letzten Messwerte berechnet. Ist dessen Abweichung vom Sollwert zu groß, wird eine Fehlermeldung ausgegeben und alle Spannungen mit der eingestellten Rampgeschwindigkeit heruntergefahren. Die erlaubte Toleranz der Abweichung lässt sich über das Eingabefeld als Prozentanteil der Sollspannung angeben. Die Überstromschutzfunktion (*'Overcurrent Limit'*) berechnet zwei Mittelwerte und vergleicht diese miteinander: Ist der Mittelwert der letzten zehn Messwerte größer als der mit dem im Eingabefeld angegebenen Faktor multiplizierte Mittelwert 20 Sekunden zuvor, werden alle Kanäle ausgeschaltet und eine Fehlermeldung ausgegeben.

Während des Rampens und bei Spannungen unter 100 V können beide Funktionen zwar aktiviert werden, eine Betrachtung der Mittelwerte und deren Abweichung vom Sollwert würde jedoch keine brauchbaren Ergebnisse bringen und wird daher nicht durchgeführt.

Die weiteren Eingabefelder im Abschnitt **All Channels** ermöglichen die Einstellung eines gemeinsamen Wertes für die Spannungen (*'Set common Voltage'*), die Ströme (*'Set max. Current'*) oder die Rampgeschwindigkeiten (*'Set Ramp Speed'*) bei allen Kanälen. Über die Schaltflächen *'On'* und *'Off'* ist es möglich, alle Kanäle gleichzeitig an- oder auszuschalten. Diese Parameter lassen sich im Abschnitt **Single Channel** oder auf der Registerkarte **'TPC - Special Ops'** auch für jeden Kanal separat setzen. Die Rampgeschwindigkeit kann nur für die Driftspannung separat eingestellt werden, da für alle restlichen Kanäle dasselbe **ISEG**-Hochspannungsmodul verwendet wird und dieses bauartbedingt nur eine Rampgeschwindigkeit für alle Kanäle zulässt.

TPC - Graphen

Die 16 Graphen auf der Registerkarte **'TPC - Graphs'** (Abbildung C.9) zeigen für jeden der acht Hochspannungskanäle der TPC die gemessenen Spannungen und Ströme in einem separaten Graphen. Die *y*-Achsen der Graphen werden automatisch skaliert, so dass kleine Änderungen an den Spannungen oder Strömen im Verlauf der dargestellten 15 Minuten leichter zu erkennen sind.

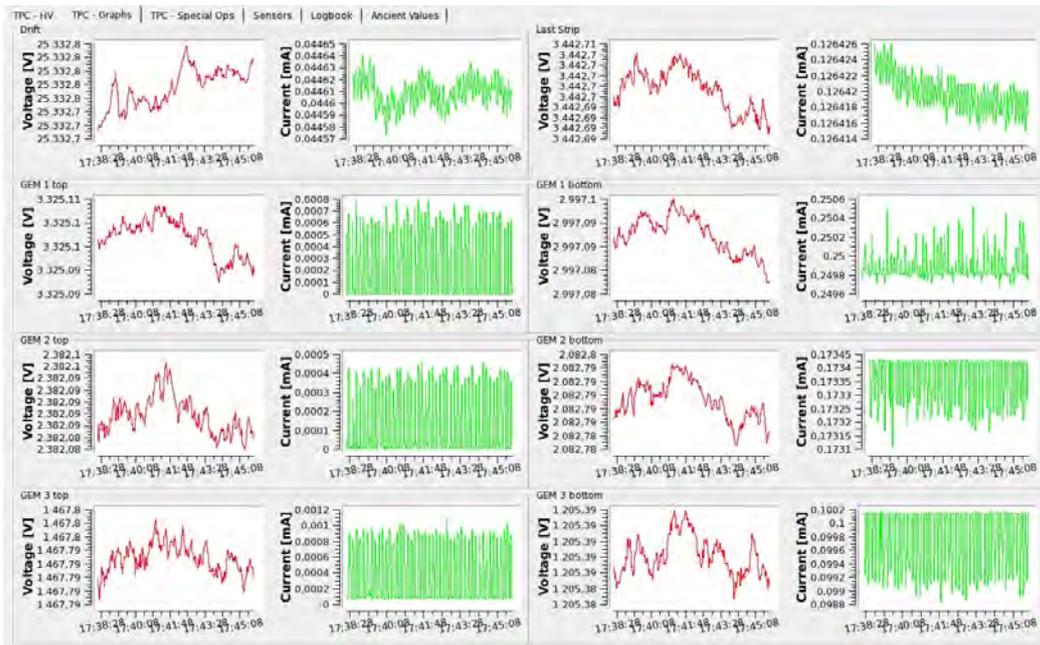


Abbildung C.9: Die Registerkarte ‘TPC - Graphs’ zeigt den Verlauf der acht gemessenen Spannungen (rot) und Ströme (grün) an der GEM-TPC für die letzten 15 Minuten.

TPC - Spezielle Funktionen

Auf der Registerkarte ‘TPC - Special Ops’ (Abbildung C.10) besteht die Möglichkeit, die Spannungen und Ströme für alle TPC-Kanäle separat einzustellen und diese einzeln an- oder auszuschalten. Die angezeigten Mess- und Sollwerte sowie die LED-Zustände sind identisch zu den Werten auf der Registerkarte ‘TPC - HV’. Um die Einstellung neuer Werte zu erleichtern, sind die Sollwerte mit Hilfe des Buttons ‘refresh values’ in die Eingabefelder übertragbar.

Die einzelnen Einstellungen lassen sich über die Schaltflächen ‘save Settings’ als Textdatei mit der Endung `.tpscs` abspeichern und mit ‘load Settings’ aus einer solchen Datei in die Eingabefelder laden.

Die verwendeten GEM-Folien sind auf einer Seite in acht Segmente unterteilt, so dass eine GEM-Folie auch bei beschädigten Sektoren benutzbar bleibt. Hierzu müssen jedoch die Spannungen an der Oberseite dieser GEM-Folie an die aufgrund der Beschädigung veränderten Widerstände angepasst werden. Diese Anpassung kann im Abschnitt ‘Dead Sectors Count’ durchgeführt werden, indem für die entsprechende GEM-Folie ein zusätzlicher Faktor gesetzt wird. Dieser Faktor fließt bei aktivierten Kontrollkästchen mit in die Berechnung der Spannungen $U_{GEM1\ top}$, $U_{GEM2\ top}$ beziehungsweise $U_{GEM3\ top}$ ein und lässt sich über

$$Faktor = \frac{10\ M\Omega + R_{GEM}}{(n + 1) \cdot 10\ M\Omega + R_{GEM}}$$

berechnen. n gibt die Anzahl der defekten Sektoren und R_{GEM} den Widerstand der defekten GEM-Folie an. Diese Funktion sollte jedoch nur mit größter Vorsicht verwenden.

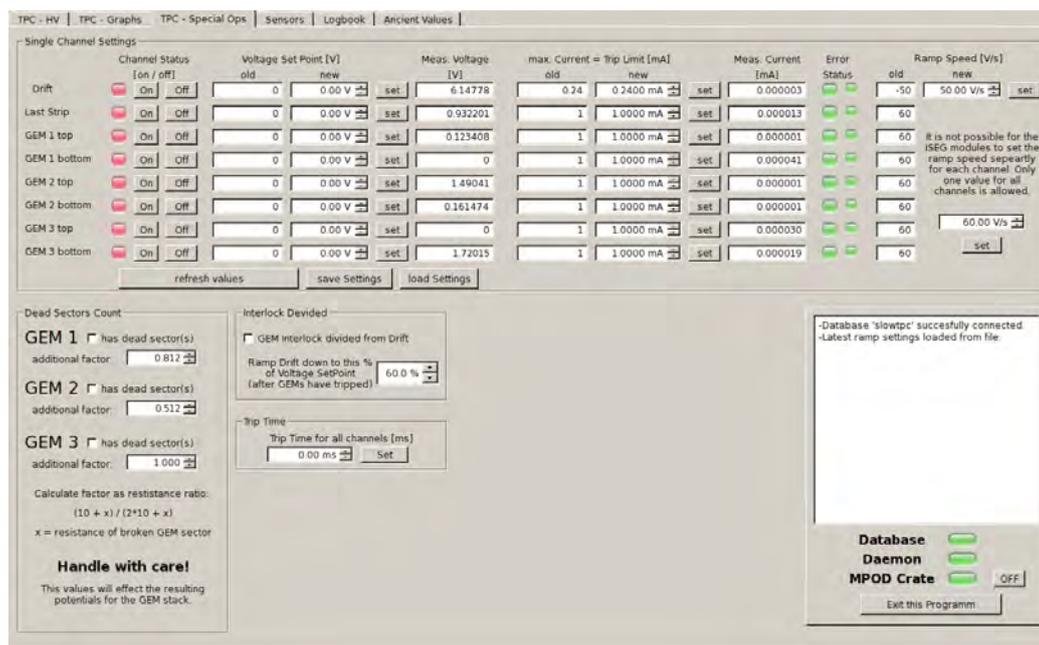


Abbildung C.10: Auf der Registerkarte ‘TPC - Special Ops’ können spezielle Einstellungen für die TPC-Hochspannungen vorgenommen werden.

det werden, da die GEM-Folien durch falsche Spannungen vollständig zerstört werden könnten.

Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, können die beiden Hochspannungsmodule über einen Interlock-Anschluss miteinander verbunden werden, damit bei einem Trip eine gemeinsame Notfallabschaltung stattfindet. Ist diese Interlock-Verbindung getrennt, sollte dies im Abschnitt ‘Interlock Divided’ angegeben werden. Im Falle eines Trips einer der Spannungen an den GEM-Folien wird die Driftspannung bei aktiviertem Kontrollkästchen auf einen unkritischen Wert heruntergefahren, jedoch nicht komplett ausgeschaltet. Dieser unkritische Wert kann über das Eingabefeld definiert werden und ergibt sich aus der angegebenen Prozentzahl und der Drift-Sollspannung.

Die Zeit, die zwischen dem Feststellen eines zu hohen Stroms und der hardwareseitigen Notabschaltung der Spannungen liegen soll, kann im Abschnitt ‘Trip Time’ eingestellt werden. Sie sollte jedoch nur in begründeten Fällen von 0ms verschieden sein, um weitere Beschädigungen zu vermeiden.

Das Textfeld im Abschnitt auf der rechten Seite zeigt die gleichen Nachrichten an, wie das Textfeld auf der ‘TPC - HV’-Registerkarte. Die LEDs darunter geben Auskunft über den Verbindungsstatus zur Datenbank, den Status des Daemons und den Status des MPOD-Crates. Über die Schaltfläche neben der MPOD-Crate-Anzeige kann das gesamte Crate aus- beziehungsweise angeschaltet werden. Zur Sicherheit muss diese Aktion in einem Pop-up-Fenster nochmals bestätigt werden.



Abbildung C.11: Die Einstellungen des Unichillers können auf der Registerkarte ‘Sensors’ vorgenommen werden (links oben). Zudem sind hier die Temperaturen auf Ausleseebene (rechts oben) und die Werte der Sensoren auf dem Media-Flansch (links unten) dargestellt.

Weitere Sensoren

Die ausgelesenen Werte des Unichillers sind auf der Registerkarte ‘Sensors’ im Abschnitt ‘Unichiller’ oben links angezeigt. Der Status wird anhand einer LED und einer genaueren Beschreibung im Textfeld darunter wiedergegeben. Mit der Schaltfläche ‘Set new SetPoint’ kann der im Eingabefeld eingestellte Wert als neuer Sollwert (Temperature SetPoint) gesetzt werden. Die beiden anderen Buttons (‘Turn ON’, ‘Turn OFF’) schalten die Temperierfunktion des Geräts an beziehungsweise aus.

Die Temperatur im Gerät (Temperature Intern) und der Ist-Wert am Messfühler (Temperature Extern) werden zudem als Graph dargestellt. Über die Beschriftung in der Legende kann gesteuert werden, welcher der Graphen angezeigt wird.

Im Abschnitt rechts oben werden die zwölf auf der Ausleseebene gemessenen Temperaturen in einem gemeinsamen Graphen und entsprechend der Position der Temperaturfühler auf der Ausleseebene wiedergegeben. Die zugehörigen LEDs weisen in rot auf eine zu hohe ($> 40\text{ °C}$) oder zu niedrige ($< 15\text{ °C}$) Temperatur hin. Im Graphen kann die Darstellung der einzelnen Temperaturfühler über die Legende gesteuert werden.

Links unten, im Abschnitt Sensors Media Flange, werden die Werte der Sensoren auf dem Media-Flansch ausgegeben. Über die LEDs wird auf eine zu große Diskrepanz zwischen den zusammengehörigen IN- und OUT-Werten hingewiesen.

Das Textfeld auf der rechten Seite zeigt die für die auf dieser Registerkarte dargestellten Sensoren vorgenommenen Änderungen, aufgetretenen Fehler oder sonstigen Informationen. Die Kontrollkästchen unterhalb der LEDs für die Datenbankverbindung und den

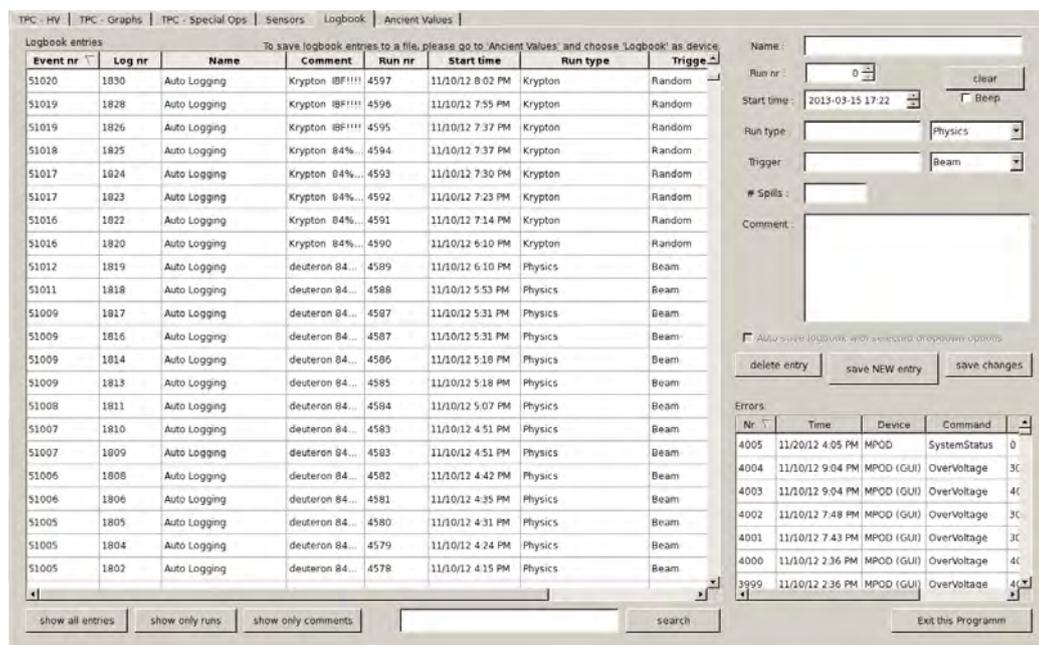


Abbildung C.12: Auf der ‘Logbook’-Registerkarte können neue Einträge zum Logbuch hinzugefügt (rechts) sowie alte Logbuch-Einträge (links) und vom Daemon erkannte Fehler (rechts unten) untersucht werden.

Daemon geben darüber Auskunft, ob die Auslese der einzelnen Hardware-Komponenten in der Tabelle `HARDWARE` aktiviert ist. Eine Änderung des Zustandes der Kontrollkästchen wird direkt in die Datenbank geschrieben, ohne jedoch den Daemon neu zu starten. Der Neustart muss manuell über die Schaltfläche `Restart` durchgeführt werden, damit die Änderungen wirksam werden.

Logbuch

Der Inhalt des elektronischen Logbuchs in der Datenbanktabelle `LOGBOOK` wird auf der Registerkarte ‘Logbook’ in einem `QTableView` ausgegeben. Diese Objektklasse bietet die Möglichkeit, eine Datenbanktabelle direkt mit einem erweiterten Textfeld zu verknüpfen, so dass alle gewünschten Spalten und Zeilen als editierbare Tabelle angezeigt werden. Die Sortierung erfolgt beim Programmstart absteigend nach der Spalte `Event Nr`, kann jedoch über die Überschrift der Spalten geändert werden.

Mit den Schaltflächen unterhalb des Textfeldes können die Einträge gefiltert werden. Über den Button ‘*show only runs*’ werden alle Kommentar-Einträge und über ‘*show only comments*’ alle Run-Einträge ausgeblendet. Mit der Schaltfläche ‘*search*’ werden nur solche Einträge angezeigt, bei denen die im Textfeld eingegebene Zeichenkette in der `Comment`-Spalte vorkommt. Mit dem Button ‘*show all entries*’ werden die Filterungen aufgehoben und alle Einträge wieder angezeigt.

Eine Ausgabe der Einträge des Logbuchs als Textdatei ist über die Registerkarte ‘Ancient Values’ möglich.

Mit den Eingabefeldern auf der rechten Seite können neue Logbucheinträge erstellt und

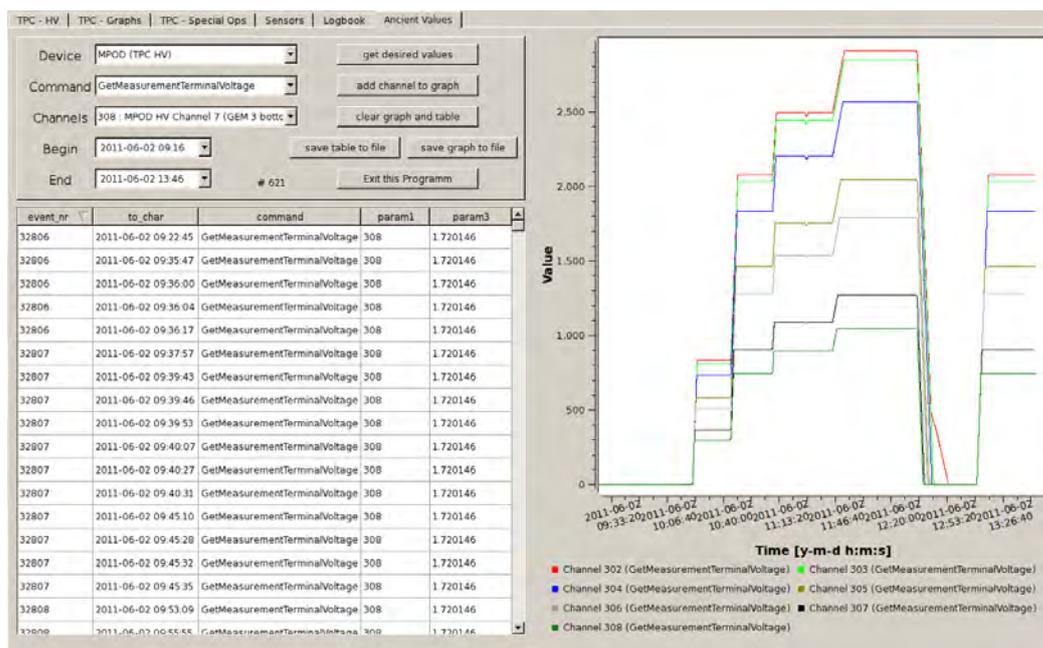


Abbildung C.13: Registerkarte ‘Ancient Values’ zum Anzeigen der in der Datenbank gespeicherten Werte.

über die Schaltfläche ‘*save NEW entry*’ gespeichert werden. Durch das Anwählen einer Tabellenzeile im Textfeld wird deren Inhalt in den zugehörigen Eingabefeldern angezeigt und es können Änderungen vorgenommen (‘*save changes*’) oder der Eintrag aus dem Logbuch gelöscht (‘*delete entry*’) werden. Der Button ‘*clear*’ löscht den Inhalt aller Eingabefelder.

Wurde die SlowControl-GUI mit der Option `-l` gestartet, lässt sich das Kontrollkästchen ‘Auto save ...’ zur automatischen Erzeugung eines neuen Logbucheintrags aktivieren. In regelmäßigen Abständen wird dann geprüft, ob die Nummer der zur Zeit weggeschriebenen Datendatei größer ist als die zuletzt gespeicherte Run-Nummer im Logbuch. Ist dies der Fall, wird ein neuer Logbucheintrag angelegt, der die Werte für Run-Typ und Trigger aus den Pull-down-Menüs, den Kommentar des vorherigen Eintrags und die aktuelle Uhrzeit als Startzeit übernimmt.

Die `QTableView` rechts unten ist mit der Tabelle `ERROR_LIST` verknüpft und zeigt die vom Daemon erkannten Fehler. Zusätzliche Informationen zu einem Fehler lassen sich in einem Pop-up-Fenster anzeigen, indem die entsprechende Zeile in der Tabelle ausgewählt wird.

Alte Werte

Alle Werte, die von der SlowControl in der Datenbank abgespeichert worden sind, lassen sich über die Registerkarte ‘Ancient Values’ (Abbildung C.13) auslesen und sowohl graphisch als auch tabellarisch darstellen. Hierzu ist es zunächst notwendig, die Einheit auszuwählen, von welcher die Werte angezeigt werden sollen. Im Aufklappmenü ‘Device’ stehen die Möglichkeiten ‘MPOD (TPC HV)’, ‘Unichiller (Cooling)’,

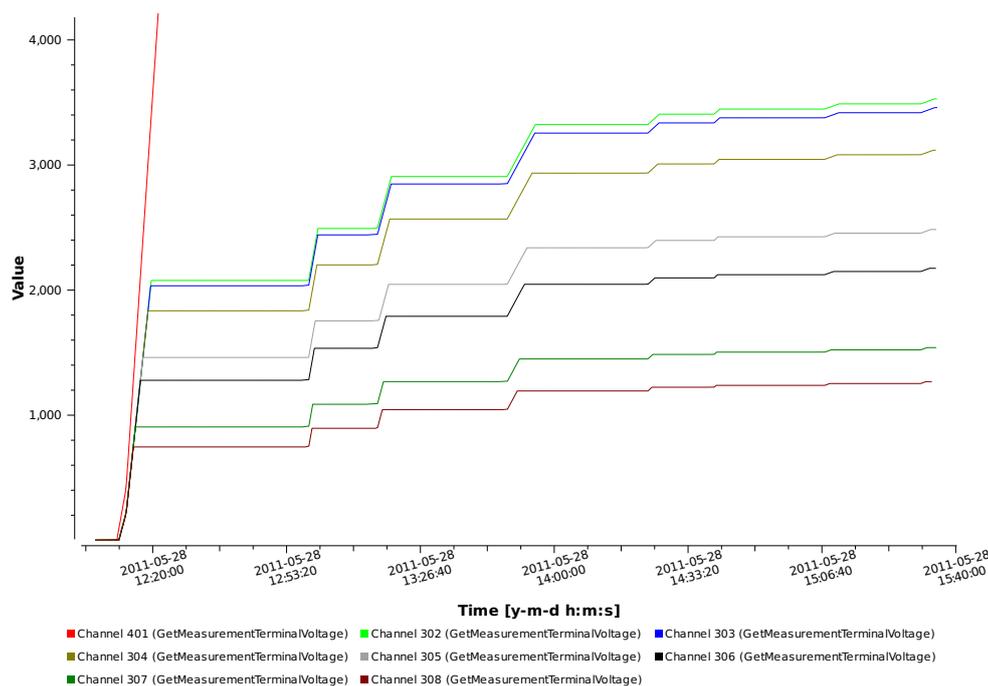


Abbildung C.14: Mit Hilfe der SlowControl-GUI erzeugte Ausgabe der an der TPC gemessenen Spannungen in einem gemeinsamen Graphen.

‘Backplane Temperature Sensors’, ‘Sensors Media Flange’ und ‘Logbook’ zur Auswahl.

Danach werden in der Datenbank automatisch die dazugehörigen Auslesewerte und -kanäle ermittelt und in den beiden Aufklappmenüs ‘Command’ und ‘Channels’ angezeigt. Weiterhin lässt sich mit ‘Begin’ und ‘End’ der Zeitraum eingrenzen, aus dem die Daten ausgegeben werden sollen.

Mit der Schaltfläche ‘*get desired values*’ werden die gewählten Werte aus der Datenbank gelesen und als Tabelle und Graph dargestellt. Die in der Tabelle ausgegebenen Werte (Ereignisnummer, Auslesezeit, Befehl, Kanalnummer und Messwert) lassen sich über die Schaltfläche ‘*save table to file*’ als Textdatei abspeichern.

Der Graph auf der rechten Seite der Registerkarte zeigt die ausgelesenen Messwerte, aufgetragen gegen die Auslesezeit. Mit der Maus kann ein gewählter Bereich des Graphen vergrößert werden. Ein Rechtsklick macht einen Vergrößerungsschritt wieder rückgängig.

In vielen Fällen ist es nützlich, die Messwerte verschiedener Kanäle direkt miteinander vergleichen zu können. Mit der Schaltfläche ‘*add channel to graph*’ werden hierzu die Messwerte für die aktuell eingestellten Parameter (Befehl, Kanal, Start- und Endzeitpunkt) dem Graphen hinzugefügt (siehe Abbildung C.14) und diese zuletzt hinzugefügten Werte in der Tabelle angezeigt. Der aktuell angezeigte Graph kann mit der Schaltfläche ‘*save graph to file*’ über ein neues Fenster in den Formaten PDF oder PS abgespeichert werden.

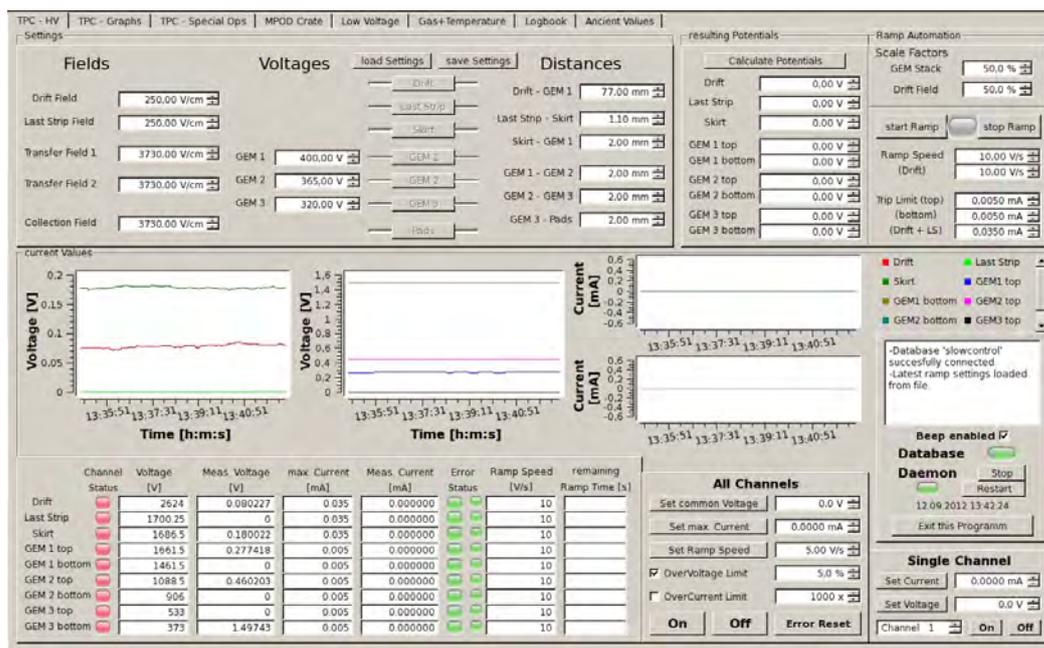


Abbildung C.15: Registerkarte 'TPC - HV' zur Steuerung und Überwachung der Spannungen, Ströme und Rampgeschwindigkeiten der Test-TPC.

C.3 Graphische Benutzeroberfläche für die TestBench

Die graphische Oberfläche für die TestBench enthält ebenfalls drei Registerkarten für die Einstellungen und Werte der TPC, die aufgrund eines zusätzlichen Kanals in der Test-TPC leicht modifiziert sind. Über weitere Registerkarten lassen sich die Werte der restlichen Kanäle des MPOD-Crates, die Niederspannungen, die Temperaturen und das Gassystem betrachten und steuern. Die Registerkarten für das Logbuch und die alten, in der Datenbank gespeicherten Werte sind bis auf die **Auto-save**-Funktion identisch mit denjenigen der GUI für die GEM-TPC.

TPC - Hochspannungseinstellungen

Wie in Abbildung C.15 zu erkennen, ist die Registerkarte 'TPC - HV' für die Steuerung der Hochspannung an der Test-TPC nahezu identisch mit der entsprechenden Registerkarte für die GEM-TPC. Lediglich der zusätzliche Kanal für die Hochspannung am *Skirt* musste in die Berechnung, die Graphen und die Ausgabe der Werte integriert werden. Aus Platzgründen wird dieser Kanal auf der 'TPC - Graphs'-Registerkarte jedoch nicht angezeigt.

Aufgrund der geringen Driftspannung von maximal 8 kV ist es zur Zeit nicht vorgesehen, die Hochspannungsmodule für die Drift- und die GEM-Spannungen über einen Interlock-Anschluss zu verbinden, so dass der entsprechende Abschnitt auf der dritten Registerkarte ('TPC - Special Ops') deaktiviert ist und nicht verwendet werden kann. Gleiches gilt für den Abschnitt 'Dead Sectors Count', da die Unterseiten der

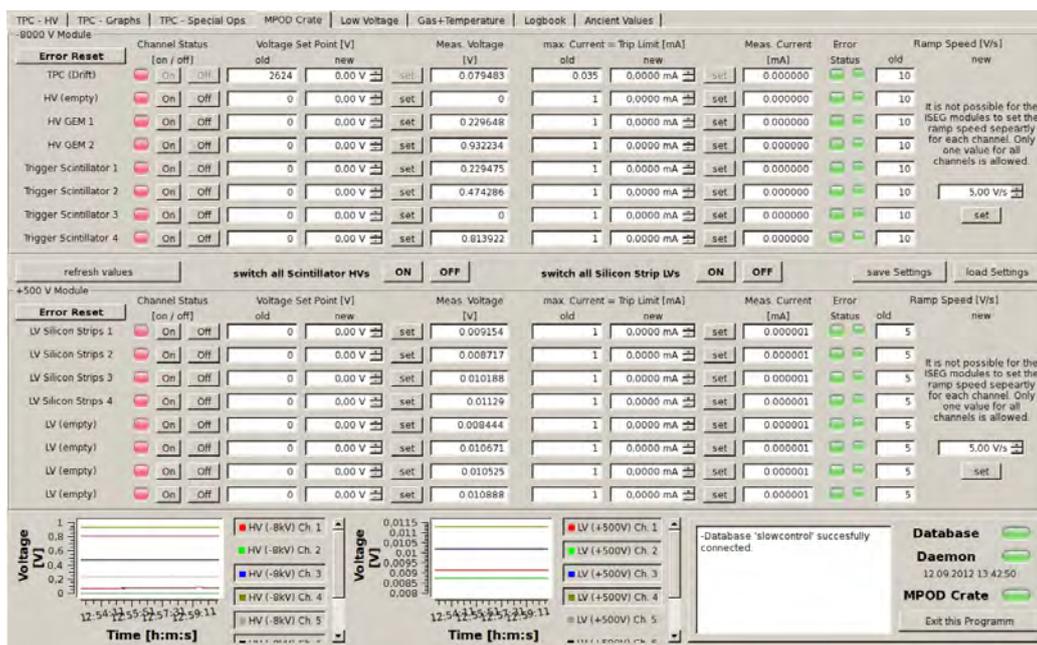


Abbildung C.16: Registerkarte 'MPOD Crate' zur Steuerung und Überwachung des 8 kV- (oben) und des 500 V-Moduls (unten) im MPOD-Crate.

GEM-Folien in der Test-TPC nicht in Sektoren aufgeteilt sind und eine beschädigte Folie direkt ausgetauscht werden muss.

MPOD Crate

Im MPOD-Crate der TestBench sind neben dem 6 kV-Modul für die Spannungen an den GEM-Folien noch zwei weitere Module eingebaut, eines mit maximal -8 kV und eines für +500 V, deren insgesamt 16 Kanäle sich über die Registerkarte 'MPOD Crate' einstellen lassen. Ausgenommen ist hiervon lediglich der erste Kanal des 8 kV-Moduls, da dieser für die Driftspannung vorgesehen ist und nur von den TPC-Registerkarten aus gesteuert werden kann.

Wie auf der Registerkarte 'TPC - Special Ops' können die Spannungen, Ströme und An-/Aus-Einstellungen auf der Registerkarte 'MPOD Crate' für jeden Kanal separat vorgenommen und ausgelesen werden, wobei das 8 kV-Modul mit den Hochspannungen für die Szintillationszähler und die GEM-Detektoren im oberen und das 500 V-Modul mit den Spannungen für die Siliziumstreifendetektoren im unteren Abschnitt zu finden ist. Die Rampgeschwindigkeiten sind erneut nur für alle Kanäle eines Moduls gemeinsam setzbar.

Um die Szintillationszähler oder die Siliziumstreifendetektoren gemeinsam an- oder auszuschalten, können die zugehörigen 'ON'- und 'OFF'-Buttons zwischen den beiden Abschnitten verwendet werden. Mit der Schaltfläche 'save Settings' werden die Einstellungen aller 16 Kanäle über ein Pop-up-Fenster in einer Textdatei mit der Endung `.mpodset` abgespeichert und mit 'load Settings' aus einer solchen Datei in die Eingabefelder geladen. Die beiden Schaltflächen 'Error Reset' setzen eventuelle Fehler des zugehörigen Moduls zurück.

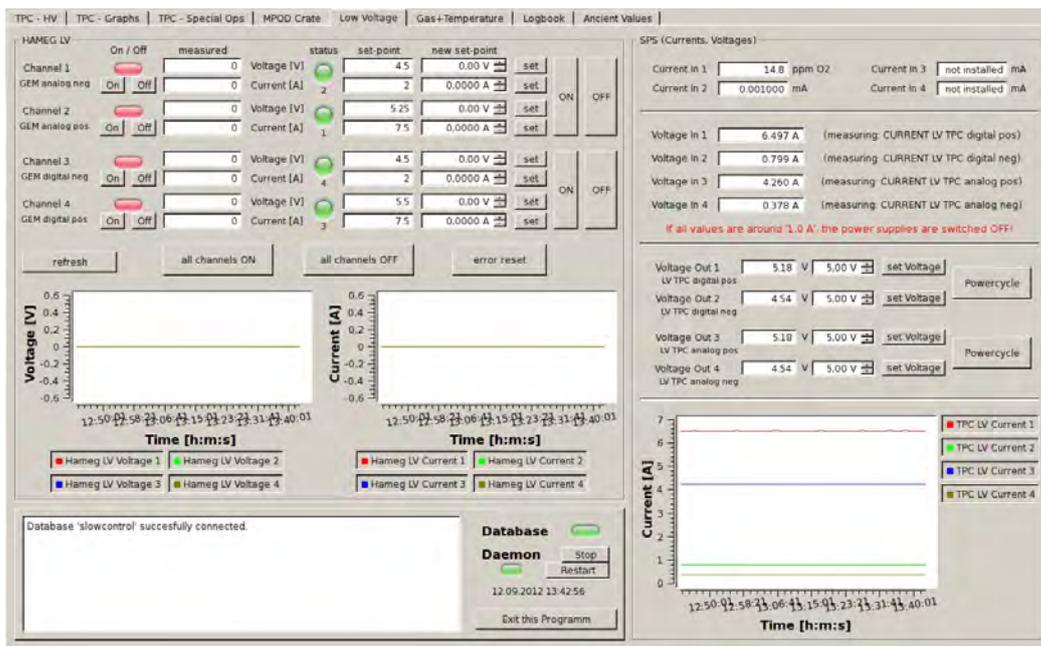


Abbildung C.17: Über die Registerkarte ‘Low Voltage’ lassen sich das HAMEG HMP4040-Labornetzgerät (links) und die Spannungen und Ströme an der SPS einstellen und überwachen.

In den beiden Graphen unten auf der Registerkarte können die anzuzeigenden Spannungen über die Beschriftung in der Legende an- und abgewählt werden. Der allgemeine Abschnitt rechts unten zeigt neben dem Textfeld für Informationen drei LEDs für den Status LV der Datenbank, des Daemons und des MPOD-Crates.

Niederspannung

Die Steuerung des HAMEG-Labornetzgeräts und die Überwachung und Einstellung der Spannungen und Ströme an der SPS erfolgt über die Registerkarte ‘Low Voltage’. Im Abschnitt HAMEG LV (links) wird für jeden der vier Kanäle der aktuelle An-/Aus-Zustand über eine LED, die gemessenen Ströme und Spannungen sowie deren Sollwerte angezeigt. Eine weitere LED gibt Auskunft darüber, ob und welche Kanäle bei einem zu hohen Strom gleichzeitig abgeschaltet werden. Während über die Schaltflächen ‘set’ die in den Eingabefeldern eingestellten, neuen Sollwerte an die Hardware gesendet werden können, bietet die GUI zudem die Möglichkeit, die Kanäle einzeln (‘On’/‘Off’-Buttons links), paarweise (‘ON’-/‘OFF’-Buttons rechts) oder alle vier gleichzeitig (‘all channels ON’-/‘all channels OFF’)

an- und auszuschalten. Der Button ‘refresh’ erfüllt, wie auf den Registerkarten für die MPOD-Crate-Einstellungen, die Funktion, die zuletzt ausgelesenen Sollwerte in die Eingabefelder zu übernehmen. Mit ‘error reset’ werden mögliche Fehler im Labornetzgerät zurückgesetzt.

Die beiden Graphen unter den Schaltflächen zeigen die gemessenen Spannungen (links) und Ströme (rechts), wobei sich über die Legende steuern lässt, welche Kanäle dargestellt werden sollen.

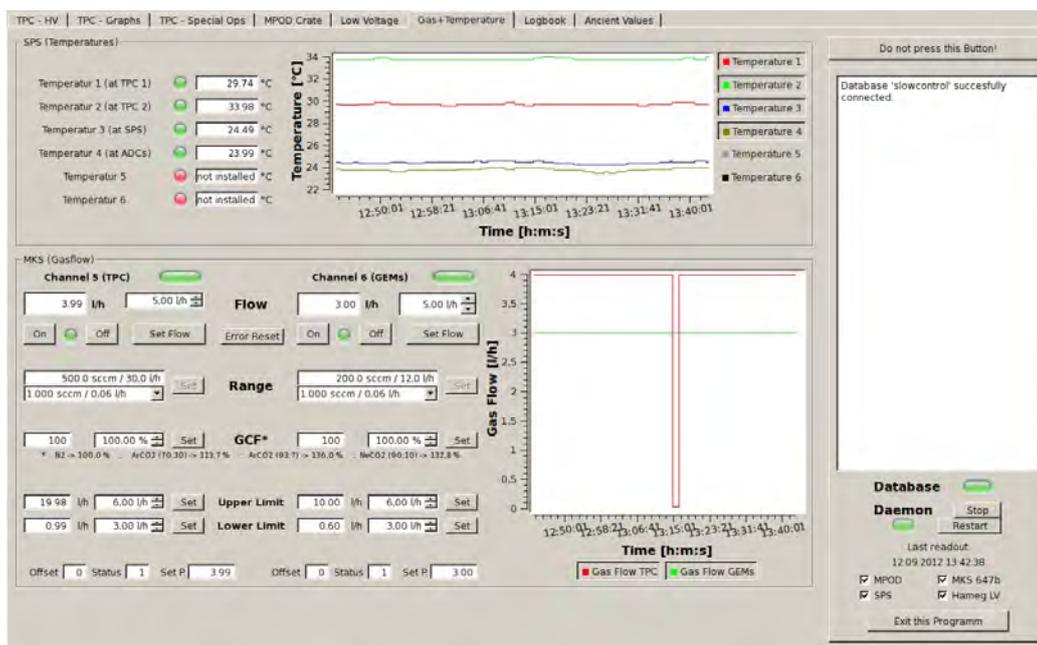


Abbildung C.18: Der obere Abschnitt auf der Registerkarte ‘Gas+Temperature’ zeigt die Temperaturen an der TestBench. Im unteren Abschnitt können die Einstellungen des Gassystems vorgenommen und die ausgelesenen Werte betrachtet werden.

Der rechte Abschnitt (SPS (Currents, Voltages)) informiert über Werte, die sich aus den mit der SPS gemessenen Strömen und Spannungen ergeben. Der gemessene Strom des Sauerstoffsensors (Current In 1) wird beispielsweise direkt als Konzentration in ‘ppm’ ausgegeben, während die vier gemessenen Spannungen (Voltage In 1-4) in den IST-Strom der „EA-PS 3016-20B“-Labornetzgeräte umgerechnet werden. Diese Ströme werden zusätzlich im Graphen rechts unten dargestellt.

Die Sollspannungen an den Labornetzgeräten können über die Schaltflächen ‘set Voltage’ neben den zugehörigen Eingabefeldern eingestellt werden. Mit den ‘Power-cycle’-Buttons wird ein Neustart der angeschlossenen Auslesekarten erzwungen, indem die Sollspannung für einige Sekunden auf 0 V und anschließend wieder auf den letzten Sollwert gesetzt wird.

Der allgemeine Abschnitt links unten zeigt, wie bei den anderen Registerkarten, ein Textfeld für Informationen und den Status der Datenbank und des Daemon als LED.

Gassystem und Temperaturen

Die an der Test-TPC und der Ausleseelektronik mit Hilfe der SPS aktuell gemessenen Temperaturen sind auf der Registerkarte ‘Gas+Temperature’ im Abschnitt SPS (Temperature) abgebildet. Der zugehörige Graph zeigt die Werte der zurückliegenden 60 Minuten.

Im Abschnitt MKS (Gasflow) können der Gasfluss (Flow), der Betriebszustand (‘ON’, ‘OFF’), der Messbereich (Range), der Gaskorrekturfaktor (GCF) und die obere und untere Warngrenze (Upper Limit, Lower Limit) für die beiden Kanäle des Gassystems

betrachtet und über die entsprechenden Eingabefelder und Schaltflächen (*'Set Flow'* beziehungsweise *'set'*) verändert werden. Die Änderung des Messbereichs der Gasflusssensoren ist normalerweise deaktiviert, da dieser von der eingebauten Hardware abhängt und somit während einer Datennahme nicht geändert werden sollte. Die Textfelder unter den Warngrenzen geben den Offset der Messung, den Status des jeweiligen Sensors und den gesetzten Sollwert (**Set P.**) wieder. Die Gasflüsse der letzten Stunde werden zudem graphisch dargestellt.

Der allgemeine Abschnitt auf der rechten Seite besteht auch hier aus einem Textfeld für die vorgenommenen Änderungen, aufgetretenen Fehler oder sonstigen Informationen sowie dem Status der Datenbank und dem des Daemon. Zusätzlich befinden sich hier vier Kontrollkästchen, über die sich der Auslesestatus der einzelnen Hardwarekomponenten in der **HARDWARE**-Tabelle einstellen lässt. Auch hier muss ein manueller Neustart des Daemon über die Schaltfläche *'Restart'* durchgeführt werden.

Logbuch und alte Werte

Die beiden Registerkarten für das Logbuch und die alten, in der Datenbank gespeicherten Werte sind nahezu identisch mit denjenigen der GUI für die GEM-TPC. Auf der Registerkarte *'Logbook'* fehlen lediglich die Pull-down-Menüs und das Kontrollkästchen für die automatische Erstellung neuer Logbucheinträge. Bei den *'Ancient Values'* musste das Aufklappmenü *'Device'* an die Hardware der TestBench angepasst werden, so dass hier *'MPOD (TPC HV)'*, *'MKS Gasflow'*, *'SPS (Temperature + LV)'*, *'HAMEG LV'* und *'Logbook'* als Möglichkeiten vorgegeben sind.

The screenshot shows the 'RunDB' application window. At the top, there are menu items: RunDB, RunDB Graph, Logbook, Errors, and Ancient Values. Below the menu is a toolbar with various checkboxes for displaying data: show run type, trigger, T2K settings, start+end time, events, gases, magnet, scales, voltages, temperatures, pressures, drift velocity, and fields. There are also buttons for 'select all', 'select none', and 'go to run_nr'. The main area is a table with columns: Run nr, Filename, Run Type, Trigger, T2K settings, Time Window, Start Time, Stop Time, Events, and Gas (N) [%]. The table contains multiple rows of run data, with the row for Run nr 4101 highlighted in blue. To the right of the table is a control panel for the selected run (Run Nr 4101). It includes fields for Filename (runC_4101), Run Type (Cosmic), Trigger (Barrel), T2K settings (E=0x61 0x100F=0x0E), Time Window (480), Start Time (2011-11-18 03:24), End Time (2011-11-18 03:42), and Events (100000). There are also input fields for various parameters like Nitrogen, TPC Argon, Gases Neon, CO2, Magnetic Field, Scale Factor Drift, and Scale factor GEMs. At the bottom right, there is a 'Calculate Mean Values' section with checkboxes for voltages, temperatures, and pressure, and buttons for 'Calculate Scale values' and 'Calculate Drift Velocity'. A text box at the bottom right displays drift and strip voltages for GEM1, GEM2, and GEM3 top and bottom.

Run nr	Filename	Run Type	Trigger	T2K settings	Time Window	Start Time	Stop Time	Events	Gas (N) [%]
4120	runC_4120	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 10:02 AM	11/18/11 10:23 AM	125473	0
4119	runC_4119	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 9:41 AM	11/18/11 10:02 AM	125853	0
4118	runC_4118	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 9:20 AM	11/18/11 9:41 AM	125760	0
4117	runC_4117	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 8:58 AM	11/18/11 9:20 AM	125379	0
4116	runC_4116	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 8:37 AM	11/18/11 8:58 AM	125511	0
4115	runC_4115	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 8:16 AM	11/18/11 8:37 AM	125810	0
4114	runC_4114	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 7:55 AM	11/18/11 8:16 AM	124951	0
4113	runC_4113	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 7:33 AM	11/18/11 7:55 AM	127853	0
4112	runC_4112	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 7:12 AM	11/18/11 7:33 AM	128672	0
4111	runC_4111	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 6:50 AM	11/18/11 7:12 AM	128040	0
4110	runC_4110	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 6:29 AM	11/18/11 6:50 AM	126730	0
4109	runC_4109	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 6:07 AM	11/18/11 6:29 AM	127146	0
4108	runC_4108	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 5:46 AM	11/18/11 6:07 AM	126680	0
4107	runC_4107	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 5:25 AM	11/18/11 5:46 AM	125656	0
4106	runC_4106	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 5:03 AM	11/18/11 5:25 AM	126077	0
4105	runC_4105	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 4:42 AM	11/18/11 5:03 AM	124721	0
4104	runC_4104	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 4:22 AM	11/18/11 4:42 AM	122905	0
4103	runC_4103	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 4:01 AM	11/18/11 4:22 AM	119445	0
4102	runC_4102	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 3:42 AM	11/18/11 4:01 AM	114899	0
4101	runC_4101	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 3:24 AM	11/18/11 3:42 AM	107844	0
4100	runC_4100	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 3:07 AM	11/18/11 3:24 AM	98615	0
4099	runC_4099	Cosmic	Barrel	0x1000=0x2...	480	11/18/11 3:00 AM	11/18/11 3:07 AM	44029	0

Abbildung C.19: Die Registerkarte 'RunDB'.

C.4 Graphische Benutzeroberfläche der Run-Datenbank

Die für die Run-Datenbank entwickelte graphische Benutzeroberfläche basiert technisch auf der SlowControl-GUI. Sie ist dabei in fünf Registerkarten unterteilt, auf denen die Werte der Run-Datenbank als Tabelle und als Graph sowie der Inhalt des Logbuchs, die Hardware-Fehler und die alten SlowControl-Werte ausgegeben werden. Die Registerkarte 'Ancient Values' wurde dabei ohne Änderung von der SlowControl-GUI der GEM-TPC übernommen.

Run-Datenbank

Die Darstellung der Run-Datenbank als Tabelle in einer `QTableView` nimmt einen Großteil der Registerkarte 'RunDB' ein (siehe Abbildung C.19). Über die Kontrollkästchen im oberen Bereich kann ausgewählt werden, welche Parameter angezeigt werden sollen. Mit den Schaltflächen 'select all' und 'select none' werden alle beziehungsweise keines der Kontrollkästchen aktiviert und die entsprechenden Parameter ausgegeben, wobei sich die Run-Nummer und der Dateiname nicht ausblenden lassen. Die Tabelle kann mit einem Klick auf die Überschrift nach den einzelnen Spalten sortiert werden. Um Einträge schneller finden zu können, erlaubt es der Button 'go to run_nr', zu dem Eintrag mit der im daneben liegenden Textfeld eingegebenen Run-Nummer zu springen.

Durch Anwählen einer Zeile in der Tabelle werden die aktivierten Werte in die zugehörigen Eingabefelder und das Textfeld auf der rechten Seite der Registerkarte übertragen. Hierdurch können Änderungen an den Werten in den Eingabefeldern vorgenommen ('save changes') oder der Eintrag aus der Run-Datenbank gelöscht ('delete

entry') werden. Zudem kann über die Schaltfläche *'save NEW entry'* aus den eingestellten Werten ein neuer Eintrag angelegt werden. Die Schaltfläche *'save list to file'* speichert die über die Kontrollkästchen ausgewählten Werte als Textdatei ab.

Über die Schaltflächen *'voltages'*, *'temperatures'*, *'pressure'* und *'all for this run'* lassen sich für den angewählten Run die Mittelwerte der GEM- und Driftspannungen, der Temperaturen auf der Ausleseebene und am Gasein- und Gasauslass, die Werte der beiden Drucksensoren am Media-Flansch sowie die jeweiligen Standardabweichungen als Fehler berechnen. Hierzu werden alle Messwerte verwendet, die für die einzelnen Spannungen, Temperaturen oder Drucksensoren zwischen der eingetragenen Start- und Endzeit des Runs in der SlowControl-Datenbank abgespeichert sind. Sollten für diesen Zeitraum keine SlowControl-Messwerte vorhanden sein, wird anstelle des Mittelwerts der Wert „-2“ in der Run-Datenbank gespeichert, um zwischen fehlenden und noch nicht berechneten Werten unterscheiden zu können.

Aus den berechneten Spannungen kann auf die eingestellten Skalierungsfaktoren und elektrischen Felder zurückgerechnet werden (*'Calculate Scale values'*), analog zu der Berechnung der Spannungen aus den Feldern in der SlowControl-GUI. Diese Berechnungen sind bisher allerdings nur für die fest implementierten Standardeinstellungen der Abstände der GEM-Folien und der GEM-Spannungen korrekt.

Mit der Schaltfläche *'Calculate Drift Velocity'* lässt sich die Driftgeschwindigkeit für die einzelnen Runs aus den vorhandenen Werten für die Lage der Kanten berechnen.

Um die Spannungen, Temperaturen und Drücke sowie die Skalierungsfaktoren und die Driftgeschwindigkeiten für alle Runs in der Run-Datenbank über die drei *'all'*-Schaltflächen berechnen zu lassen, müssen diese mit dem Kontrollkästchen *'all'* aktiviert werden.

Run-Datenbank Graph

Auf der Registerkarte *'RunDB Graph'* lassen sich die in der Run-Datenbank gespeicherten Werte in einem Graphen anzeigen und miteinander vergleichen. Mit der Schaltfläche *'get desired values'* wird der über ein Pull-Down-Menü gewählte Parameter (*'Choose value for Y axis'*) aus der Datenbank gelesen und im Graphen gegen die Run-Nummer auf der x-Achse aufgetragen. Der Bereich der angezeigten Runs wird über die beiden Eingabefelder *'Start'* und *'End'* eingestellt. Die Ausgabe der berechneten Fehler als Fehlerbalken kann über das entsprechende Kontrollkästchen gesteuert werden. Die zuletzt zum Graph hinzugefügten Werte werden zudem im Textfeld als Tabelle angezeigt.

Für eine genauere Betrachtung der Werte kann der Graph beliebig oft vergrößert werden, indem mit der Maus ein Kasten um den gewünschten Bereich gezogen wird. Ein Rechtsklick in den Graphen macht einen Vergrößerungsschritt wieder rückgängig. Mit der Schaltfläche *'save graph to file'* kann der aktuell angezeigte Graph über ein neues Fenster in den Formaten PDF oder PS abgespeichert werden.

Über das zweite Pull-Down-Menü (*'Choose value for additional Y axis'*), welches sich über ein Kontrollkästchen aktivieren lässt, kann ein zweiter Parameter mit eigener y-Achsenbeschriftung auf der rechten Seite des Graphen ausgegeben werden. Die Ausgabe weiterer Parameter ist zudem mit der Schaltfläche *'add values to graph'* möglich.

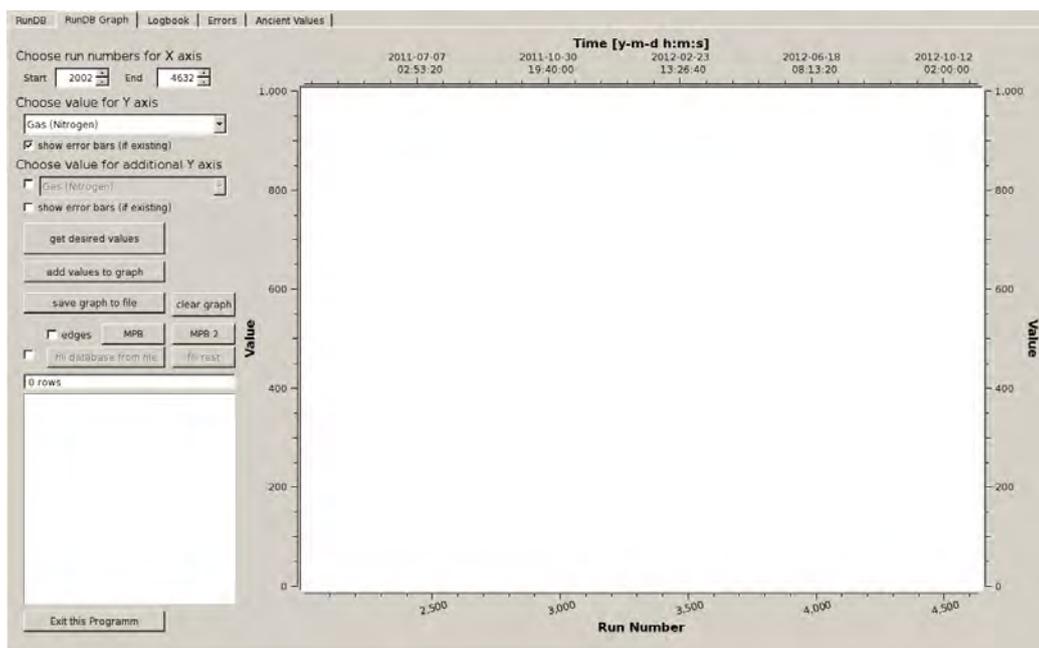


Abbildung C.20: Die Werte der Run-Datenbank können auf der Registerkarte ‘RunDB Graph’ graphisch dargestellt, miteinander verglichen und in den Formaten PDF oder PS abgespeichert werden.

Allerdings wird hierbei die ursprüngliche y-Achse automatisch skaliert, so dass bei Parametern unterschiedlicher Größenordnung keine Variationen zu erkennen sind. Um sich beispielsweise alle Temperaturen gleichzeitig anzeigen zu lassen ist die Schaltfläche ‘*add values to graph*’ hingegen sehr gut geeignet.

Die weiteren Schaltflächen ‘*fill database from file*’, ‘*fill rest*’, ‘*MPB*’) sind mit wechselnden Funktionen belegt und sollten nur bei genauer Kenntnis verwendet werden. Hier können beispielsweise verschiedene Werte aus Textdateien eingelesen und in der Datenbank gespeichert oder die durch die Driftkathode und dem *Last Strip* gebildeten Widerstände berechnet werden.

Logbuch und Fehler

Die Darstellung und Funktionalität der ‘Logbook’-Registerkarte wurde weitestgehend von der SlowControl-GUI übernommen wie in Abbildung C.21 zu erkennen ist. Lediglich eine Schaltfläche zum Aktualisieren des Logbuchs (‘*refresh*’) wurde hinzugefügt und die für die ‘Auto-save’-Funktion notwendigen Steuerelemente und die Anzeige der vom Daemon erkannten Fehler von der Registerkarte entfernt, da eine automatische Erzeugung neuer Logbucheinträge bei der Auswertung der Daten nicht sinnvoll ist. Die Fehlermeldungen werden der Übersichtlichkeit halber auf einer eigenen Registerkarte angezeigt (Registerkarte ‘Errors’, siehe Abbildung C.22). Hierdurch ist es möglich, mehr Informationen zu den einzelnen Fehlern abzufragen, diese gegebenenfalls mit der Schaltfläche ‘*delete this entry*’ zu löschen oder alle Fehler als Textdatei abzuspeichern (‘*save error list to file*’).

Logbook entries

To save logbook entries to a file, please go to 'Ancient Values' and choose 'Logbook' as device

Event nr	Log nr	Name	Comment	Run nr	Start time	Run type	Trigger
51108	1866	Auto Logging	IBF 84%drift.	4631	11/11/12 6:15 PM	Beam	Beam
51108	1864	Auto Logging	IBF 84%drift.	4630	11/11/12 6:15 PM	Beam	Beam
51108	1863	Auto Logging	IBF 84%drift.	4629	11/11/12 6:15 PM	Beam	Beam
51107	1862	Auto Logging	Problems wit...	4628	11/11/12 6:13 PM	Cosmics	Barrel
51107	1861	Auto Logging	Problems wit...	4627	11/11/12 6:10 PM	Cosmics	Barrel
51104	1860	Auto Logging	Problems wit...	4626	11/11/12 5:16 PM	Cosmics	Barrel
51100	1858	Auto Logging	Problems wit...	4625	11/11/12 3:09 PM	Cosmics	Barrel
51099	1857	Auto Logging	Problems wit...	4624	11/11/12 3:09 PM	Cosmics	Barrel
51096	1855	Auto Logging	Deterin bea...	4623	11/11/12 3:09 PM	Deuteron	Beam
51095	1854	Auto Logging	Deterin bea...	4622	11/11/12 2:55 PM	Deuteron	Beam
51094	1853	Auto Logging	Deterin bea...	4621	11/11/12 2:55 PM	Deuteron	Beam
51094	1852	Auto Logging	Deterin bea...	4620	11/11/12 2:51 PM	Deuteron	Beam
51094	1851	Auto Logging	Deterin bea...	4619	11/11/12 2:31 PM	Deuteron	Beam
51094	1850	Auto Logging	Deterin bea...	4618	11/11/12 2:31 PM	Deuteron	Beam
51093	1849	Auto Logging	Deterin bea...	4617	11/11/12 2:01 PM	Deuteron	Beam
51093	1848	Auto Logging	Deterin bea...	4617	11/11/12 2:31 PM	Deuteron	Beam
51093	1847	Auto Logging	Deterin bea...	4616	11/11/12 2:30 PM	Deuteron	Beam
51092	1846	Auto Logging	Deterin bea...	4614	11/11/12 2:01 PM	Deuteron	Beam
51091	1845	Auto Logging	Deterin bea...	4614	11/11/12 2:21 PM	Deuteron	Beam
51091	1844	Auto Logging	Deterin bea...	4612	11/11/12 2:01 PM	Deuteron	Beam
51090	1843	Auto Logging	Deterin bea...	4610	11/10/12 8:52 PM	Deuteron	Beam
51089	1842	Auto Logging	Deterin bea...	4609	11/10/12 8:52 PM	Deuteron	Beam
51088	1841	Auto Logging	Deterin bea...	4608	11/10/12 8:52 PM	Deuteron	Beam
51088	1840	Auto Logging	Cosmics. IBF111	4607	11/11/12 1:25 PM	Cosmics	Barrel

show all entries only runs only comments

search comments

Name:

Run nr:

Start time: 2013-07-15 14:32

Run type: clear

Trigger: Beep

Spills:

Comment: Database 'slowpc' successfully connected.

delete entry save NEW entry save changes

refresh

Exit this Programm

Abbildung C.21: Die Einträge des Logbuchs können auf der Registerkarte 'Logbook' untersucht und verändert werden.

Error List entries

Nr	Time	Device	Command	Channel	Setpoint Value	measured Value
4085	4/25/13 4:13 PM	MPOD	ChannelStatus	302		404
4084	4/25/13 4:13 PM	MPOD	SystemStatus	0		880
4083	4/25/13 4:13 PM	MPOD	ChannelStatus	302		404
4082	4/25/13 4:07 PM	MPOD	ChannelStatus	302		404
4081	4/18/13 12:08 PM	MPOD (GUI)	OverVoltage	303	3353	2019.58
4080	4/18/13 12:08 PM	MPOD (GUI)	OverVoltage	302	3427	2063.33
4079	4/18/13 12:08 PM	MPOD (GUI)	OverVoltage	401	28041	16549.3
4078	4/3/13 2:51 PM	MPOD	ChannelStatus	304		404
4077	4/3/13 2:51 PM	MPOD	ChannelStatus	303		404
4076	4/3/13 2:51 PM	MPOD	ChannelStatus	302		404
4075	4/3/13 2:51 PM	MPOD	ChannelStatus	303		8024
4074	4/3/13 2:51 PM	MPOD	ChannelStatus	302		9024
4073	4/3/13 2:48 PM	MPOD	ChannelStatus	303		404
4072	4/3/13 2:48 PM	MPOD	ChannelStatus	302		404
4071	4/3/13 2:48 PM	MPOD	ChannelStatus	304		404
4070	4/3/13 2:48 PM	MPOD	ChannelStatus	303		8024
4069	4/3/13 2:48 PM	MPOD	ChannelStatus	302		8024
4068	4/3/13 2:46 PM	MPOD	ChannelStatus	304		404
4067	4/3/13 2:46 PM	MPOD	ChannelStatus	302		404
4066	4/3/13 2:46 PM	MPOD	ChannelStatus	303		404
4065	4/3/13 2:31 PM	MPOD	ChannelStatus	306		404
4064	4/3/13 2:31 PM	MPOD	ChannelStatus	305		404
4063	4/3/13 2:31 PM	MPOD	ChannelStatus	304		404
4062	4/3/13 2:31 PM	MPOD	ChannelStatus	303		404

refresh

Error nr:

Time: 2013-07-15 14:52

Device:

Command:

Channel:

Values

Set Point:

measured:

MPOD Status Error: MPOD Status Error:

delete this entry

save error list to file

Exit this Programm

Abbildung C.22: Die Registerkarte 'Errors' zeigt die vom Daemon erkannten Fehler an.

D Quellcode

D.1 Hauptprogramme der beiden Daemon

TestBench (SlowTPC.cpp)

```
1 #define MPOD_IP_ADR_NEW "10.0.0.2"
  // #define MPOD_IP_ADR_NEW "mpodcrate1.cb.uni-bonn.de"

  #include "MPOD_new.h"
  #include "MKS_647B.h"
6 #include "SPS.h"
  #include "HAMEG_4040.h"

  #define UNIX_STYLE
  #define SERVER_PORT 10001
11 #define HAMEG_PORT 50003
  #define QUEUE_MAX 5000

  #define SENSORS_LOOP 20
  #define HAMEG_LOOP 10
16  ost::Slog slowctrllog;

  int main(int argc, char **argv) {
    int a,b, channel[QUEUE_MAX], value[QUEUE_MAX], doCom[QUEUE_MAX], doDaemonStop, i_max,
      newStart, zahltemp, countSensors, countHameg,
21  endprogramm, slowIntervall, queue_id, connected_mks, connected_sps, connected_mpod,
      connected_hameg, device, status;
    float d, value_f[QUEUE_MAX];
    char query[500], time_query[500], del_query[500], *clean_time_string;
    timeval start, end, start_vacuum, end_vacuum;
    time_t clean_time;
26
    MKS_647B newMKS(SERVER_PORT);
    Sps_Tpc newSPS;
    MPOD_new newMPOD;
    HAMEG_4040 newHAMEG (HAMEG_PORT);
31
    PGresult *res, *res1, *res2, *vacuumRes, *delquery;
    PGconn * conn;

    slowctrllog.clogEnable (false);
36
    status=3;
    device=0;
    endprogramm=1;
    connected_mks=0;
41  connected_sps=0;
    connected_mpod=0;
    connected_hameg=0;
    countSensors=0;
    countHameg=0;
46
    doDaemonStop=0;
    slowIntervall=300;
    newStart=1;
    queue_id=0;
51  i_max=0;
    for (int n=0; n<QUEUE_MAX;n++){
      doCom[n]=0;
      channel[n]=0;
      value[n]=0;
56  }

    /* Check, which hardware is connected and checked in */
    conn=sql_connect();
    memset(query,0,sizeof(query));
61  sprintf(query, "SELECT status_code,device FROM hardware WHERE device>5");
    res2=PQexec(conn, query);

    for (int i=0;i<PQntuples(res2);i++) {
      status=atoi(PQgetvalue(res2,i,0));
      device=atoi(PQgetvalue(res2,i,1));
66  if (device==7 && status==0) {
        connected_sps=newSPS.connectSPS();
        if (connected_sps==0) {connected_sps++; endprogramm=0; printf("SPS checked.\n");}
        else { endprogramm=1; printf("SlowTPC not started: Failure staring SPS readout.\n");}
      }
71  } else if (device==8 && status==0) {
        connected_mks=newMKS.connectMKS();
        if (connected_mks==1) {endprogramm=0; printf("MKS checked.\n");}
      }
    }
  }
}
```

```

    else { endprogramm=1; printf("SlowTPC not started: Failure staring MKS readout.\n");
    }
} else if (device==9 && status==0) {
76   connected_mpod=newMPOD.connectMPOD();
    if (connected_mpod==1) {endprogramm=0; printf("MPOD checked.\n");}
    else { endprogramm=1; printf("SlowTPC not started: Failure staring MPOD readout.\n");
    }
} else if (device==6 && status==0) {
81   connected_hameg=newHAMEG.connectHAMEG();
    if (connected_hameg==1) {endprogramm=0; printf("HAMEG checked.\n");}
    else { endprogramm=1; printf("SlowTPC not started: Failure staring HAMEG readout.\n")
    ; }
}
}
PQclear(res2);
86   sql_disconnect(conn);
    gettimeofday(&start_vacuum, 0);

/***** main routine *****/
91   while (!endprogramm) {
        conn=sql_connect();

        /* Clean up database table 'aktuell' every two hours (=7200 sec) */
        gettimeofday(&end_vacuum, 0);
96         if ((end_vacuum.tv_sec - start_vacuum.tv_sec > 7200) || newStart) {
            clean_time=time(NULL);
            clean_time_string=ctime(&clean_time);
            clean_time_string[strlen(clean_time_string)-1]=0;

            memset(query,0,sizeof(query));
            sprintf(query,"VACUUM FULL ANALYZE aktuell");
            vacuumRes=PQexec(conn,query);
            PQclear(vacuumRes);
            printf("Cleaned up database table 'aktuell' at %s.\n",clean_time_string);
            gettimeofday(&start_vacuum, 0);
106        }

        /* Create new event number */
        memset(query,0,sizeof(query));
        sprintf(query,"INSERT INTO events VALUES (nextval('events_seq'),NOW(),null)");
111        res1=PQexec(conn,query);
            PQclear(res1);

        /* Get latest event number */
        memset(query,0,sizeof(query));
116        printf(query,"SELECT max(event) FROM events");
            res2=PQexec(conn,query);
            zahltemp=atoi(PQgetvalue(res2,0,0));
            PQclear(res2);

121        sql_disconnect(conn);

        /* Connect all active devices and do a completeStatus */
        if (newStart) {
            if (connected_sps) {newSPS.logChange("daemonStart"); newSPS.completeReadout(newSPS.dc
126             ,zahltemp);}
            if (connected_mks) {newMKS.logChange("daemonStart"); newMKS.completeStatus(zahltemp)
            ;}
            if (connected_mpod) {newMPOD.logCommand("daemonStart"); newMPOD.completeStatus(
            zahltemp);}
            if (connected_hameg) {newHAMEG.logChange("daemonStart"); newHAMEG.completeStatus(
            zahltemp);}
        } else {
131         if (connected_sps) {newSPS.completeReadout(newSPS.dc,zahltemp);}
            if (connected_mks) {newMKS.shortStatus(zahltemp);}
            if (connected_mpod) {newMPOD.shortStatus(zahltemp);}
            if (connected_hameg) {newHAMEG.shortStatus(zahltemp);}
        }

136 /***** main readout- and check-Queue- Loop *****/
        gettimeofday(&start, 0);
        do {
            memset(query,0,sizeof(query));
            memset(time_query,0,sizeof(time_query));
141            memset(del_query,0,sizeof(del_query));
            conn=sql_connect();

            /* deleting odd 'daemonStop' */
            if (newStart) {
146             sprintf(query,"DELETE FROM queue WHERE device_id>5 AND command='daemonStop'");
                res=PQexec(conn,query);
                printf("Deleting odd 'daemonStop' from QUEUE (if necessary).\n");
                PQclear(res);
            }

151            /* fast readout */
            if (countSensors>SENSORS_LOOP) { //readout sensors every SENSORS_LOOP - loops
                if (connected_sps) newSPS.FASTstatus (newSPS.dc);
                if (connected_mks) newMKS.FASTstatus ();
            }
            countSensors = 0;
        }
    }
}

```

```

if (countHameg>HAMEG_LOOP) { //readout Hameg LV every HAMEG_LOOP - loops
    if (connected_hameg) newHAMEG.FASTstatus ();
    countHameg = 0;
161 }
if (connected_mpod) newMPOD.FASTstatus ();

/* get new commands from Queue */
sprintf(query, "SELECT command,param1,param3,queue_id FROM queue WHERE device_id>5 ORDER
166 BY queue_id LIMIT %d", QUEUE_MAX);
res1=PQexec(conn,query);

if (PQntuples(res1)>0) {
for(int i=0;i<PQntuples(res1);i++){
171 char temp[255];

sprintf(temp, "%s", PQgetvalue(res1,i,0));
channel[i]=atoi(PQgetvalue(res1,i,1));
value[i]=atoi(PQgetvalue(res1,i,2));
queue_id=atoi(PQgetvalue(res1,i,3));
176

/* check active queue-row for known (= possible) commands */
/* MARK: commands that do not appear here will be ignored and deleted */
if (strstr(temp, "daemonStop")){ endprogramm=1; }
/***** MKS gasflow commands *****/
181 if (connected_mks) {
if (strstr(temp, "MKSread")){ doCom[i]=1; }
else if (strstr(temp, "MKScompleteRead")){ doCom[i]=2; }
else if (strstr(temp, "MKSchannelOff")){ doCom[i]=3; }
else if (strstr(temp, "MKSchannelOn")){ doCom[i]=4; }
186 else if (strstr(temp, "MKSsetFlowSetpoint")){ doCom[i]=5; }
else if (strstr(temp, "MKSsetFlowRange")){ doCom[i]=6; }
else if (strstr(temp, "MKSsetGCF")){ doCom[i]=7; }
else if (strstr(temp, "MKSsetUpperLimit")){ doCom[i]=8; }
else if (strstr(temp, "MKSsetLowerLimit")){ doCom[i]=9; }
191 else if (strstr(temp, "MKSsetPressure")){ doCom[i]=10; }
else if (strstr(temp, "MKSsetPressureRange")){ doCom[i]=11; }
else if (strstr(temp, "MKShardwareReset")){ doCom[i]=70; }
}
/***** SPS commands *****/
196 if (connected_sps) {
if (strstr(temp, "SPSreadAll")){ doCom[i]=12; }
else if (strstr(temp, "SPSstart")){ doCom[i]=13; }
else if (strstr(temp, "SPSstop")){ doCom[i]=14; }
else if (strstr(temp, "SPSpowercycle")){ doCom[i]=15; }
201 else if (strstr(temp, "SPSsetCur")){ doCom[i]=16; }
else if (strstr(temp, "SPSsingleRead")){ doCom[i]=17; }
}
/***** MPOD commands *****/
if (connected_mpod) {
206 if (strstr(temp, "MPODcompleteStatus")){ doCom[i]=18; }
else if (strstr(temp, "MPODshortStatus")){ doCom[i]=19; }
else if (strstr(temp, "MPODsetVoltage")){ doCom[i]=20; value_f[i]=atof(PQgetvalue(res1
,i,2));}
else if (strstr(temp, "MPODsetCurrent")){ doCom[i]=21; value_f[i]=atof(PQgetvalue(res1
,i,2));}
else if (strstr(temp, "MPODsetRiseRate")){ doCom[i]=22; value_f[i]=atof(PQgetvalue(
res1,i,2));}
211 else if (strstr(temp, "MPODsetFallRate")){ doCom[i]=23; value_f[i]=atof(PQgetvalue(
res1,i,2));}
else if (strstr(temp, "MPODsetMaxSenseVoltage")){ doCom[i]=24; value_f[i]=atof(
PQgetvalue(res1,i,2));}
else if (strstr(temp, "MPODsetMaxTerminalVoltage")){ doCom[i]=25; value_f[i]=atof(
PQgetvalue(res1,i,2));}
else if (strstr(temp, "MPODsetMaxCurrent")){ doCom[i]=26; value_f[i]=atof(PQgetvalue(
res1,i,2));}
216 else if (strstr(temp, "MPODgetMeasurementSenseVoltage")){ doCom[i]=27; }
else if (strstr(temp, "MPODgetMeasurementTerminalVoltage")){ doCom[i]=28; }
else if (strstr(temp, "MPODgetMeasurementCurrent")){ doCom[i]=29; }
else if (strstr(temp, "MPODchannel_OnOff")){ doCom[i]=30; }
else if (strstr(temp, "MPODsystem_OnOff")){ doCom[i]=31; }
else if (strstr(temp, "MPODchannelOn")){ doCom[i]=32; }
221 else if (strstr(temp, "MPODchannelOff")){ doCom[i]=33; }
else if (strstr(temp, "MPODsystemOn")){ doCom[i]=34; }
else if (strstr(temp, "MPODsystemOff")){ doCom[i]=35; }
else if (strstr(temp, "MPODerrorResetGroup")){ doCom[i]=36; }
else if (strstr(temp, "MPODerrorResetChannel")){ doCom[i]=37; }
226 else if (strstr(temp, "MPODsetTripTimeMaxCurrent")){ doCom[i]=38; value_f[i]=atof(
PQgetvalue(res1,i,2));}
}
/***** HAMEG commands *****/
if (connected_hameg) {
if (strstr(temp, "HAMEGcompleteStatus")){ doCom[i]=40; }
231 else if (strstr(temp, "HAMEGshortStatus")){ doCom[i]=41; }
else if (strstr(temp, "HAMEGallOn")){ doCom[i]=42; }
else if (strstr(temp, "HAMEGalloff")){ doCom[i]=43; }
else if (strstr(temp, "HAMEGchannelOn")){ doCom[i]=44; }
else if (strstr(temp, "HAMEGchannelOff")){ doCom[i]=45; }
236 else if (strstr(temp, "HAMEGsetVoltage")){ doCom[i]=46; value_f[i]=atof(PQgetvalue(
res1,i,2));}
else if (strstr(temp, "HAMEGsetCurrent")){ doCom[i]=47; value_f[i]=atof(PQgetvalue(
res1,i,2));}
}

```

```

    else if (strstr(temp, "HAMEGsetFuseStatus")){ doCom[i]=48; }
    else if (strstr(temp, "HAMEGsetFuseLinkComplete")){ doCom[i]=49; }
241  else if (strstr(temp, "HAMEGsetFuseDelay")){ doCom[i]=50; }
    else if (strstr(temp, "HAMEGsetCommonCommands")){ doCom[i]=51; }
    else if (strstr(temp, "HAMEGgetCommonCommands")){ doCom[i]=52; }
    }
    /* delete active queue-row */
    sprintf(del_query, "DELETE FROM queue WHERE device_id>5 AND queue_id=%d", queue_id);
246  delquery=PQexec(conn, del_query);
    PQclear(delquery);
    i_max=i;
  }
}
251  PQclear(res1);

/* get (new) time for duration of main readout loop */
sprintf(time_query, "SELECT time_intervall FROM config WHERE id=3");
res=PQexec(conn, time_query);
256  slowIntervall=atoi(PQgetvalue(res, 0, 0));
    PQclear(res);

    sql_disconnect(conn);

261  newStart=0;

/* process known (=possible) commands */
for (int l=0; l<=i_max; l++) {
266  switch (doCom[l]) {
    /***** MKS gasflow commands *****/
    case 1: newMKS.shortStatus(zahltemp);
            break;
271  case 2: newMKS.completeStatus(zahltemp);
            break;
    case 3: printf("MKS - Now turning off Channel %d.\n", channel[l]);
            newMKS.channelOff(channel[l]);
            newMKS.shortStatus(zahltemp);
            break;
276  case 4: printf("MKS - Now turning on Channel %d.\n", channel[l]);
            newMKS.channelOn(channel[l]);
            newMKS.shortStatus(zahltemp);
            break;
    case 5: printf("MKS - Set FlowSetpoint on Channel %d.\n", channel[l]);
            newMKS.setFlowSetpoint(channel[l], value[l]);
            usleep(100000);
            newMKS.getFlowSetpoint(channel[l]);
            break;
281  case 6: printf("MKS - Set FlowRange on Channel %d.\n", channel[l]);
            newMKS.setFlowRange(channel[l], value[l]);
            usleep(100000);
            newMKS.getFlowRange(channel[l]);
            break;
286  case 7: printf("MKS - Set GasCorrectionFactor on channel %d.\n", channel[l]);
            newMKS.setGCF(channel[l], value[l]);
            usleep(100000);
            newMKS.getGCF(channel[l]);
            break;
291  case 8: printf("MKS - Set upper limit on channel %d.\n", channel[l]);
            newMKS.setUpperLimit(channel[l], value[l]);
            usleep(100000);
            newMKS.getUpperLimit(channel[l]);
            break;
296  case 9: printf("MKS - Set lower limit on channel %d.\n", channel[l]);
            newMKS.setLowerLimit(channel[l], value[l]);
            usleep(100000);
            newMKS.getLowerLimit(channel[l]);
            break;
301  case 10: printf("MKS - Set PressureSetpoint.\n");
            newMKS.setPressureSetpoint(value[l]);
            usleep(100000);
            newMKS.getPressureSetpoint();
            break;
306  case 11: printf("MKS - Set PressureRange.\n");
            newMKS.setPressureRange(value[l]);
            usleep(100000);
            newMKS.getPressureRange();
            break;
311  case 70: printf("MKS - Hardware Reset.\n");
            newMKS.hardwareReset();
            sleep(10);
            newMKS.completeStatus(zahltemp);
            break;
316  /***** SPS commands *****/
    case 12: printf("SPS - Now reading all channels.\n");
            a=newSPS.readVolt(newSPS.dc);
            a=newSPS.readCurIn(newSPS.dc);
            a=newSPS.readTemp(newSPS.dc);
            a=newSPS.readCurOut(newSPS.dc);
326  break;
    case 13: printf("          Now starting SPS.\n");
            newSPS.run(newSPS.dc);

```

```

    break;
331 case 14: printf("                Now stopping SPS.\n");
    newSPS.stop(newSPS.dc);
    break;
case 15: printf("SPS - Powercycle, Channel %d\n",channel[1]);
    switch(channel[1]) {
336     case 1: b = CHANNEL_1;
        break;
        case 2: b = CHANNEL_2;
        break;
        case 3: b = CHANNEL_3;
        break;
341     case 4: b = CHANNEL_4;
        break;
        default: printf("Error, wrong channel number.\n Try again.\n");
        return -2;
    }
346 d=newSPS.powercycle(newSPS.dc,channel[1],b);
    break;
case 16: printf("SPS - Setcurrent, Channel %d\n",channel[1]);
    d=float(value[1]);
    d=d/10000;
351 switch(channel[1]) {
        case 1: b = CHANNEL_1;
        break;
        case 2: b = CHANNEL_2;
        break;
356     case 3: b = CHANNEL_3;
        break;
        case 4: b = CHANNEL_4;
        break;
        default: printf("Error, wrong channel number.\n Try again.\n");
361     return -2;
    }
    d=newSPS.setCurrent(newSPS.dc, channel[1], b, d);
    d=newSPS.readValue(newSPS.dc, 8, channel[1], b);
    break;
366 case 17: /* ATTENTION: ONLY HERE channel=Database number ; value=channel number */
    switch(value[1]) {
        case 1: b = CHANNEL_1;
        break;
        case 2: b = CHANNEL_2;
        break;
371     case 3: b = CHANNEL_3;
        break;
        case 4: b = CHANNEL_4;
        break;
        case 5: b = CHANNEL_5;
        break;
376     case 6: b = CHANNEL_6;
        break;
        default: printf("Error, wrong channel number.\n Try again.\n");
381     return -2;
    }
    d=newSPS.readValue(newSPS.dc, channel[1], value[1], b);
    break;
386 /***** MPOD commands *****/
    case 18: newMPOD.completeStatus(zahltemp);
    break;
    case 19: newMPOD.shortStatus(zahltemp);
    break;
391 case 20: printf("MPOD - Set Voltage %f on Channel %d.\n", value_f[1],channel[1]);
    newMPOD.setVoltage(channel[1],value_f[1]);
    break;
    case 21: printf("MPOD - Set Current on Channel %d.\n", channel[1]);
    newMPOD.setCurrent(channel[1],value_f[1]);
396 case 22: printf("MPOD - Set VoltageRiseRate on Channel %d.\n", channel[1]);
    newMPOD.setVoltageRiseRate(channel[1],value_f[1]);
    break;
    case 23: printf("MPOD - Set VoltageFallRate on Channel %d.\n", channel[1]);
    newMPOD.setVoltageFallRate(channel[1],value_f[1]);
401 case 24: printf("MPOD - Set MaxSenseVoltage on Channel %d.\n", channel[1]);
    newMPOD.setConfigMaxSenseVoltage(channel[1],value_f[1]);
    break;
406 case 25: printf("MPOD - Set MaxTerminalVoltage on Channel %d.\n", channel[1]);
    newMPOD.setConfigMaxTerminalVoltage(channel[1],value_f[1]);
    break;
    case 26: printf("MPOD - Set MaxCurrent on Channel %d.\n", channel[1]);
    newMPOD.setConfigMaxCurrent(channel[1],value_f[1]);
411 case 27: printf("MPOD - Get MeasurementSenseVoltage of Channel %d.\n", channel[1]);
    newMPOD.getMeasurementSenseVoltage(channel[1]);
    break;
    case 28: printf("MPOD - Get MeasurementTerminalVoltage of Channel %d.\n", channel[1]);
    newMPOD.getMeasurementTerminalVoltage(channel[1]);
416 case 29: printf("MPOD - Get MeasurementCurrent of Channel %d.\n", channel[1]);
    newMPOD.getMeasurementCurrent(channel[1]);

```

```

    break;
421 case 30: printf("MPOD - Get OnOff Status of Channel %d.\n", channel[1]);
    newMPOD.channelOnOff(channel[1]);
    break;
case 31: printf("MPOD - Get OnOff Status MPOD crate.\n");
426 newMPOD.systemOnOff();
    break;
case 32: printf("MPOD - Now turning on Channel %d.\n", channel[1]);
    newMPOD.channelOn(channel[1]);
    newMPOD.channelStatus(channel[1]);
    break;
431 case 33: printf("MPOD - Now turning off Channel %d.\n", channel[1]);
    newMPOD.channelOff(channel[1]);
    newMPOD.channelStatus(channel[1]);
    break;
case 34: printf("MPOD - Now turning on MPOD Crate.\n");
436 newMPOD.systemOn();
    break;
case 35: printf("MPOD - Now turning off MPOD Crate.\n");
    newMPOD.systemOff();
    break;
441 case 36: printf("MPOD - Reset error for group %d.\n", channel[1]);
    newMPOD.errorResetGroup(channel[1],10);
    break;
case 37: printf("MPOD - Reset error for channel %d.\n", channel[1]);
    newMPOD.errorResetChannel(channel[1],10);
446 break;
case 38: printf("MPOD - Set Trip Time for channel %d.\n", channel[1]);
    newMPOD.setTripTimeMaxCurrent(channel[1],value[1]);
    break;

451 /***** HAMEG commands *****/
case 40: newHAMEG.completeStatus(zahltemp);
    break;
case 41: newHAMEG.shortStatus(zahltemp);
    break;
456 case 42: printf("HAMEG - Now turning all Channels on.\n");
    newHAMEG.allOn();
    break;
case 43: printf("HAMEG - Now turning all Channels off.\n");
    newHAMEG.allOff();
461 break;
case 44: printf("HAMEG - Now turning on Channel %d.\n", channel[1]);
    newHAMEG.channelOn(channel[1]);
    break;
case 45: printf("HAMEG - Now turning off Channel %d.\n", channel[1]);
    newHAMEG.channelOff(channel[1]);
466 break;
case 46: printf("HAMEG - Set Voltage %f on Channel %d.\n", value_f[1],channel[1]);
    newHAMEG.setVoltage(channel[1],value_f[1]);
    break;
471 case 47: printf("HAMEG - Set Current %f on Channel %d.\n", value_f[1],channel[1]);
    newHAMEG.setCurrent(channel[1],value_f[1]);
    break;
case 48: printf("HAMEG - Set Fuse Status %d on Channel %d.\n", value[1],channel[1]);
    newHAMEG.setFuseStatus(channel[1],value[1]);
476 break;
case 49: printf("HAMEG - Set Fuse Link %d on Channel %d.\n", value[1],channel[1]);
    newHAMEG.setFuseLinkComplete(channel[1],value[1]);
    break;
case 50: printf("HAMEG - Set Fuse Delay %d on Channel %d.\n", value[1],channel[1]);
    newHAMEG.setFuseDelay(channel[1],value[1]);
481 break;
case 51: printf("HAMEG - Set Common Command %d.\n", value[1]);
    newHAMEG.commonCommandsSet(channel[1],value[1]);
    break;
486 case 52: printf("HAMEG - Get Common Command %d.\n", value[1]);
    newHAMEG.commonCommandsGet(channel[1],value[1]);
    break;
}
}
491 if (endprogramm){
    printf("                Now stopping SlowTPC Daemon...\n");
    break;
}
496 for (int n=0; n<QUEUE_MAX;n++){
    doCom[n]=0;
    channel[n]=0;
    value[n]=0;
501 }

i_max=0;

countSensors++; //readout sensors every SENSORS_LOOP - loops
506 countHameg++; //readout sensors every HAMEG_LOOP - loops
/*wait for some time with the next QUEUE-check */
//    usleep(500000);

gettimeofday(&end, 0);

```

```

511     } while (end.tv_sec - start.tv_sec < slowIntervall);
    /***** end of main readout- and check-Queue- Loop *****/
}
/***** end of main routine *****/
516     if (connected_mks) { newMKS.logChange(" 'daemonStop'"); }
    if (connected_sps) { newSPS.logChange(" 'daemonStop'"); }
    if (connected_mpod) { newMPOD.logCommand(" 'daemonStop'"); }
    if (connected_hameg) { newHAMEG.logChange(" 'daemonStop'"); }
521     printf("      ... Daemon stopped, exit programm.\n\n");
}

```

GEM-TPC (SlowTPC.cpp)

```

#define MPOD_IP_ADR_NEW "10.0.0.2"
2 #define HPN_IP_ADR "10.0.0.3"
#define UNICHILLER_IP_ADR "10.0.0.4"
#define I2C_IP_ADR "10.0.0.18"
#define ASF1_IP_ADR "10.0.0.21"
#define ASF2_IP_ADR "10.0.0.22"
7 #define AVR_IP_ADR "10.0.0.23"

#include <pthread.h>

#include "HPn300.h"
12 #include "MPOD_new.h"
#include "Unichiller.h"
#include "ASF_1400.h"
#include "AVR_first.h"
#include "I2C_new.h"

17 #define UNIX_STYLE
#define SERVER_PORT 10001
#define AVR_PORT 2701
#define I2C_PORT 5000
22 #define QUEUE_MAX 5000

#define I2C_LOOP 10
#define ASF_LOOP 20

27 ost::Slog slowctrllog;

MPOD_new MPOD;
// HPn300 HV HPn(SERVER_PORT,HPN_IP_ADR);
Unichiller Chiller(SERVER_PORT,UNICHILLER_IP_ADR);
32 ASF_1400 ASF_Flow1(SERVER_PORT,ASF1_IP_ADR);
ASF_1400 ASF_Flow2(SERVER_PORT,ASF2_IP_ADR);
AVR_first avr(AVR_PORT,AVR_IP_ADR);
I2C_new i2c(I2C_PORT,I2C_IP_ADR);

37 void *readMPODfast(void *arg1) { int conn1 = *((int *) arg1); cerr<<flush; if (conn1) MPOD
.FASTstatus (); pthread_exit((void*) arg1); }
void *readCHILLERfast(void *arg2) { int conn2 = *((int *) arg2); cerr<<flush; if (conn2)
Chiller.FASTstatus (); pthread_exit((void*) arg2); }
void *readASF1fast(void *arg3) { int conn3 = *((int *) arg3); cerr<<flush; if (conn3)
ASF_Flow1.FASTstatus(1); pthread_exit((void*) arg3); }
void *readASF2fast(void *arg4) { int conn4 = *((int *) arg4); cerr<<flush; if (conn4)
ASF_Flow2.FASTstatus(2); pthread_exit((void*) arg4); }
void *readAVRfast(void *arg5) { int conn5 = *((int *) arg5); cerr<<flush; if (conn5) avr.
FASTstatus (); pthread_exit((void*) arg5); }
42 void *readI2Cfast(void *arg6) { int conn6 = *((int *) arg6); cerr<<flush; if (conn6) i2c.
FASTstatus (); pthread_exit((void*) arg6); }

int main(int argc, char **argv) {
int channel[QUEUE_MAX], value[QUEUE_MAX], doCom[QUEUE_MAX], doDaemonStop, i_max, newStart,
zahltemp, countI2c, countASF,
endprogramm, slowIntervall, queue_id, connected_mpod, connected_chiller, connected_asf1,
connected_asf2, connected_avr, connected_i2c, status, device;
47 float value_f[QUEUE_MAX];
char query[500], time_query[500], del_query[500], *clean_time_string;
timeval start, end, start_vacuum, end_vacuum;
time_t clean_time;
pthread_t threads[6];
pthread_attr_t attr;
52 int thread_created[6] = {1,1,1,1,1,1};

PGresult *res, *res1, *res2, *vacuumRes, *delquery;
PGconn * conn;

57 slowctrllog.clogEnable (false);

status=3;
device=0;
endprogramm=0;
connected_mpod=0;
// connected_hv_hpn=0;
connected_chiller=0;
connected_asf1=0;

```

```

67  connected_asf2=0;
    connected_avr=0;
    connected_i2c=0;
    countI2c=0;
    countASF=0;

72  pthread_attr_init(&attr);
    pthread_attr_setdetachstate(&attr, PTHREAD_CREATE_JOINABLE);

    doDaemonStop=0;
77  slowIntervall=60;
    newStart=1;
    queue_id=0;
    i_max=0;
82  for (int n=0; n<QUEUE_MAX;n++){
        doCom[n]=0;
        channel[n]=0;
        value[n]=0;
    }

87  /* Check, which hardware is connected and checked in */
    conn=sql_connect();
    memset(query,0,sizeof(query));
    sprintf(query,"SELECT status_code,device FROM hardware ORDER BY device");
    res2=PQexec(conn,query);

92  for (int i=0;i<PQntuples(res2);i++) {
        status=atoi(PQgetvalue(res2,i,0));
        device=atoi(PQgetvalue(res2,i,1));
        if (device==1 && status==0) {
97      connected_mpod=MPOD.connectMPOD(MPOD_IP_ADR_NEW);
            if (connected_mpod==1) { printf("MPOD checked.\n"); } else {endprogramm+=1;}
            // } else if (device==2 && status==0) {
            //     connected_hv_hpn=HV_HPn.connectHPn300();
            //     if (connected_hv_hpn==1) { printf("HV HPn 300 checked.\n"); } else {endprogramm+=1;}
102  } else if (device==3 && status==0) {
            connected_chiller=Chiller.connectUnichiller();
            if (connected_chiller==1) { printf("Chiller checked.\n"); } else {endprogramm+=1;}
        } else if (device==5 && status==0) {
107  connected_asf1=ASF_Flow1.connectASF();
            connected_asf2=ASF_Flow2.connectASF();
            connected_avr=avr.connectAVR();
            if ((connected_asf1==1) && (connected_asf2==1)) { printf("ASF Flow+Temp checked.\n"); }
                else {endprogramm+=1;}
            if (connected_avr==1) { printf("AVR (Pressure) checked.\n"); } else {endprogramm+=1;}
        } else if (device==6 && status==0) {
112  connected_i2c=i2c.connectI2C();
            if (connected_i2c==1) { printf("I2C (temp) checked.\n"); } else {endprogramm+=1;}
        } else {
            endprogramm+=1;
        }
117  }
    if (endprogramm<PQntuples(res2)) {endprogramm=0;}

    PQclear(res2);
    sql_disconnect(conn);
122  gettimeofday(&start_vacuum, 0);

    /****** main routine *****/
    while (!endprogramm) {
127  conn=sql_connect();

        /* Clean up database table 'aktuell' every two hours (=7200 sec) */
        gettimeofday(&end_vacuum, 0);
        if ((end_vacuum.tv_sec - start_vacuum.tv_sec > 7200) || newStart) {
132  clean_time=time(NULL);
            clean_time_string=ctime(&clean_time);
            clean_time_string[strlen(clean_time_string)-1]=0;

            memset(query,0,sizeof(query));
            sprintf(query,"VACUUM FULL ANALYZE aktuell");
137  vacuumRes=PQexec(conn,query);
            PQclear(vacuumRes);
            printf("Cleaned up database table 'aktuell' at %s.\n",clean_time_string);
            gettimeofday(&start_vacuum, 0);
        }

142  /* Create new event number */
        memset(query,0,sizeof(query));
        sprintf(query,"INSERT INTO events VALUES (nextval('events_seq'),NOW(),null)");
        res1=PQexec(conn,query);
147  PQclear(res1);

        /* Get latest event number */
        memset(query,0,sizeof(query));
        sprintf(query,"SELECT max(event) FROM events");
152  res2=PQexec(conn,query);
        zahltemp=atoi(PQgetvalue(res2,0,0));
        PQclear(res2);

        sql_disconnect(conn);

```

```

157      /* Connect all active devices and do a completeStatus */
      if (newStart) {
          if (connected_mpod) MPOD.logCommand("'daemonStart'");
          // if (connected_hv_hpn) HV_HPn.logCommand("'daemonStart'");
162      // if (connected_chiller) Chiller.logChange("'daemonStart'");
          if ((connected_asf1) && (connected_asf2)) ASF_Flow1.logCommand("'daemonStart'");
          if (connected_i2c) i2c.logCommand("'daemonStart'");

          if (connected_mpod) MPOD.completeStatus(zahltemp);
          // if (connected_hv_hpn) HV_HPn.completeStatus(zahltemp);
167      // if (connected_chiller) { Chiller.completeStatus(zahltemp); }
          if (connected_asf1) ASF_Flow1.completeStatus(zahltemp,1);
          if (connected_asf2) ASF_Flow2.completeStatus(zahltemp,2);
          if (connected_avr) avr.completeStatus(zahltemp);
172      if (connected_i2c) i2c.completeStatus(zahltemp);
      } else {
          /* do the regular shortStatus */
          if (connected_mpod) MPOD.shortStatus(zahltemp);
          // if (connected_hv_hpn) HV_HPn.shortStatus(zahltemp);
177      // if (connected_chiller) Chiller.shortStatus(zahltemp);
          if (connected_asf1) ASF_Flow1.shortStatus(zahltemp,1);
          if (connected_asf2) ASF_Flow2.shortStatus(zahltemp,2);
          if (connected_avr) avr.completeStatus(zahltemp);
          if (connected_i2c) i2c.completeStatus(zahltemp);
182      }

      /****** main readout- and check-Queue- Loop *****/
      gettimeofday(&start, 0);
      do {
187          memset(query,0,sizeof(query));
          memset(time_query,0,sizeof(time_query));
          memset(del_query,0,sizeof(del_query));
          conn=sql_connect();

192          /* deleting odd 'daemonStop' */
          if (newStart) {
              sprintf(query,"DELETE FROM queue WHERE command='daemonStop'");
              res=PQexec(conn,query);
              printf("Deleting odd 'daemonStop' from QUEUE (if necessary).\n");
197          PQclear(res);
          }

          /* fast readout */
          // if (connected_mpod) MPOD.FASTstatus();
202      // if (connected_mpod) thread_created[0] = pthread_create(&threads[0], &attr, &
          readMPODfast, &connected_mpod);
          if (connected_chiller) thread_created[1] = pthread_create(&threads[1], &attr, &
          readCHILLERfast, &connected_chiller);

          if (countASF>ASF_LOOP) {
              if (connected_asf1) thread_created[2] = pthread_create(&threads[2], &attr, &
          readASF1fast, &connected_asf1); //readout ASF Flow+Preassure every ASF_LOOP -
          loops
207          if (connected_asf2) thread_created[3] = pthread_create(&threads[3], &attr, &
          readASF2fast, &connected_asf2); //readout ASF Flow+Preassure every ASF_LOOP -
          loops
              if (connected_avr) thread_created[4] = pthread_create(&threads[4], &attr, &
          readAVRfast, &connected_avr); //readout ASF Flow+Preassure every
          ASF_LOOP - loops
              countASF=0;
          }
          if (connected_i2c && countI2c>I2C_LOOP) { //readout I2C Temperatures every
          I2C_LOOP - loops
212          thread_created[5] = pthread_create(&threads[5], &attr, &readI2Cfast, &connected_i2c);
              countI2c=0;
          }
          if (countASF>ASF_LOOP) { //readout ASF Flow+Preassure every ASF_LOOP - loops
              if (connected_asf1) ASF_Flow1.FASTstatus(1);
              if (connected_asf2) ASF_Flow2.FASTstatus(2);
              if (connected_avr) avr.FASTstatus();
217          countASF=0;
          }
      }

222      /*wait for threads to be finished */
      usleep(500000);
      for (int k=0; k<7; k++) { if (thread_created[k]==0) { if (pthread_join(threads[k], NULL
          )==0) thread_created[k]=1; else printf("Thread %d not joined, will try again\n",k)
          ;}
      }

227      /* get new commands from Queue */
      memset(query,0,sizeof(query));
      sprintf(query,"SELECT command,param1,param3,queue_id FROM queue ORDER BY queue_id LIMIT
          %d", QUEUE_MAX);
      res1=PQexec(conn,query);

232      if (PQntuples(res1)>0) {
          for (int i=0;i<PQntuples(res1);i++){
              char temp[255];

```

```

237     sprintf(temp, "%s ", PQgetvalue(res1, i, 0));
        channel[i]=atoi(PQgetvalue(res1, i, 1));
        value[i]=atoi(PQgetvalue(res1, i, 2));
        queue_id=atoi(PQgetvalue(res1, i, 3));

        /* check active queue-row for known (= possible) commands */
        /* MARK: commands that do not appear here will be ignored and deleted */
242     if (strstr(temp, "daemonStop")){ endprogramm=1; }
    /***** MPOD commands (1-30) *****/
        if (connected_mpod) {
247         if (strstr(temp, "MPODcompleteStatus")){ doCom[i]=1; }
            else if (strstr(temp, "MPODshortStatus")){ doCom[i]=2; }
            else if (strstr(temp, "MPODsetVoltage")){ doCom[i]=3; value_f[i]=atof(PQgetvalue(
                res1, i, 2));}
            else if (strstr(temp, "MPODsetCurrent")){ doCom[i]=4; value_f[i]=atof(PQgetvalue(
                res1, i, 2));}
            else if (strstr(temp, "MPODsetRiseRate")){ doCom[i]=5; value_f[i]=atof(PQgetvalue(
                res1, i, 2));}
            else if (strstr(temp, "MPODsetFallRate")){ doCom[i]=6; value_f[i]=atof(PQgetvalue(
                res1, i, 2));}
252         else if (strstr(temp, "MPODsetMaxSenseVoltage")){ doCom[i]=7; value_f[i]=atof(
                PQgetvalue(res1, i, 2));}
            else if (strstr(temp, "MPODsetMaxTerminalVoltage")){ doCom[i]=8; value_f[i]=atof(
                PQgetvalue(res1, i, 2));}
            else if (strstr(temp, "MPODsetMaxCurrent")){ doCom[i]=9; value_f[i]=atof(PQgetvalue(
                res1, i, 2));}
            else if (strstr(temp, "MPODsetSupervisionBehaviour")){ doCom[i]=10; }
            else if (strstr(temp, "MPODsetSupervisionCurrent")){ doCom[i]=11; value_f[i]=atof(
                PQgetvalue(res1, i, 2));}
257         else if (strstr(temp, "MPODsetSupervisionTerminalVoltage")){ doCom[i]=12; value_f[i]
                |=atof(PQgetvalue(res1, i, 2));}
            else if (strstr(temp, "MPODchannel_OnOff")){ doCom[i]=13; }
            else if (strstr(temp, "MPODsystem_OnOff")){ doCom[i]=14; }
            else if (strstr(temp, "MPODchannelOn")){ doCom[i]=15; }
            else if (strstr(temp, "MPODchannelOff")){ doCom[i]=16; }
262         else if (strstr(temp, "MPODsystemOn")){ doCom[i]=17; }
            else if (strstr(temp, "MPODsystemOff")){ doCom[i]=18; }
            else if (strstr(temp, "MPODerrorResetGroup")){ doCom[i]=19; }
            else if (strstr(temp, "MPODerrorResetChannel")){ doCom[i]=20; }
            else if (strstr(temp, "MPODsetTripTimeMaxCurrent")){ doCom[i]=21; value_f[i]=atof(
                PQgetvalue(res1, i, 2));}
267     }

    /***** HV_HPn commands (59-74) *****/
    // if (connected_hv_hp_n) {
    //     if (strstr(temp, "HPn300completeStatus")){ doCom[i]=59; }
272     //     else if (strstr(temp, "HPn300shortStatus")){ doCom[i]=60; }
    //     else if (strstr(temp, "HPn300setVoltage")){ doCom[i]=61; value_f[i]=atof(PQgetvalue(
        res1, i, 2));}
    //     else if (strstr(temp, "HPn300setCurrent")){ doCom[i]=62; value_f[i]=atof(PQgetvalue(
        res1, i, 2));}
    //     else if (strstr(temp, "HPn300setRampSpeed")){ doCom[i]=63; value_f[i]=atof(
        PQgetvalue(res1, i, 2));}
    //     else if (strstr(temp, "HPn300setVoltageLimit")){ doCom[i]=64; value_f[i]=atof(
        PQgetvalue(res1, i, 2));}
277     //     else if (strstr(temp, "HPn300setCurrentLimit")){ doCom[i]=65; value_f[i]=atof(
        PQgetvalue(res1, i, 2));}
    //     else if (strstr(temp, "HPn300hvOn")){ doCom[i]=66; }
    //     else if (strstr(temp, "HPn300hvOff")){ doCom[i]=67; }
    //     else if (strstr(temp, "HPn300killEnable")){ doCom[i]=68; }
    //     else if (strstr(temp, "HPn300killDisable")){ doCom[i]=69; }
282     //     else if (strstr(temp, "HPn300emOff")){ doCom[i]=70; }
    //     else if (strstr(temp, "HPn300errorReset")){ doCom[i]=71; }
    // }

    /***** Unichiller commands (75-82) *****/
287     if (connected_chiller) {
        if (strstr(temp, "CHILLERcompleteStatus")){ doCom[i]=75; }
        else if (strstr(temp, "CHILLERshortStatus")){ doCom[i]=76; }
        else if (strstr(temp, "CHILLERturnOn")){ doCom[i]=77; }
        else if (strstr(temp, "CHILLERturnOff")){ doCom[i]=78; }
292     else if (strstr(temp, "CHILLERsetTemperatureSetPoint")){ doCom[i]=79; value_f[i]=
        atof(PQgetvalue(res1, i, 2));}
        else if (strstr(temp, "CHILLERgetStatus")) { doCom[i]=80; }
    }

    /***** ASF_1400 Flow+Temp commands (106-125) *****/
297     if (connected_asf1 && connected_asf2) {
        if (strstr(temp, "ASFcompleteStatus")){ doCom[i]=106; }
        else if (strstr(temp, "ASFshortStatus")){ doCom[i]=107; }
        else if (strstr(temp, "ASFsetResolution")){ doCom[i]=108; }
        else if (strstr(temp, "ASFsetMode")){ doCom[i]=109; }
302     else if (strstr(temp, "ASFsetDisplayMode")){ doCom[i]=110; }
        else if (strstr(temp, "ASFgo")){ doCom[i]=111; }
        else if (strstr(temp, "ASFstop")){ doCom[i]=112; }
        else if (strstr(temp, "ASFreset")){ doCom[i]=113; }
    }
307

    /***** I2C Temperature commands (126-130) *****/
        if (connected_i2c) {
            if (strstr(temp, "I2CcompleteStatus")){ doCom[i]=126; }

```

```

    else if (strstr(temp, "I2CshortStatus")){ doCom[i]=127; }
}
/* delete active queue-row */
sprintf(del_query, "DELETE FROM queue WHERE queue_id=%d", queue_id);
delquery=PQexec(conn, del_query);
PQclear(delquery);
317     i_max=i;
}
PQclear(res1);

322 /* get (new) time for duration of main readout loop */
sprintf(time_query, "SELECT time_intervall FROM config WHERE id=3");
res=PQexec(conn, time_query);
slowIntervall=atoi(PQgetvalue(res, 0, 0));
PQclear(res);

327 sql_disconnect(conn);

newStart=0;

332 /* process known (=possible) commands */
for (int l=0; l<=i_max; l++) {

    switch (doCom[l]) {
/***** MPOD commands (1-30) *****/
337     case 1: MPOD.completeStatus(zahltemp);
            break;
            case 2: MPOD.shortStatus(zahltemp);
            break;
            case 3: printf("MPOD - Set Voltage %f on Channel %d.\n", value_f[l], channel[l]);
342             MPOD.setVoltage(channel[l], value_f[l]);
            break;
            case 4: printf("MPOD - Set Current on Channel %d.\n", channel[l]);
            MPOD.setCurrent(channel[l], value_f[l]);
            break;
347     case 5: printf("MPOD - Set VoltageRiseRate on Channel %d.\n", channel[l]);
            MPOD.setVoltageRiseRate(channel[l], value_f[l]);
            break;
            case 6: printf("MPOD - Set VoltageFallRate on Channel %d.\n", channel[l]);
            MPOD.setVoltageFallRate(channel[l], value_f[l]);
352     case 7: printf("MPOD - Set MaxSenseVoltage on Channel %d.\n", channel[l]);
            MPOD.setConfigMaxSenseVoltage(channel[l], value_f[l]);
            break;
            case 8: printf("MPOD - Set MaxTerminalVoltage on Channel %d.\n", channel[l]);
357             MPOD.setConfigMaxTerminalVoltage(channel[l], value_f[l]);
            break;
            case 9: printf("MPOD - Set MaxCurrent on Channel %d.\n", channel[l]);
            MPOD.setConfigMaxCurrent(channel[l], value_f[l]);
            break;
362     case 10: printf("MPOD - Set SupervisionBehaviour of Channel %d.\n", channel[l]);
            MPOD.setSupervisionBehavior(channel[l], value_f[l]);
            break;
            case 11: printf("MPOD - Set SupervisionCurrent of Channel %d.\n", channel[l]);
            MPOD.setSupervisionMaxCurrent(channel[l], value_f[l]);
367     case 12: printf("MPOD - Set SupervisionTerminalVoltage of Channel %d.\n", channel[l]);
            MPOD.setSupervisionMaxTerminalVoltage(channel[l], value_f[l]);
            break;
            case 13: printf("MPOD - Get OnOff Status of Channel %d.\n", channel[l]);
372             MPOD.channelOnOff(channel[l]);
            break;
            case 14: printf("MPOD - Get OnOff Status MPOD crate.\n");
            MPOD.systemOnOff();
            break;
377     case 15: printf("MPOD - Now turning on Channel %d.\n", channel[l]);
            MPOD.channelOn(channel[l]);
            break;
            case 16: printf("MPOD - Now turning off Channel %d.\n", channel[l]);
            MPOD.channelOff(channel[l]);
382     case 17: printf("MPOD - Now turning on MPOD Crate.\n");
            MPOD.systemOn();
            break;
            case 18: printf("MPOD - Now turning off MPOD Crate.\n");
387             MPOD.systemOff();
            break;
            case 19: printf("MPOD - Reset error for group %d.\n", channel[l]);
            MPOD.errorResetGroup(channel[l], 10);
            break;
392     case 20: printf("MPOD - Reset error for channel %d.\n", channel[l]);
            MPOD.errorResetChannel(channel[l], 10);
            break;
            case 21: printf("MPOD - Set Trip Time for channel %d.\n", channel[l]);
            MPOD.setTripTimeMaxCurrent(channel[l], value_f[l]);
397     case 22: printf("MPOD - Set Trip Time for channel %d.\n", channel[l]);
            MPOD.setTripTimeMaxCurrent(channel[l], value_f[l]);
            break;

/***** HV_HPn commands (59-74) *****/
// case 59: HV_HPn.completeStatus(zahltemp);

```

```

//      break;
402 //      case 60: HV_HPn.shortStatus(zahltemp);
//      break;
//      case 61: printf("HV_HPn - Set Voltage to %f kV.\n", value_f[1]);
//      HV_HPn.setVoltage(value_f[1]);
//      break;
407 //      case 62: printf("HV_HPn - Set Current.\n");
//      HV_HPn.setCurrent(value_f[1]);
//      break;
//      case 63: printf("HV_HPn - Set VoltageRampSpeed.\n");
//      HV_HPn.setRampSpeed(value_f[1]);
412 //      break;
//      case 64: printf("HV_HPn - Set VoltageLimit.\n");
//      HV_HPn.setVoltageLimit(value_f[1]);
//      break;
//      case 65: printf("HV_HPn - Set CurrentLimit.\n");
417 //      HV_HPn.setCurrentLimit(value_f[1]);
//      break;
//      case 66: printf("HV_HPn - HV on.\n");
//      HV_HPn.hvOn();
//      break;
422 //      case 67: printf("HV_HPn - HV off.\n");
//      HV_HPn.hvOff();
//      break;
//      case 68: printf("HV_HPn - KILL enable.\n");
//      HV_HPn.KillEnable();
427 //      break;
//      case 69: printf("HV_HPn - KILL disable.\n");
//      HV_HPn.KillDisable();
//      break;
//      case 70: printf("HV_HPn - Emergency off.");
432 //      HV_HPn.EmergencyOff();
//      break;
//      case 71: printf("HV_HPn - Reset error.");
//      HV_HPn.errorReset();
//      break;
437 //
// ***** Unichiller commands (75-82) *****
case 75: Chiller.completeStatus(zahltemp);
break;
442 case 76: Chiller.shortStatus(zahltemp);
break;
case 77: printf("Unichiller - Start regulation.");
Chiller.turnOn();
sleep(2);
Chiller.getStatus();
447 break;
case 78: printf("Unichiller - Stop regulation.");
Chiller.turnOff();
sleep(2);
Chiller.getStatus();
452 break;
case 79: printf("Unichiller - Set Temperature Set Point to %f C.",value_f[1]);
Chiller.setTemperatureSetPoint(value_f[1]);
break;
case 80: printf("Unichiller - Get Status.");
Chiller.getStatus();
457 break;
//
// ***** ASF_1400 Flow+Temp commands (86-105) *****
462 case 106: ASF_Flow1.completeStatus(zahltemp,1);
ASF_Flow2.completeStatus(zahltemp,2);
avr.completeStatus(zahltemp);
break;
case 107: ASF_Flow1.shortStatus(zahltemp,1);
ASF_Flow2.shortStatus(zahltemp,2);
467 avr.completeStatus(zahltemp);
break;
case 108: printf("ASF - Set Resolution on Channel %d.\n",channel[1]);
if (channel[1]==1) { ASF_Flow1.setResolution(1,value[1]); }
else if (channel[1]==2) { ASF_Flow2.setResolution(2,value[1]); }
472 break;
case 109: printf("ASF - Set Mode on Channel %d.\n",channel[1]);
if (channel[1]==1) { ASF_Flow1.setMode(1,value[1]); }
else if (channel[1]==2) { ASF_Flow2.setMode(2,value[1]); }
break;
477 case 110: printf("ASF - Set Display Mode on Channel %d.\n",channel[1]);
if (channel[1]==1) { ASF_Flow1.setDisplayMode(1,value[1]); }
else if (channel[1]==2) { ASF_Flow2.setDisplayMode(2,value[1]); }
break;
482 case 111: printf("ASF - GO on Channel %d.\n",channel[1]);
if (channel[1]==1) { ASF_Flow1.go(1); }
else if (channel[1]==2) { ASF_Flow2.go(2); }
break;
case 112: printf("ASF - STOP on Channel %d.\n",channel[1]);
if (channel[1]==1) { ASF_Flow1.stop(1); }
else if (channel[1]==2) { ASF_Flow2.stop(2); }
487 break;
case 113: printf("ASF - RESET on Channel %d.\n",channel[1]);
if (channel[1]==1) { ASF_Flow1.reset(1); }
else if (channel[1]==2) { ASF_Flow2.reset(2); }

```

```

492         break;

        /***** ASF 1400 Flow+Temp commands (86-105) *****/
        case 126: i2c.completeStatus(zahltemp);
                break;
497         case 127: i2c.completeStatus(zahltemp);
                break;
        }
    }

502    if (endprogramm){
        printf("          Now stopping SlowTPC Daemon...\n");
        break;
    }

507    for (int n=0; n<QUEUE_MAX;n++){
        doCom[n]=0;
        channel[n]=0;
        value[n]=0;
    }
512    i_max=0;

        countI2c++; //readout I2C Temperatures every I2C_LOOP - loops
        countASF++; //readout ASF Flow+Preassure every ASF_LOOP - loops

517    /*wait for some time with the next QUEUE-check */
        //    usleep(500000);
        gettimeofday(&end, 0);
        } while (end.tv_sec - start.tv_sec < slowIntervall);
    /***** end of main readout- and check-Queue- Loop *****/
522    }

    /***** end of main routine *****/
    for (int k=0; k<7; k++) { if (thread_created[k]==0) { if (pthread_join(threads[k], NULL)
        ==0) thread_created[k]=1; else printf("Thread %d not joined, will try again\n",k); } }

527    if (connected_mpod) { MPOD.logCommand("'daemonStop'"); }
    //    if (connected_hv_hp) { HV_HPn.logCommand("'daemonStop'"); }
    if (connected_chiller) { Chiller.logChange("'daemonStop'"); }
    if (connected_asf1 || connected_asf2 || connected_avr) { ASF_Flow1.logCommand("'daemonStop'
        "); }
532    printf("          ... Daemon stopped, exit programm.\n\n");

        pthread_attr_destroy(&attr);
        pthread_exit(NULL);
    }

```

D.2 Schnittstellenklassen der Hardwarekomponenten

ASF 1400 (ASF_1400.h)

```

class ASF_1400 {
public:
  ASF_1400(int port, char *hostname); //Konstruktor
4  ASF_1400(int port); //Konstruktor
  ~ASF_1400(); //Destruktor

  int connectASF ();
  int disconnectASF ();
9
  void usage ();

  void logFloat (char command[40], int channel, float value, int changed);
  void logString (char command[40], int channel, char value[8]);
14 void logInt (char command[40], int channel, int value);
  void logChange (char command[40], int channel);
  void logCommand (char command[40]);

  int sendCommand (char command[30]);
19 int sendRecieveCommand (char command[50], char buffer[500]);

  void completeStatus (int count, int channel);
  void shortStatus (int count, int channel);
  void FASTstatus (int count);
24

  int getFlow (int channel);
  int getTemperature (int channel);
  int getFlowTemperature (int channel, int nofast);

29 void go (int channel);
  void stop (int channel);
  void reset (int channel);

  void setResolution (int channel, int res);
34 int getResolution (int channel);
  void setMode (int channel, int mode);
  int getMode (int channel);
  void setDisplayMode (int channel, int disp_mode);
  int getDisplayMode (int channel);
39

  float OLDtemp;
  float OLDflow;

private:
44
  int sock;
  int connected;

  struct sockaddr_in address;
49 struct in_addr *atoaddr (char *address);

public:
  void init(int port, char *hostname);
54 int data_present();
};

```

AVR NET I/O (AVR_first.h)

```

class AVR_first {
public:
  AVR_first(int port, char *hostname); //Konstruktor
  AVR_first(int port); //Konstruktor
5  ~AVR_first(); //Destruktor

  int connectAVR ();
  int disconnectAVR ();

10 void usage ();

  void logFloat (char command[40], int channel, float value, int changed);
  void logString (char command[40], int channel, char value[8]);
  void logInt (char command[40], int channel, int value);
15 void logChange (char command[40], int channel);
  void logCommand (char command[40]);

  int sendCommand (char command[30]);
  int sendRecieveCommand (char command[50], char buffer[500]);
20

  void completeStatus (int count);
  void FASTstatus ();

```

```

    int    getPressure (int channel);
25  int    getPressureMean (int channel, int nofast);
    int    getPT100 (int channel);

    int    getStatus ();

30  private:

    int    sock;
    int    connected;

35  struct sockaddr_in address;
    struct in_addr *atoaddr (char *address);

    float  OLDvalue[6];

40  public:
    void   init(int port, char *hostname);

    int    data_present();
};

```

Hameg HMP 4040 (HAMEG_4040.h)

```

1  class HAMEG_4040 {
    public:
        HAMEG_4040(int port, char *hostname); //Konstruktor
        HAMEG_4040(int port); //Konstruktor
        ~HAMEG_4040(); //Destruktor
6
        void   usage();

        int    connectHAMEG ();
        int    disconnectHAMEG ();
11  void   logValue (char Fname[20], int channel, float value);
        void   logStatus (char Fname[20], int channel, int value);
        void   logChange (char Fname[20], int channel);
        void   logChange (char Fname[20]);

16  void   logError (char Fname[20], int channel, char value[8]);

        int    sendCommand (char command[12]);
        int    sendRecieveCommand (char command[12], char buffer[8]);

21  void   completeStatus (int count);
        void   shortStatus (int count);

        void   allOn ();
        void   allOff ();

26  int    channelStatus (int channel);
        void   channelOn (int channel);
        void   channelOff (int channel);

31  int    getVoltage (int channel);
        void   setVoltage (int channel, float value);
        int    getCurrent (int channel);
        void   setCurrent (int channel, float value);

36  int    getFuseStatus (int channel);
        void   setFuseStatus (int channel, int value);
        int    getFuseLink (int channel);
        void   setFuseLink (int channel, int link);
41  void   setFuseLinkComplete (int channel, int link_code);
        void   setFuseUnLink (int channel, int link);
        int    getFuseDelay (int channel);
        void   setFuseDelay (int channel, int value);
        int    getTrip (int channel);
46  void   commonCommandsSet (int command, int enableLog = 0);
        void   commonCommandsGet (int command, int enableLog = 0);

        void   FASTlogValue (char Fname[20], int channel, float value, int changed);
        void   FASTlogStatus (char Fname[20], int channel, int value, int changed);
51  void   FASTstatus ();
        int    FASTchannelStatus (int channel, int i);
        int    FASTgetVoltage (int channel, int i);
        int    FASTgetCurrent (int channel, int i);
        int    FASTgetTrip (int channel, int i);

56  private:

        int    sock;
        int    connected;

61  struct sockaddr_in address;
    struct in_addr *atoaddr (char *address);

    public:

```

```

66 void init(int port, char *hostname);
    int data_present();

    int OLdchannelStatus[HAMEG_CHANNEL_COUNT];
71 float OLdgetVoltage[HAMEG_CHANNEL_COUNT];
    float OLdgetCurrent[HAMEG_CHANNEL_COUNT];
    int OLdgetTrip[HAMEG_CHANNEL_COUNT];
};

```

iseg HPn300 (HPn300.h)

```

class HPn300 {
public:
    HPn300(int port, char *hostname); //Konstruktor
    HPn300(int port); //Konstruktor
5   ~HPn300(); //Destruktor

    void usage();

    int connectHPn300 ();
10   int disconnectHPn300 ();

    void logFloat (char command[20], float value);
    void logString (char command[20], char *value);
    void logCommand (char command[20]);

15   int sendCommand (char *data);
    int sendRecieveCommand (char *data, char *buffer, int buf_length);

    void completeStatus (int count);
20   void shortStatus (int count);

    // int getID ();
    void getLamStatus ();
    void getStatus ();

25   int hvOn ();
    int hvOff ();
    int KillEnable ();
    int KillDisable ();
30   int EmergencyOff ();

    int setVoltage (float value);
    void getVoltage ();
    void getMeasuredVoltage ();
35   int setRampSpeed (float value);
    void getRampSpeed ();
    int setVoltageLimit (float value);
    void getVoltageLimit ();

40   int setCurrent (float value);
    void getCurrent ();
    void getMeasuredCurrent ();
    int setCurrentLimit (float value);
    void getCurrentLimit ();

45   void errorReset ();

private:
50   int sock;
    int connected;

    struct sockaddr_in address;
    struct in_addr *atoaddr (char *address);

55   public:
    void init(int port, char *hostname);

    int data_present();

60 };

```

I²C (I2C_new.h)

```

class I2C_new {
public:
3   I2C_new(int port, char *hostname); //Konstruktor
    I2C_new(int port); //Konstruktor
    virtual ~I2C_new(); //Destruktor

    void usage();

8   int connectI2C ();
    int disconnectI2C ();

```

```

13  virtual bool I2CRead(unsigned char address, int num_bytes, unsigned char *data);
    virtual bool I2CWrite(unsigned char address, int num_bytes, unsigned char *data);
    virtual bool I2CReadRegister(BYTE address, BYTE subaddr, int num_bytes, BYTE* data);
    virtual bool SlaveExists(unsigned char address);

    void logCommand (char command[20]);
18  void logChange (char command[20], int channel);
    void logString (char command[20], int channel, char value[8]);
    void logFloat (char command[20], int channel, float value, int changed);
    void logError (char command[40], int channel, int value);

23  void completeStatus (int count);
    void FASTstatus ();

    void getADCTemperature (int channel, int nofast);
    void getADCValue (int channel);

28  protected:
    BYTE GetChecksum(BYTE *data, int length);
    bool SendUdp(BYTE data[], int numBytes);
    bool ReadAnswer(BYTE& cmd, BYTE buffer[], int& numBytes);
33  bool ReadAnswer(WORD& msg, BYTE& ack, BYTE buffer[], int& numBytes);
    int fTimeout;

    private:

38  int sock;
    int connected;

    struct sockaddr_in address;
    struct in_addr *atoaddr (char *address);

43  unsigned char getChip (int channel);
    float getChannelFactor(int channel, int value);
    float getTemperature (unsigned char *data, int channel);
    float getPressure (unsigned char *data, int channel);

48  float OLDvalue[16];
    int count;

    public:
53  void init(int port, char *hostname);
    static const WORD MSG_READ_I2C = 0x30;
    static const WORD MSG_WRITE_I2C = 0x40;
    static const WORD MSG_READ_I2C_SUBADDR = 0x50;
    int data_present();

58  };

```

MKS 647b (MKS_647B.h)

```

class MKS_647B {
    public:
    MKS_647B(int port, char *hostname); //Konstruktor
    MKS_647B(int port); //Konstruktor
5  ~MKS_647B(); //Destruktor

    void usage();

    int connectMKS ();
10  int disconnectMKS ();
    void logValue (char Fname[20], int channel, int value);
    void logChange (char Fname[20]);
    void logChange (char Fname[20], int channel);
    void logStatus (char Fname[20], int channel, char value[8]);
15  void logError (char Fname[20], int channel, char value[8]);

    int sendCommand (char command[12]);
    int sendRecieveCommand (char command[12], char buffer[8]);

20  void hardwareReset ();

    void completeStatus (int count);
    void shortStatus (int count);

25  void channelOn (int channel);
    void channelOff (int channel);
    int channelStatus(int channel);

    void setFlowSetpoint (int channel, int value);
30  int getFlow (int channel);
    int getFlowSetpoint (int channel);
    void setFlowRange (int channel, int rangeCode);
    int getFlowRange (int channel);
    int getFlowOffset (int channel);

35  void setPressureSetpoint (int value);
    int getPressure ();
    int getPressureSetpoint ();
    void setPressureRange (int rangeCode);

```

```

40  int   getPressureRange ();
    int   getPressureOffset ();

    void  setGCF (int channel, int factor);
    int   getGCF (int channel);

45  void  setUpperLimit (int channel, int value);
    int   getUpperLimit (int channel);

    void  setLowerLimit (int channel, int value);
50  int   getLowerLimit (int channel);

    void  FASTlogValue (char command[20], int channel, int value, int changed);
    void  FASTlogStatus (char command[20], int channel, char value[8], int changed);
    void  FASTstatus ();
55  int   FASTchannelStatus(int channel, int i);
    int   FASTgetFlow (int channel, int i);

private:

60  int   sock;
    int   connected;

    int   channel_list[CHANNEL_COUNT+1];
    void  setChannelList ();

65  struct sockaddr_in address;
    struct in_addr *atoaddr (char *address);

public:
70  void  init(int port, char *hostname);

    int   data_present();

    char  OLDchannelStatus[CHANNEL_COUNT][8];
75  int   OLDgetFlow[CHANNEL_COUNT];
};

```

MPOD-Crate (MPOD_new.h)

```

class MPOD_new {
public:
    MPOD_new(); //Konstruktor
    ~MPOD_new(); //Destruktor
5
    int   connectMPOD (char *hostname);
    int   connectMPOD ();
    int   disconnectMPOD ();

10  void  usage ();

    void  logFloat (char command[40], int channel, float value);
    void  logString (char command[40], int channel, char value[8]);
    void  logInt (char command[40], int channel, int value);
15  void  logChange (char command[40], int channel);
    void  logCommand (char command[40]);
    void  logError (char command[40], int channel, char value[8], int send_mail);

    int   getInt (char com[40], int& read_value);
20  int   getFloat (char com[40], float& read_value);
    int   getDouble (char com[40], double& read_value);
    int   getString (char com[40], u_char *return_value, int getcount);
    int   getStatus (char com[40], char *erg);
    int   setInt (char com[40], int value_in, int& value);
25  int   setFloat (char com[40], float value_in, float& value);

    void  completeStatus (int count);
    void  shortStatus (int count);
    void  completeStatusChannel (int count, int channel);
30  void  shortStatusChannel (int count, int channel);

    void  systemStatus ();
    void  systemOnOff ();
    void  systemOn ();
35  void  systemOff ();

    void  channelStatus (int channel);
    void  channelOnOff (int channel);
    void  channelOn (int channel);
40  void  channelOff (int channel);

    void  getVoltage (int channel);
    void  getCurrent (int channel);
    void  getVoltageRiseRate (int channel);
45  void  getVoltageFallRate (int channel);
    void  getMeasurementSenseVoltage (int channel);
    void  getMeasurementTerminalVoltage (int channel);
    void  getMeasurementCurrent (int channel);
    void  getMeasurementTemperature (int channel);

```

```

50 void getSupervisionBehavior (int channel);
void getSupervisionMinSenseVoltage (int channel);
void getSupervisionMaxSenseVoltage (int channel);
void getSupervisionMaxTerminalVoltage (int channel);
void getSupervisionMaxCurrent (int channel);
55 void getSupervisionMaxPower (int channel);
void getConfigMaxSenseVoltage (int channel);
void getConfigMaxTerminalVoltage (int channel);
void getConfigMaxCurrent (int channel);
void getTripTimeMaxCurrent(int channel);
60 void getName(int channel);

void setVoltage (int channel, float value_in);
void setCurrent (int channel, float value_in);
void setVoltageRiseRate (int channel, float value_in);
65 void setVoltageFallRate (int channel, float value_in);
void setSupervisionBehavior (int channel, int value_in);
void setSupervisionMinSenseVoltage (int channel, float value_in);
void setSupervisionMaxSenseVoltage (int channel, float value_in);
void setSupervisionMaxTerminalVoltage (int channel, float value_in);
70 void setSupervisionMaxCurrent (int channel, float value_in);
void setSupervisionMaxPower (int channel, float value_in);
void getConfigMaxSenseVoltage (int channel, float value_in);
void getConfigMaxTerminalVoltage (int channel, float value_in);
void getConfigMaxCurrent (int channel, float value_in);
75 void setTripTimeMaxCurrent(int channel, int value_in);

void errorResetChannel (int channel, int write_value);
void errorResetGroup (int group, int write_value);

80 void FASTlogFloat (char command[40], int channel, float value, int changed);
void FASTlogInt (char command[40], int channel, int value, int changed);
void FASTlogString (char command[40], int channel, char value[8], int changed);
void FASTstatus ();
void FASTchannelStatus (int channel, int i);
85 void FASTchannelOnOff (int channel, int i);
void FASTgetVoltage (int channel, int i);
void FASTgetCurrent (int channel, int i);
void FASTgetMeasurementTerminalVoltage (int channel, int i);
void FASTgetMeasurementCurrent (int channel, int i);
90 void FASTgetMeasurement (int channel, int i);
void FASTsystemOnOff ();

void fillAktuell ();

95 private:
netsnmp_session session, *ss;
netsnmp_pdu *pdu;
netsnmp_pdu *response;
netsnmp_variable_list *vars;
100 char *names_cur;
oid name[MAX_OID_LEN];
size_t name_length;

105 int connected;
int channel_list[30];

void setChannelList ();

110 char OLDchannelStatus[30][5];
int OLDchannelOnOff[30];
int OLDgetVoltage[30];
int OLDgetCurrent[30];
int OLDgetMeasurementTerminalVoltage[30];
115 int OLDgetMeasurementCurrent[30];
int OLDsystemOnOff;
int OLDsystemStatus[5];
};

```

SPS (SPS.h)

```

class Sps_Tpc {
public:
daveConnection *dc;
4 Sps_Tpc(); //Konstruktor
~Sps_Tpc(); //Destruktor

int connectSPS ();
void usage();
9 void logValue (char Fname[20], int DBnr, int channel, float value);
void logChange (char Fname[20]);
void logError (char Fname[20], int DBnr, int channel, float value);

void run (daveConnection *dc);
14 void stop (daveConnection *dc);

void completeReadout(daveConnection *dc, int count);
int readVolt (daveConnection *dc, int printvalues=0);

```

```

19  int  readCurIn (daveConnection *dc, int printvalues=0);
    int  readTemp (daveConnection *dc, int printvalues=0);
    int  readCurOut (daveConnection *dc, int printvalues=0);
    float readValue (daveConnection *dc, int DBnr, int channel, int DBchannel);

24  float setCurrent (daveConnection *dc, int channel, int DBchannel, float value);
    float powercycle (daveConnection *dc, int channel, int DBchannel);
    void  status (daveConnection *dc);

    void  FASTlogValue (char Fname[20], int DBnr, int channel, float value, int changed);
    void  FASTstatus (daveConnection *dc);
29  int  FASTreadVolt (daveConnection *dc, int printvalues=0);
    int  FASTreadCurIn (daveConnection *dc, int printvalues=0);
    int  FASTreadTemp (daveConnection *dc, int printvalues=0);
    int  FASTreadCurOut (daveConnection *dc, int printvalues=0);

34  void  readSZL (daveConnection *dc, int id, int index);
    void  readSZLAll (daveConnection *dc);
    void  loadBlocksOfType (daveConnection *dc, int blockType);

private:
39  float voltages_in [4];
    float currents_in [4];
    float temperatures_in [6];
    float currents_out [4];

44  float OLDvoltages_in [4];
    float OLDcurrents_in [4];
    float OLDtemperatures_in [6];
    float OLDcurrents_out [4];
};

```

Unichiller (Unichiller.h)

```

class Unichiller {
2 public:
    Unichiller(int port, char *hostname);
    Unichiller(int port);
    ~Unichiller();

7  void  usage();

    int  connectUnichiller();
    int  disconnectUnichiller();
    void  logValue(char command[20], float value);
12  void  logChange(char command[20]);
    void  logStatus(char command[20], int value);

    int  sendCommand(char *data);
    int  sendRecieveCommand(char *data, char *buffer, int buf_length);

17  void  completeStatus(int count);
    void  shortStatus(int count);

    void  getStatus();
22  int  rescue();

    int  turnOn();
    int  turnOff();

27  void  getTemperatureIntern();
    void  getTemperatureExtern();

    void  getTemperatureSetPoint();
    int  setTemperatureSetPoint(float value);
32  void  getAnalogSetPoint();

    void  FASTlogValue(char command[20], float value, int changed);
    void  FASTlogStatus(char command[20], int value, int changed);
    void  FASTstatus();
    void  FASTgetTemperatureIntern();
    void  FASTgetTemperatureExtern();
    void  FASTgetTemperatureSetPoint();
42 private:

    int  sock;
    int  connected;

47  struct sockaddr_in address;
    struct in_addr *atoaddr(char *address);

    float OLDtempIntern;
52  float OLDtempExtern;
    float OLDtempSetPoint;
    int  OLDstatus;

```

```
57 public:
   void init(int port, char *hostname);
   int data_present();
};
```

D.3 SPS-Anweisungsliste

```

DATA_BLOCK DB 1
TITLE =Analogbaugruppe 1 Rohdaten (AI 8x16Bit), Spannung
VERSION : 1.0
STRUCT
5  CH_0_V1_raw : WORD ; //Kanal 0 - Spannung 1
  CH_1_V2_raw : WORD ; //Kanal 1 - Spannung 2
  CH_2_V3_raw : WORD ; //Kanal 2 - Spannung 3
  CH_3_V4_raw : WORD ; //Kanal 3 - Spannung 4
END_STRUCT ;
10 BEGIN
  CH_0_V1_raw := W#16#0;
  CH_1_V2_raw := W#16#0;
  CH_2_V3_raw := W#16#0;
  CH_3_V4_raw := W#16#0;
15 END_DATA_BLOCK

DATA_BLOCK DB 2
TITLE =Analogbaugruppe 1 Werte, Spannung
VERSION : 1.0
STRUCT
  Voltage_1 : REAL ; //Spannung 1
  Voltage_2 : REAL ; //Spannung 2
  Voltage_3 : REAL ; //Spannung 3
25 Voltage_4 : REAL ; //Spannung 4
END_STRUCT ;
BEGIN
  Voltage_1 := 0.000000e+000;
  Voltage_2 := 0.000000e+000;
30 Voltage_3 := 0.000000e+000;
  Voltage_4 := 0.000000e+000;
END_DATA_BLOCK

DATA_BLOCK DB 3
TITLE =Analogbaugruppe 1 Rohdaten (AI 8x16Bit), Strom
VERSION : 1.0
STRUCT
  CH_4_I1_raw : WORD ; //Kanal 0 - Strom 1
  CH_5_I2_raw : WORD ; //Kanal 1 - Strom 2
40 CH_6_I3_raw : WORD ; //Kanal 2 - Strom 3
  CH_7_I4_raw : WORD ; //Kanal 3 - Strom 4
END_STRUCT ;
BEGIN
  CH_4_I1_raw := W#16#0;
45 CH_5_I2_raw := W#16#0;
  CH_6_I3_raw := W#16#0;
  CH_7_I4_raw := W#16#0;
END_DATA_BLOCK

50
DATA_BLOCK DB 4
TITLE =Analogbaugruppe 1 Werte, Strom
VERSION : 1.0
STRUCT
55 Current_1 : REAL ; //Strom 1
  Current_2 : REAL ; //Strom 2
  Current_3 : REAL ; //Strom 3
  Current_4 : REAL ; //Strom 4
END_STRUCT ;
60 BEGIN
  Current_1 := 0.000000e+000;
  Current_2 := 0.000000e+000;
  Current_3 := 0.000000e+000;
  Current_4 := 0.000000e+000;
65 END_DATA_BLOCK

DATA_BLOCK DB 5
TITLE =Analogbaugruppe 2 Rohdaten (AI 8xRTD), Temperatur
VERSION : 1.0
STRUCT
  CH_0_T1_raw : WORD ; //Kanal 0 - F hler 1 Temperatur (Grad C)
  CH_1_T2_raw : WORD ; //Kanal 1 - F hler 2 Temperatur (Grad C)
  CH_2_T3_raw : WORD ; //Kanal 2 - F hler 3 Temperatur (Grad C)
75 CH_3_T4_raw : WORD ; //Kanal 3 - F hler 4 Temperatur (Grad C)
  CH_4_T5_raw : WORD ; //Kanal 4 - F hler 5 Temperatur (Grad C)
  CH_5_T6_raw : WORD ; //Kanal 5 - F hler 6 Temperatur (Grad C)
END_STRUCT ;
BEGIN
80 CH_0_T1_raw := W#16#0;
  CH_1_T2_raw := W#16#0;
  CH_2_T3_raw := W#16#0;
  CH_3_T4_raw := W#16#0;
  CH_4_T5_raw := W#16#0;
85 CH_5_T6_raw := W#16#0;
END_DATA_BLOCK

```

```

90 DATA_BLOCK DB 6
  TITLE =Analogbaugruppe 2 Werte, Temperatur
  VERSION : 1.0
  STRUCT
    Temperature_1 : REAL ; // F hler 1 Temperatur (Grad C)
95   Temperature_2 : REAL ; // F hler 2 Temperatur (Grad C)
    Temperature_3 : REAL ; // F hler 3 Temperatur (Grad C)
    Temperature_4 : REAL ; // F hler 4 Temperatur (Grad C)
    Temperature_5 : REAL ; // F hler 5 Temperatur (Grad C)
    Temperature_6 : REAL ; // F hler 6 Temperatur (Grad C)
100  END_STRUCT ;
  BEGIN
    Temperature_1 := 0.000000e+000;
    Temperature_2 := 0.000000e+000;
    Temperature_3 := 0.000000e+000;
105   Temperature_4 := 0.000000e+000;
    Temperature_5 := 0.000000e+000;
    Temperature_6 := 0.000000e+000;
  END_DATA_BLOCK

110 DATA_BLOCK DB 7
  TITLE =Analogausgabebaugruppe Rohdaten (AO 4x0/4..20mA), Strom
  VERSION : 1.0
  STRUCT
115   CH_0_I1_OUT_raw : WORD ; //Ausgabestrom 1 Rohdaten
    CH_1_I2_OUT_raw : WORD ; //Ausgabestrom 2 Rohdaten
    CH_2_I3_OUT_raw : WORD ; //Ausgabestrom 3 Rohdaten
    CH_3_I4_OUT_raw : WORD ; //Ausgabestrom 4 Rohdaten
  END_STRUCT ;
120  BEGIN
    CH_0_I1_OUT_raw := W#16#5100;
    CH_1_I2_OUT_raw := W#16#0;
    CH_2_I3_OUT_raw := W#16#0;
    CH_3_I4_OUT_raw := W#16#0;
125  END_DATA_BLOCK

  DATA_BLOCK DB 8
  TITLE =Analogausgabebaugruppe Werte
130  VERSION : 1.0
  STRUCT
    Current_Out_1 : REAL ; //Ausgabestrom 1
    Current_Out_2 : REAL ; //Ausgabestrom 2
    Current_Out_3 : REAL ; //Ausgabestrom 3
135   Current_Out_4 : REAL ; //Ausgabestrom 4
  END_STRUCT ;
  BEGIN
    Current_Out_1 := 0.000000e+000;
    Current_Out_2 := 0.000000e+000;
140   Current_Out_3 := 0.000000e+000;
    Current_Out_4 := 0.000000e+000;
  END_DATA_BLOCK

145  FUNCTION FC 1 : VOID
  TITLE =Konvertierung von Rohwerte von einem Kanal +/-10V in Spannungen
  VERSION : 1.0

150  VAR_INPUT
    Raw : WORD ;
  END_VAR
  VAR_OUTPUT
    Voltage : REAL ;
155  END_VAR
  VAR_TEMP
    TDoubleInt : DINT ;
    TInt : INT ;
  END_VAR
160  BEGIN
  NETWORK
  TITLE =
    L #Raw;
    T #TInt;
165   L #TInt;
    ITD ;
    T #TDoubleInt;

170   L #TDoubleInt;
    DTR ;
    T #Voltage;
    L 3.617000e-004;
    *R ;
175   T #Voltage;

  END_FUNCTION

```

```

180 FUNCTION FC 2 : VOID
    TITLE =Konvertierung von Rohwerte von einem Kanal +/-5V in Spannungen
    VERSION : 1.0

    VAR_INPUT
185     Raw : WORD ;
    END_VAR
    VAR_OUTPUT
        Voltage : REAL ;
    END_VAR
190 VAR_TEMP
        TDoubleInt : DINT ;
        TInt : INT ;
    END_VAR
    BEGIN
195 NETWORK
        TITLE =
            L     #Raw;
            T     #TInt;

200         L     #TInt ;
            L     #TInt ; 0;
            ==I;
            T     #Voltage;

205         L     #TInt;
            ITD ;
            T     #TDoubleInt;

210         L     #TDoubleInt;
            DTR ;
            T     #Voltage;
            L     1.808000e-004;
            *R ;
            T     #Voltage;
215     END_FUNCTION

    FUNCTION FC 3 : VOID
220     TITLE =Konvertierung von Rohwerte von einem Kanal 0..20mA in Strom
        VERSION : 1.0

        VAR_INPUT
            Raw : WORD ;
225     END_VAR
        VAR_OUTPUT
            Current : REAL ;
        END_VAR
        VAR_TEMP
230     TDoubleInt : DINT ;
            TInt : INT ;
        END_VAR
        BEGIN
            NETWORK
235     TITLE =
                L     #Raw;
                T     #TInt;

                L     #TInt;
240     ITD ;
                T     #TDoubleInt;

                L     #TDoubleInt;
                DTR ;
245     T     #Current;
                L     7.234000e-007;
                *R ;
                T     #Current;

250     END_FUNCTION

    FUNCTION FC 4 : VOID
255     TITLE =Konvertierung von Rohwerte von einem Kanal in Temperaturen
        VERSION : 1.0

        VAR_INPUT
            Raw : WORD ;
        END_VAR
260     VAR_OUTPUT
            Temperature : REAL ;
        END_VAR
        VAR_TEMP
            TDoubleInt : DINT ;
265     TInt : INT ;
        END_VAR
        BEGIN
            NETWORK
            TITLE =
270     L     #Raw;

```

```

    T    #TInt;

    L    #TInt;
    ITD  ;
275    T    #TDoubleInt;

    L    #TDoubleInt;
    DTR  ;
    T    #Temperature;
280    L    1.000000e-002;
    *R   ;
    T    #Temperature;

END_FUNCTION
285

ORGANIZATION_BLOCK OB 1
TITLE = "Main Program Sweep (Cycle)"
VERSION : 1.0
290

VAR_TEMP
  OB1_EV_CLASS : BYTE ; //Bits 0-3 = 1 (Coming event), Bits 4-7 = 1 (Event class 1)
  OB1_SCAN_1 : BYTE ; //1 (Cold restart scan 1 of OB 1), 3 (Scan 2-n of OB 1)
295  OB1_PRIORITY : BYTE ; //Priority of OB Execution
  OB1_OB_NUMBR : BYTE ; //1 (Organization block 1, OB1)
  OB1_RESERVED_1 : BYTE ; //Reserved for system
  OB1_RESERVED_2 : BYTE ; //Reserved for system
  OB1_PREV_CYCLE : INT ; //Cycle time of previous OB1 scan (milliseconds)
300  OB1_MIN_CYCLE : INT ; //Minimum cycle time of OB1 (milliseconds)
  OB1_MAX_CYCLE : INT ; //Maximum cycle time of OB1 (milliseconds)
  OB1_DATE_TIME : DATE_AND_TIME ; //Date and time OB1 started
END_VAR
BEGIN
305 NETWORK
  TITLE =Kanal e auslesen
  //Die Kanalwerte werden geladen und in
  // DB1 (Spannung), DB3 (Strom) und DB5 (Temperatur) gespeichert
    L    PEW 256; // Kanal 0 - Spannung 1
    T    DB1.DBW 0;
310    L    PEW 258; // Kanal 1 - Spannung 2
    T    DB1.DBW 2;
    L    PEW 260; // Kanal 2 - Spannung 3
    T    DB1.DBW 4;
315    L    PEW 262; // Kanal 3 - Spannung 4
    T    DB1.DBW 6;

    L    PEW 264; // Kanal 4 - Strom 1
    T    DB3.DBW 0;
320    L    PEW 266; // Kanal 5 - Strom 2
    T    DB3.DBW 2;
    L    PEW 268; // Kanal 6 - Strom 3
    T    DB3.DBW 4;
325    L    PEW 270; // Kanal 7 - Strom 4
    T    DB3.DBW 6;

    L    PEW 288; // Kanal 0 - Temperatur 1
    T    DB5.DBW 0;
330    L    PEW 290; // Kanal 1 - Temperatur 2
    T    DB5.DBW 2;
    L    PEW 292; // Kanal 2 - Temperatur 3
    T    DB5.DBW 4;
335    L    PEW 294; // Kanal 3 - Temperatur 4
    T    DB5.DBW 6;
    L    PEW 296; // Kanal 4 - Temperatur 5
    T    DB5.DBW 8;
    L    PEW 298; // Kanal 5 - Temperatur 6
    T    DB5.DBW 10;
340 NETWORK
  TITLE =Konvertierung
  //Konvertierung der Rohdaten in Spannung/Strom/Temperatur
    CALL FC 1 (
345      Raw          := DB1.DBW 0,
      Voltage       := DB2.DBD 0);
    CALL FC 1 (
      Raw          := DB1.DBW 2,
      Voltage       := DB2.DBD 2);
350    CALL FC 1 (
      Raw          := DB1.DBW 4,
      Voltage       := DB2.DBD 4);
    CALL FC 1 (
355      Raw          := DB1.DBW 6,
      Voltage       := DB2.DBD 6);

    CALL FC 3 (
360      Raw          := DB3.DBW 0,
      Current       := DB4.DBD 0);
    CALL FC 3 (

```

```

        Raw          := DB3.DBW 2,
        Current     := DB4.DBD 2);
365 CALL FC 3 (
        Raw          := DB3.DBW 4,
        Current     := DB4.DBD 4);
        Raw          := DB3.DBW 6,
        Current     := DB4.DBD 6);
370
        CALL FC 4 (
        Raw          := DB5.DBW 0,
        Temperature := DB6.DBD 0);
375 CALL FC 4 (
        Raw          := DB5.DBW 2,
        Temperature := DB6.DBD 2);
        CALL FC 4 (
        Raw          := DB5.DBW 4,
        Temperature := DB6.DBD 4);
380 CALL FC 4 (
        Raw          := DB5.DBW 6,
        Temperature := DB6.DBD 6);
        CALL FC 4 (
        Raw          := DB5.DBW 8,
        Temperature := DB6.DBD 8);
385 CALL FC 4 (
        Raw          := DB5.DBW 10,
        Temperature := DB6.DBD 10);
390
NETWORK
TITLE =Ausgabewert setzen
CLR;
395 CALL FC 3 (
        Raw          := DB7.DBW 0,
        Current     := DB8.DBD 0);
400 L DB7.DBW 0;
    T PAW 272;
        CALL FC 3 (
        Raw          := DB7.DBW 2,
        Current     := DB8.DBD 2);
405 L DB7.DBW 2;
    T PAW 274;
        CALL FC 3 (
        Raw          := DB7.DBW 4,
        Current     := DB8.DBD 4);
410 L DB7.DBW 4;
    T PAW 276;
        CALL FC 3 (
        Raw          := DB7.DBW 6,
        Current     := DB8.DBD 6);
415 L DB7.DBW 6;
    T PAW 278;
420
NETWORK
425 TITLE =Prozessalarm zur cksetzen
    //Obwohl die Prozessalarm bei verlassen von der OB40 Hardwarem ig quittiert
    //wurden muss der Prozessalarm Wort h ndig zur ckgesetzt werden
    U M 200.0;
    SPBN 1b10;
430 L MW 100;
    SSI 4;
    T MW 100;
    1b10: NOP 0;
435 NETWORK
    TITLE =The End
        BE ;
440 END_ORGANIZATION_BLOCK
        ORGANIZATION_BLOCK OB 40
        TITLE = "Hardware Interrupt"
        //Auswertung von OB40_POINT_ADDR (L8 to L11)
445 //
        //L8 Obere Grenzwert berschritten
        //L9 Untere Grenzwert unterschritten
        VERSION : 1.0
450
VAR_TEMP
    OB40_EV_CLASS : BYTE ; //Bits 0-3 = 1 (Coming event), Bits 4-7 = 1 (Event class 1)

```

```
OB40_STRT_INF : BYTE ;           //16#41 (OB 40 has started)
OB40_PRIORITY : BYTE ;          //Priority of OB Execution
455 OB40_OB_NUMBR : BYTE ;         //40 (Organization block 40, OB40)
OB40_RESERVED_1 : BYTE ;        //Reserved for system
OB40_IO_FLAG : BYTE ;           //16#54 (input module), 16#55 (output module)
OB40_MDŁ_ADDR : WORD ;          //Base address of module initiating interrupt
460 OB40_POINT_ADDR : DWORD ;     //Interrupt status of the module
OB40_DATE_TIME : DATE_AND_TIME ; //Date and time OB40 started
END VAR
BEGIN
NETWORK
TITLE =Geber 1 (Kanal 0): untere Grenzwert
465 U L 10.0; // Kanal 0 untere Grenzwert
SPBNB L001;
L W#16#1;
L MW 100;
470 OW ;
T MW 100;
L001: NOP 0;
NETWORK
TITLE =Geber 1 (Kanal 0): obere Grenzwert
475 U L 50.0; // Kanal 0 obere Grenzwert
SPBNB L002;
L W#16#2;
L MW 100;
480 OW ;
T MW 100;
L002: NOP 0;

485 NETWORK
TITLE =Geber 2 (Kanal 2): untere Grenzwert
U L 20.0; // Kanal 2 untere Grenzwert
490 SPBNB L003;
L W#16#4;
L MW 100;
OW ;
T MW 100;
L003: NOP 0;
495 NETWORK
TITLE =Geber 2 (Kanal 2): obere Grenzwert
U L 50.0; // Kanal 2 obere Grenzwert
500 SPBNB L004;
L W#16#8;
L MW 100;
OW ;
T MW 100;
505 L004: NOP 0;

END_ORGANIZATION_BLOCK
```

E Driftgeschwindigkeiten

Driftgeschwindigkeiten

Tabelle E.1 umfasst alle Driftgeschwindigkeiten, die aus den aufgezeichneten Daten der GEM-TPC extrahiert werden konnten. Die Spalten beinhalten für jeden Run die folgenden Angaben und Werte:

Run-Nummer	Nummer zur eindeutigen Identifizierung des Runs
Runtyp	gibt an, ob mit kosmischer Strahlung (kosm. Str.) oder einem Teilchenstrahl (Strahl) gemessen wurde
Datum und Uhrzeit	Datum sowie Start- und Endzeitpunkt des Runs
Anzahl Ereignisse	Anzahl der aufgezeichneten Ereignisse in diesem Run
Gasgemisch	verwendetes Driftgas
Driftfeld	Driftfeld während des Runs in % von $E_{\text{drift, max}}$ ($= 360 \text{ V/cm}$)
Kante GEM-Folie	Position der ersten GEM-Folie im Zeitspektrum in <i>sample</i> -Nummern
Kante Kathode	Position der Kathodenendkappe im Zeitspektrum in <i>sample</i> -Nummern
Driftlänge	zur Bestimmung der Driftgeschwindigkeit verwendete Driftlänge in mm
Driftgeschwindigkeit	berechnete Driftgeschwindigkeit in mm/ μs

Eine graphische Darstellung der Driftgeschwindigkeiten ist in Abbildung 7.7 zu finden.

Run- Nummer	Runtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} ^{max}]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
2168	kosm. Str.	10.04.11 12:35 – 12:48	1847	ArCO ₂ (90:10)	70,0	9,128 ± 1	476,199 ± 1	727,80 ± 1,00	24,2335 ± 0,1283
2172	kosm. Str.	10.04.11 18:28 – 18:28	744	ArCO ₂ (90:10)	96,6	5,268 ± 1	422,934 ± 1	727,80 ± 1,00	27,1000 ± 0,1493
2173	kosm. Str.	10.04.11 18:28 – 18:29	1895	ArCO ₂ (90:10)	96,6	24,399 ± 1	421,717 ± 1	727,80 ± 1,00	28,4878 ± 0,1600
2174	kosm. Str.	10.04.11 18:32 – 18:48	27524	ArCO ₂ (90:10)	96,6	23,899 ± 1	421,618 ± 1	727,80 ± 1,00	28,4591 ± 0,1598
2175	kosm. Str.	10.04.11 18:56 – 19:23	53357	ArCO ₂ (90:10)	96,6	36,840 ± 1	420,894 ± 1	727,80 ± 1,00	29,4717 ± 0,1679
2176	kosm. Str.	10.04.11 19:23 – 20:08	54271	ArCO ₂ (90:10)	96,6	37,042 ± 1	421,432 ± 1	727,80 ± 1,00	29,4460 ± 0,1676
2178	kosm. Str.	10.04.11 20:36 – 21:05	54048	ArCO ₂ (90:10)	96,6	37,027 ± 1	422,224 ± 1	727,80 ± 1,00	29,3843 ± 0,1672
2179	kosm. Str.	10.04.11 21:05 – 21:06	3091	ArCO ₂ (90:10)	96,6	28,109 ± 1	421,626 ± 1	727,80 ± 1,00	28,7630 ± 0,1622
2182	kosm. Str.	10.04.11 21:45 – 22:03	14022	ArCO ₂ (90:10)	96,6	33,134 ± 1	423,222 ± 1	727,80 ± 1,00	29,0159 ± 0,1642
2183	kosm. Str.	10.04.11 22:03 – 22:13	17743	ArCO ₂ (90:10)	96,6	35,674 ± 1	422,759 ± 1	727,80 ± 1,00	29,2410 ± 0,1660
2186	kosm. Str.	10.04.11 23:17 – 23:56	54767	ArCO ₂ (90:10)	96,6	28,444 ± 1	422,710 ± 1	727,80 ± 1,00	28,7084 ± 0,1618
2187	kosm. Str.	10.04.11 23:56 – 23:57	2712	ArCO ₂ (90:10)	96,6	21,216 ± 1	421,044 ± 1	727,80 ± 1,00	28,3090 ± 0,1586
2190	kosm. Str.	11.04.11 00:33 – 00:44	20922	ArCO ₂ (90:10)	96,6	78,579 ± 1	437,954 ± 1	727,80 ± 1,00	31,4957 ± 0,1846
2191	kosm. Str.	11.04.11 00:44 – 01:06	45007	ArCO ₂ (90:10)	96,6	77,056 ± 1	438,618 ± 1	727,80 ± 1,00	31,3051 ± 0,1830
2192	kosm. Str.	11.04.11 01:08 – 01:35	52259	ArCO ₂ (90:10)	96,6	77,197 ± 1	438,772 ± 1	727,80 ± 1,00	31,3040 ± 0,1830
2193	kosm. Str.	11.04.11 01:35 – 01:47	18477	ArCO ₂ (90:10)	96,6	77,156 ± 1	439,737 ± 1	727,80 ± 1,00	31,2171 ± 0,1823
2194	kosm. Str.	11.04.11 01:47 – 01:58	6180	ArCO ₂ (90:10)	96,6	77,948 ± 1	439,235 ± 1	727,80 ± 1,00	31,3290 ± 0,1832
2195	kosm. Str.	11.04.11 01:50 – 02:07	34208	ArCO ₂ (90:10)	96,6	76,838 ± 1	438,424 ± 1	727,80 ± 1,00	31,3030 ± 0,1830
2196	kosm. Str.	11.04.11 02:08 – 02:16	7810	ArCO ₂ (90:10)	97,3	77,083 ± 1	440,035 ± 1	727,80 ± 1,00	31,1852 ± 0,1820
2197	kosm. Str.	11.04.11 02:16 – 02:26	19714	ArCO ₂ (90:10)	99,4	77,024 ± 1	438,726 ± 1	727,80 ± 1,00	31,2930 ± 0,1829
2214	kosm. Str.	12.04.11 00:22 – 00:27	11133	ArCO ₂ (90:10)	96,6	76,185 ± 1	437,673 ± 1	727,80 ± 1,00	31,3115 ± 0,1831
2215	kosm. Str.	12.04.11 00:35 – 00:41	12120	ArCO ₂ (90:10)	96,6	77,536 ± 1	437,164 ± 1	727,80 ± 1,00	31,4735 ± 0,1844
2232	kosm. Str.	12.04.11 22:23 – 22:30	12107	ArCO ₂ (90:10)	99,4	77,020 ± 1	429,979 ± 1	727,80 ± 1,00	32,0682 ± 0,1895
2233	kosm. Str.	12.04.11 22:31 – 22:37	11372	ArCO ₂ (90:10)	99,4	77,042 ± 1	430,696 ± 1	727,80 ± 1,00	32,0051 ± 0,1890
2234	kosm. Str.	12.04.11 22:39 – 22:40	1478	ArCO ₂ (90:10)	99,4	76,173 ± 1	429,381 ± 1	727,80 ± 1,00	32,0456 ± 0,1893
2235	kosm. Str.	12.04.11 22:41 – 22:49	15118	ArCO ₂ (90:10)	99,4	76,944 ± 1	431,099 ± 1	727,80 ± 1,00	31,9598 ± 0,1886
2236	kosm. Str.	12.04.11 22:50 – 22:58	13807	ArCO ₂ (90:10)	99,4	77,496 ± 1	432,071 ± 1	727,80 ± 1,00	31,9220 ± 0,1883
2237	kosm. Str.	12.04.11 22:58 – 23:04	13315	ArCO ₂ (90:10)	99,4	77,230 ± 1	428,961 ± 1	727,80 ± 1,00	32,1801 ± 0,1905
2238	kosm. Str.	12.04.11 23:04 – 23:12	13818	ArCO ₂ (90:10)	99,4	76,747 ± 1	431,323 ± 1	727,80 ± 1,00	31,9219 ± 0,1883
2239	kosm. Str.	12.04.11 23:12 – 23:19	13267	ArCO ₂ (90:10)	99,4	77,170 ± 1	431,172 ± 1	727,80 ± 1,00	31,9737 ± 0,1887
2240	kosm. Str.	12.04.11 23:19 – 23:22	7360	ArCO ₂ (90:10)	99,4	77,120 ± 1	431,100 ± 1	727,80 ± 1,00	31,9757 ± 0,1887
2242	kosm. Str.	12.04.11 23:31 – 23:36	9778	ArCO ₂ (90:10)	99,4	77,033 ± 1	430,822 ± 1	727,80 ± 1,00	31,9929 ± 0,1889
2243	kosm. Str.	12.04.11 23:32 – 23:37	906	ArCO ₂ (90:10)	99,4	77,063 ± 1	430,535 ± 1	727,80 ± 1,00	32,0216 ± 0,1891
2244	kosm. Str.	12.04.11 23:38 – 23:42	4720	ArCO ₂ (90:10)	99,4	77,040 ± 1	431,273 ± 1	727,80 ± 1,00	31,9528 ± 0,1885
2245	kosm. Str.	12.04.11 23:42 – 23:48	13470	ArCO ₂ (90:10)	99,4	76,819 ± 1	431,790 ± 1	727,80 ± 1,00	31,8864 ± 0,1880
2246	kosm. Str.	12.04.11 23:48 – 23:51	6358	ArCO ₂ (90:10)	99,4	77,249 ± 1	430,885 ± 1	727,80 ± 1,00	32,0068 ± 0,1890
2247	kosm. Str.	12.04.11 23:52 – 23:59	13300	ArCO ₂ (90:10)	99,4	76,985 ± 1	430,863 ± 1	727,80 ± 1,00	31,9848 ± 0,1888
2248	kosm. Str.	12.04.11 23:59 – 00:23	14689	ArCO ₂ (90:10)	48,6	76,526 ± 1	432,265 ± 1	727,80 ± 1,00	31,8176 ± 0,1874
2252	kosm. Str.	13.04.11 00:48 – 00:55	13163	ArCO ₂ (90:10)	99,4	77,039 ± 1	431,468 ± 1	727,80 ± 1,00	31,9352 ± 0,1884
2253	kosm. Str.	13.04.11 00:55 – 01:01	13172	ArCO ₂ (90:10)	99,4	76,758 ± 1	430,830 ± 1	727,80 ± 1,00	31,9674 ± 0,1887
2254	kosm. Str.	13.04.11 01:01 – 01:13	555	ArCO ₂ (90:10)	99,3	76,932 ± 1	432,657 ± 1	727,80 ± 1,00	31,8188 ± 0,1874

Run- Nummer	Runtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} _{max}]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
2256	kosm. Str.	13.04.11 01:19 – 01:26	13351	ArCO ₂ (90:10)	99,4	78,908 ± 1	431,816 ± 1	727,80 ± 1,00	32,0728 ± 0,1896
2257	kosm. Str.	13.04.11 01:26 – 01:33	13214	ArCO ₂ (90:10)	99,4	77,085 ± 1	431,621 ± 1	727,80 ± 1,00	31,9255 ± 0,1883
2258	kosm. Str.	13.04.11 01:33 – 01:36	536	ArCO ₂ (90:10)	99,7	77,512 ± 1	432,117 ± 1	727,80 ± 1,00	31,9193 ± 0,1883
2271	kosm. Str.	13.04.11 15:18 – 15:24	11906	NeCO ₂ (90:10)	99,4	14,986 ± 1	488,862 ± 1	727,80 ± 1,00	23,8855 ± 0,1259
2272	kosm. Str.	13.04.11 15:24 – 15:31	12720	NeCO ₂ (90:10)	99,4	14,565 ± 1	491,609 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7268 ± 0,1248
2273	kosm. Str.	13.04.11 15:31 – 15:37	11355	NeCO ₂ (90:10)	99,4	14,859 ± 1	491,469 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7485 ± 0,1250
2274	kosm. Str.	13.04.11 15:39 – 15:43	8406	NeCO ₂ (90:10)	99,4	14,863 ± 1	490,985 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7728 ± 0,1251
2275	kosm. Str.	13.04.11 15:44 – 15:50	11899	NeCO ₂ (90:10)	99,4	14,739 ± 1	490,340 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7988 ± 0,1253
2276	kosm. Str.	13.04.11 15:50 – 15:56	11975	NeCO ₂ (90:10)	99,4	14,354 ± 1	490,524 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7704 ± 0,1251
2277	kosm. Str.	13.04.11 15:56 – 15:59	2498	NeCO ₂ (90:10)	99,4	14,463 ± 1	491,936 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7055 ± 0,1247
2278	kosm. Str.	13.04.11 16:02 – 16:09	12808	NeCO ₂ (90:10)	99,4	15,299 ± 1	489,187 ± 1	727,80 ± 1,00	23,8849 ± 0,1259
2279	kosm. Str.	13.04.11 16:09 – 16:16	12587	NeCO ₂ (90:10)	99,4	14,555 ± 1	490,794 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7669 ± 0,1251
2280	kosm. Str.	13.04.11 16:18 – 16:24	11842	NeCO ₂ (90:10)	99,4	14,178 ± 1	492,094 ± 1	727,80 ± 1,00	23,6835 ± 0,1245
2281	kosm. Str.	13.04.11 16:24 – 16:31	12322	NeCO ₂ (90:10)	99,4	14,004 ± 1	490,201 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7690 ± 0,1251
2282	kosm. Str.	13.04.11 16:31 – 16:36	11478	NeCO ₂ (90:10)	99,4	14,319 ± 1	491,332 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7284 ± 0,1248
2283	kosm. Str.	13.04.11 16:40 – 16:47	12229	NeCO ₂ (90:10)	99,4	14,019 ± 1	490,722 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7438 ± 0,1249
2284	kosm. Str.	13.04.11 16:47 – 16:48	12560	NeCO ₂ (90:10)	99,4	14,835 ± 1	491,991 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7213 ± 0,1248
2290	kosm. Str.	13.04.11 20:06 – 20:13	11825	NeCO ₂ (90:10)	99,4	15,768 ± 1	492,033 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7657 ± 0,1251
2291	kosm. Str.	13.04.11 20:13 – 20:18	11251	NeCO ₂ (90:10)	99,4	14,327 ± 1	490,019 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7943 ± 0,1253
2293	kosm. Str.	13.04.11 20:27 – 20:33	11373	NeCO ₂ (90:10)	99,4	21,598 ± 1	496,891 ± 1	727,80 ± 1,00	23,8142 ± 0,1254
2294	kosm. Str.	13.04.11 20:33 – 20:39	11607	NeCO ₂ (90:10)	99,4	16,920 ± 1	493,700 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7400 ± 0,1249
2296	kosm. Str.	13.04.11 20:41 – 20:47	11295	NeCO ₂ (90:10)	99,4	16,622 ± 1	492,959 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7620 ± 0,1250
2297	kosm. Str.	13.04.11 20:47 – 20:52	10726	NeCO ₂ (90:10)	99,4	16,772 ± 1	495,714 ± 1	727,80 ± 1,00	23,6328 ± 0,1242
2299	kosm. Str.	13.04.11 20:56 – 21:02	11302	NeCO ₂ (90:10)	99,4	16,987 ± 1	493,474 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7546 ± 0,1250
2300	kosm. Str.	13.04.11 21:02 – 21:05	5608	NeCO ₂ (90:10)	99,4	17,006 ± 1	493,259 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7663 ± 0,1251
2301	kosm. Str.	13.04.11 21:06 – 21:12	10899	NeCO ₂ (90:10)	99,4	16,360 ± 1	492,975 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7482 ± 0,1250
2302	kosm. Str.	13.04.11 21:13 – 21:19	11383	NeCO ₂ (90:10)	99,4	16,856 ± 1	492,650 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7892 ± 0,1252
2303	kosm. Str.	13.04.11 21:19 – 21:21	4340	NeCO ₂ (90:10)	99,4	16,234 ± 1	493,053 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7380 ± 0,1249
2304	kosm. Str.	13.04.11 21:22 – 21:26	6455	NeCO ₂ (90:10)	99,4	16,101 ± 1	493,126 ± 1	727,80 ± 1,00	23,7278 ± 0,1248
2351	Strahl	19.04.11 21:21 – 21:25	24606	ArCO ₂ (90:10)	94,6	14,736 ± 1	458,933 ± 1	727,80 ± 1,00	25,4813 ± 0,1373
2352	Strahl	19.04.11 21:25 – 21:28	24002	ArCO ₂ (90:10)	95,3	14,583 ± 1	455,023 ± 1	727,80 ± 1,00	25,6987 ± 0,1388
2353	Strahl	19.04.11 21:28 – 21:32	23395	ArCO ₂ (90:10)	95,4	14,548 ± 1	454,279 ± 1	727,80 ± 1,00	25,7401 ± 0,1391
2354	Strahl	19.04.11 21:32 – 21:35	20972	ArCO ₂ (90:10)	95,5	13,998 ± 1	453,961 ± 1	727,80 ± 1,00	25,7266 ± 0,1390
2355	Strahl	19.04.11 21:35 – 21:38	18998	ArCO ₂ (90:10)	96,2	13,889 ± 1	451,451 ± 1	727,80 ± 1,00	25,8677 ± 0,1401
2356	Strahl	19.04.11 21:38 – 21:41	17737	ArCO ₂ (90:10)	96,6	13,974 ± 1	448,447 ± 1	727,80 ± 1,00	26,0517 ± 0,1414
2357	Strahl	19.04.11 21:41 – 21:44	18536	ArCO ₂ (90:10)	97,2	13,019 ± 1	445,560 ± 1	727,80 ± 1,00	26,1680 ± 0,1423
2358	Strahl	19.04.11 21:44 – 21:47	18581	ArCO ₂ (90:10)	97,7	13,309 ± 1	442,800 ± 1	727,80 ± 1,00	26,3538 ± 0,1437
2359	Strahl	19.04.11 21:47 – 21:47	3475	ArCO ₂ (90:10)	98,1	13,907 ± 1	441,138 ± 1	727,80 ± 1,00	26,4932 ± 0,1447
2360	Strahl	19.04.11 21:57 – 21:59	16093	ArCO ₂ (90:10)	99,4	14,002 ± 1	432,167 ± 1	727,80 ± 1,00	27,0676 ± 0,1490
2361	Strahl	19.04.11 21:59 – 22:02	16181	ArCO ₂ (90:10)	99,4	13,870 ± 1	432,185 ± 1	727,80 ± 1,00	27,0579 ± 0,1490
2362	Strahl	19.04.11 22:02 – 22:04	16188	ArCO ₂ (90:10)	99,4	13,999 ± 1	432,170 ± 1	727,80 ± 1,00	27,0673 ± 0,1490

Run- Nummer	Runtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} ^{max}]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
2363	Strahl	19.04.11 22:04 – 22:06	12541	ArCO ₂ (90:10)	99,4	13,847 ± 1	432,141 ± 1	727,80 ± 1,00	27,0593 ± 0,1490
2366	Strahl	19.04.11 22:12 – 22:13	8133	ArCO ₂ (90:10)	99,4	8,069 ± 1	411,870 ± 1	727,80 ± 1,00	28,0305 ± 0,1564
2371	Strahl	19.04.11 22:25 – 22:27	16308	ArCO ₂ (90:10)	99,4	33,834 ± 1	452,097 ± 1	727,80 ± 1,00	27,0613 ± 0,1490
2372	Strahl	19.04.11 22:27 – 22:30	16175	ArCO ₂ (90:10)	99,4	33,869 ± 1	452,025 ± 1	727,80 ± 1,00	27,0682 ± 0,1490
2373	Strahl	19.04.11 22:30 – 22:33	16129	ArCO ₂ (90:10)	99,4	33,870 ± 1	451,880 ± 1	727,80 ± 1,00	27,0777 ± 0,1491
2374	Strahl	19.04.11 22:33 – 22:35	15982	ArCO ₂ (90:10)	99,4	33,864 ± 1	451,725 ± 1	727,80 ± 1,00	27,0874 ± 0,1492
2375	Strahl	19.04.11 22:35 – 22:37	10950	ArCO ₂ (90:10)	99,4	33,811 ± 1	451,705 ± 1	727,80 ± 1,00	27,0852 ± 0,1492
2376	Strahl	19.04.11 22:39 – 22:41	15768	ArCO ₂ (90:10)	99,4	33,852 ± 1	450,877 ± 1	727,80 ± 1,00	27,1417 ± 0,1496
2377	Strahl	19.04.11 22:41 – 22:44	15746	ArCO ₂ (90:10)	99,4	33,827 ± 1	450,760 ± 1	727,80 ± 1,00	27,1476 ± 0,1496
2378	Strahl	19.04.11 22:44 – 22:47	15566	ArCO ₂ (90:10)	99,4	33,092 ± 1	450,679 ± 1	727,80 ± 1,00	27,1051 ± 0,1493
2379	Strahl	19.04.11 22:47 – 22:49	15525	ArCO ₂ (90:10)	99,4	33,795 ± 1	450,462 ± 1	727,80 ± 1,00	27,1650 ± 0,1498
2380	Strahl	19.04.11 22:49 – 22:52	15653	ArCO ₂ (90:10)	99,4	33,835 ± 1	450,469 ± 1	727,80 ± 1,00	27,1671 ± 0,1498
2381	Strahl	19.04.11 22:52 – 22:55	3455	ArCO ₂ (90:10)	99,4	33,763 ± 1	450,258 ± 1	727,80 ± 1,00	27,1762 ± 0,1499
2382	Strahl	19.04.11 22:59 – 23:01	15353	ArCO ₂ (90:10)	99,4	33,847 ± 1	450,155 ± 1	727,80 ± 1,00	27,1884 ± 0,1500
2384	Strahl	19.04.11 23:17 – 23:19	14250	ArCO ₂ (90:10)	99,4	33,830 ± 1	449,877 ± 1	727,80 ± 1,00	27,2054 ± 0,1501
2385	Strahl	19.04.11 23:19 – 23:20	8798	ArCO ₂ (90:10)	99,4	33,932 ± 1	449,832 ± 1	727,80 ± 1,00	27,2151 ± 0,1502
2420	Strahl	20.04.11 12:24 – 12:25	6543	NeCO ₂ (90:10)	99,4	14,150 ± 1	502,253 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1892 ± 0,1211
2501	Strahl	22.04.11 01:40 – 01:01	6128	NeCO ₂ (90:10)	98,0	3,052 ± 1	497,628 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8857 ± 0,1190
2503	Strahl	22.04.11 01:08 – 01:10	15241	NeCO ₂ (90:10)	98,0	3,110 ± 1	497,065 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9145 ± 0,1192
2504	Strahl	22.04.11 01:10 – 01:10	4124	NeCO ₂ (90:10)	98,0	5,985 ± 1	500,942 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8681 ± 0,1189
2505	Strahl	22.04.11 01:10 – 01:12	17647	NeCO ₂ (90:10)	98,0	6,235 ± 1	500,369 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9062 ± 0,1192
2506	Strahl	22.04.11 01:12 – 01:12	1263	NeCO ₂ (90:10)	98,0	6,135 ± 1	500,156 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9115 ± 0,1192
2507	Strahl	22.04.11 01:13 – 01:13	3649	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,944 ± 1	502,200 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9006 ± 0,1191
2508	Strahl	22.04.11 01:13 – 01:15	17585	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,594 ± 1	502,691 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9080 ± 0,1192
2509	Strahl	22.04.11 01:15 – 01:17	17464	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,157 ± 1	502,965 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8750 ± 0,1190
2510	Strahl	22.04.11 01:17 – 01:19	17553	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,001 ± 1	502,513 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8887 ± 0,1191
2511	Strahl	22.04.11 01:19 – 01:21	17509	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,407 ± 1	502,727 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8976 ± 0,1191
2512	Strahl	22.04.11 01:21 – 01:23	17430	NeCO ₂ (90:10)	97,9	7,943 ± 1	502,744 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8753 ± 0,1190
2513	Strahl	22.04.11 01:23 – 01:24	8392	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,106 ± 1	502,098 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9128 ± 0,1192
2514	Strahl	22.04.11 01:25 – 01:26	5881	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,985 ± 1	502,283 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8986 ± 0,1191
2516	Strahl	22.04.11 01:53 – 01:53	3620	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,031 ± 1	501,356 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9438 ± 0,1194
2517	Strahl	22.04.11 01:53 – 01:55	13289	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,002 ± 1	501,760 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9237 ± 0,1193
2518	Strahl	22.04.11 02:00 – 02:02	18605	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,122 ± 1	502,322 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9031 ± 0,1192
2519	Strahl	22.04.11 02:02 – 02:04	18619	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,023 ± 1	500,789 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9698 ± 0,1196
2520	Strahl	22.04.11 02:04 – 02:06	18615	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,163 ± 1	501,069 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9633 ± 0,1196
2521	Strahl	22.04.11 02:06 – 02:08	13230	NeCO ₂ (90:10)	97,9	8,037 ± 1	501,716 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9273 ± 0,1193
2522	Strahl	22.04.11 02:14 – 02:15	9851	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,279 ± 1	502,982 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8799 ± 0,1190
2523	Strahl	22.04.11 02:15 – 02:18	24402	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,018 ± 1	502,638 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8837 ± 0,1190
2524	Strahl	22.04.11 02:18 – 02:20	24427	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,237 ± 1	502,876 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8828 ± 0,1190
2525	Strahl	22.04.11 02:20 – 02:22	13044	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,150 ± 1	503,330 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8578 ± 0,1189
2526	Strahl	22.04.11 02:22 – 02:24	3580	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,887 ± 1	503,544 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8359 ± 0,1187

Run- Nummer	Rumtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} _{max}]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
2528	Strahl	22.04.11 02:31 - 02:33	24467	NeCO ₂ (90:10)	97,9	7,999 ± 1	503,056 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8635 ± 0,1189
2529	Strahl	22.04.11 02:33 - 02:33	1412	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,908 ± 1	502,939 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8647 ± 0,1189
2530	Strahl	22.04.11 02:34 - 02:37	24306	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,937 ± 1	502,296 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8958 ± 0,1191
2531	Strahl	22.04.11 02:37 - 02:39	24278	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,095 ± 1	503,066 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8675 ± 0,1189
2532	Strahl	22.04.11 02:39 - 02:42	24291	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,100 ± 1	503,512 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8471 ± 0,1188
2533	Strahl	22.04.11 02:42 - 02:45	23531	NeCO ₂ (90:10)	97,9	8,357 ± 1	503,862 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8429 ± 0,1187
2534	Strahl	22.04.11 02:45 - 02:46	11158	NeCO ₂ (90:10)	97,9	7,919 ± 1	503,085 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8585 ± 0,1189
2536	Strahl	22.04.11 02:50 - 02:51	10657	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,962 ± 1	502,729 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8769 ± 0,1190
2537	Strahl	22.04.11 02:51 - 02:54	23255	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,999 ± 1	502,401 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8938 ± 0,1191
2538	Strahl	22.04.11 02:54 - 02:56	23225	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,039 ± 1	502,856 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8746 ± 0,1190
2539	Strahl	22.04.11 02:56 - 02:59	23188	NeCO ₂ (90:10)	97,9	7,988 ± 1	502,835 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8732 ± 0,1190
2540	Strahl	22.04.11 02:59 - 03:01	14469	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,989 ± 1	502,892 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8706 ± 0,1189
2541	Strahl	22.04.11 03:01 - 03:02	8936	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,815 ± 1	503,378 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8402 ± 0,1187
2542	Strahl	22.04.11 03:02 - 03:04	18906	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,819 ± 1	503,029 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8565 ± 0,1188
2543	Strahl	22.04.11 03:08 - 03:11	5004	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,820 ± 1	502,727 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8705 ± 0,1189
2544	Strahl	22.04.11 03:11 - 03:13	20983	NeCO ₂ (90:10)	97,9	7,811 ± 1	502,880 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8630 ± 0,1189
2545	Strahl	22.04.11 03:14 - 03:15	4528	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,799 ± 1	503,202 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8476 ± 0,1188
2546	Strahl	22.04.11 03:15 - 03:25	21659	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,355 ± 1	502,958 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8384 ± 0,1187
2640	Strahl	01.05.11 01:19 - 01:22	21211	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,744 ± 1	501,169 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9391 ± 0,1194
2641	Strahl	01.05.11 01:28 - 01:35	15107	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,939 ± 1	501,612 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9276 ± 0,1193
2643	Strahl	01.05.11 01:35 - 01:37	7107	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,893 ± 1	503,983 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8159 ± 0,1186
2645	Strahl	01.05.11 01:42 - 01:44	6742	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,906 ± 1	501,357 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9379 ± 0,1194
2646	Strahl	01.05.11 01:44 - 01:48	22598	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,794 ± 1	503,303 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8427 ± 0,1187
2647	Strahl	01.05.11 01:48 - 01:52	136	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,974 ± 1	498,473 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0760 ± 0,1203
2649	Strahl	01.05.11 01:52 - 01:54	3416	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,983 ± 1	502,625 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8827 ± 0,1190
2651	Strahl	01.05.11 01:56 - 02:02	33688	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,051 ± 1	502,558 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8889 ± 0,1191
2652	Strahl	01.05.11 02:06 - 02:07	9211	NeCO ₂ (90:10)	98,0	8,031 ± 1	502,096 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9094 ± 0,1192
2653	Strahl	01.05.11 02:09 - 02:14	29050	NeCO ₂ (90:10)	97,9	7,953 ± 1	502,767 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8748 ± 0,1190
2654	Strahl	01.05.11 02:14 - 02:17	19282	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,973 ± 1	503,375 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8476 ± 0,1188
2655	Strahl	01.05.11 02:19 - 02:25	21469	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,989 ± 1	501,980 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9128 ± 0,1192
2656	Strahl	01.05.11 02:25 - 02:28	4414	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,772 ± 1	501,985 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9026 ± 0,1192
2658	Strahl	01.05.11 02:28 - 02:31	16150	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,839 ± 1	502,803 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8678 ± 0,1189
2659	Strahl	01.05.11 03:12 - 03:17	35147	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,876 ± 1	501,668 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9221 ± 0,1193
2660	Strahl	01.05.11 03:17 - 03:23	32467	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,968 ± 1	502,015 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9103 ± 0,1192
2661	Strahl	01.05.11 03:28 - 03:34	34136	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,739 ± 1	502,248 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8889 ± 0,1191
2662	Strahl	01.05.11 03:34 - 03:40	34439	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,741 ± 1	502,361 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8837 ± 0,1190
2663	Strahl	01.05.11 03:40 - 03:46	34688	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,805 ± 1	501,121 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9442 ± 0,1194
2664	Strahl	01.05.11 03:46 - 03:52	33187	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,840 ± 1	501,608 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9232 ± 0,1193
2665	Strahl	01.05.11 03:52 - 03:57	29991	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,841 ± 1	501,125 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9457 ± 0,1194
2666	Strahl	01.05.11 03:57 - 04:03	29054	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,872 ± 1	500,785 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9630 ± 0,1196
2667	Strahl	01.05.11 04:03 - 04:10	32323	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,735 ± 1	501,818 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9086 ± 0,1192

Run- Nummer	Runtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% $E_{\text{drift}}^{\text{max}}$]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/ps]
2668	Strahl	01.05.11 04:10 – 04:15	33506	NeCO ₂ (90:10)	97,9	7,843 ± 1	501,461 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9302 ± 0,1193
2669	Strahl	01.05.11 04:15 – 04:16	902	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,894 ± 1	501,565 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9277 ± 0,1193
2670	Strahl	01.05.11 04:16 – 04:22	29667	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,678 ± 1	501,207 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9343 ± 0,1194
2671	Strahl	01.05.11 04:22 – 04:27	30327	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,733 ± 1	501,318 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9317 ± 0,1194
2672	Strahl	01.05.11 04:27 – 04:32	29595	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,822 ± 1	501,079 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9470 ± 0,1195
2673	Strahl	01.05.11 04:32 – 04:47	940	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,789 ± 1	500,921 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9528 ± 0,1195
2674	Strahl	01.05.11 04:47 – 04:54	27587	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,704 ± 1	500,668 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9606 ± 0,1195
2675	Strahl	01.05.11 04:54 – 04:59	27469	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,739 ± 1	500,712 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9602 ± 0,1195
2676	Strahl	01.05.11 04:59 – 05:05	27362	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,737 ± 1	500,577 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9664 ± 0,1196
2677	Strahl	01.05.11 05:05 – 05:10	27252	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,842 ± 1	500,562 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9720 ± 0,1196
2678	Strahl	01.05.11 05:10 – 05:15	27255	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,754 ± 1	500,501 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9707 ± 0,1196
2679	Strahl	01.05.11 05:15 – 05:20	27195	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,697 ± 1	500,449 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9705 ± 0,1196
2680	Strahl	01.05.11 05:20 – 05:25	27294	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,721 ± 1	500,470 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9706 ± 0,1196
2681	Strahl	01.05.11 05:25 – 05:30	27168	NeCO ₂ (90:10)	97,9	7,694 ± 1	500,633 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9617 ± 0,1196
2683	Strahl	01.05.11 05:31 – 05:37	26322	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,672 ± 1	500,716 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9569 ± 0,1195
2684	Strahl	01.05.11 05:37 – 05:43	26112	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,646 ± 1	500,800 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9517 ± 0,1195
2685	Strahl	01.05.11 05:56 – 06:11	26563	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,772 ± 1	500,857 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9550 ± 0,1195
2686	Strahl	01.05.11 06:11 – 06:17	26236	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,718 ± 1	500,840 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9532 ± 0,1195
2687	Strahl	01.05.11 06:17 – 06:20	16182	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,706 ± 1	500,758 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9565 ± 0,1195
2688	Strahl	01.05.11 06:22 – 06:27	26106	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,624 ± 1	500,919 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9452 ± 0,1194
2689	Strahl	01.05.11 06:27 – 06:32	24204	NeCO ₂ (90:10)	97,9	7,680 ± 1	500,821 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9523 ± 0,1195
2690	Strahl	01.05.11 06:33 – 06:40	27732	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,577 ± 1	501,228 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9286 ± 0,1193
2691	Strahl	01.05.11 06:40 – 06:45	25480	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,568 ± 1	501,221 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9285 ± 0,1193
2692	Strahl	01.05.11 06:45 – 06:52	18621	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,680 ± 1	500,934 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9471 ± 0,1195
2696	Strahl	01.05.11 21:35 – 21:44	34602	NeCO ₂ (90:10)	97,9	7,068 ± 1	502,005 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8691 ± 0,1189
2697	Strahl	01.05.11 21:47 – 21:52	18084	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,466 ± 1	501,511 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9104 ± 0,1192
2699	Strahl	01.05.11 22:32 – 23:03	15865	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,729 ± 1	500,059 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9902 ± 0,1197
2701	Strahl	01.05.11 23:14 – 23:26	9580	NeCO ₂ (90:10)	97,9	7,383 ± 1	500,921 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9339 ± 0,1194
2702	Strahl	01.05.11 23:26 – 23:29	11179	NeCO ₂ (90:10)	98,0	6,984 ± 1	501,877 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8711 ± 0,1189
2703	Strahl	01.05.11 23:29 – 23:51	37552	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,194 ± 1	502,025 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8740 ± 0,1190
2704	Strahl	01.05.11 23:51 – 00:00	37540	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,189 ± 1	502,010 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8744 ± 0,1190
2705	Strahl	02.05.11 00:00 – 00:10	37511	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,446 ± 1	502,215 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8768 ± 0,1190
2706	Strahl	02.05.11 00:10 – 00:15	21965	NeCO ₂ (90:10)	98,0	6,944 ± 1	502,274 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8509 ± 0,1188
2711	Strahl	02.05.11 00:32 – 00:42	38751	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,430 ± 1	500,058 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9762 ± 0,1197
2712	Strahl	02.05.11 00:42 – 00:51	39204	NeCO ₂ (90:10)	97,8	8,326 ± 1	501,723 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9405 ± 0,1194
2713	Strahl	02.05.11 00:51 – 01:01	38163	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,617 ± 1	500,873 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9470 ± 0,1195
2714	Strahl	02.05.11 01:01 – 01:06	19156	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,548 ± 1	501,936 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8944 ± 0,1191
2717	Strahl	02.05.11 01:18 – 01:35	35861	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,373 ± 1	502,372 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8662 ± 0,1189
2718	Strahl	02.05.11 01:35 – 01:55	34473	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,261 ± 1	502,152 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8712 ± 0,1189
2719	Strahl	02.05.11 01:55 – 02:04	35930	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,264 ± 1	502,205 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8689 ± 0,1189
2720	Strahl	02.05.11 02:07 – 02:16	35273	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,067 ± 1	500,691 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9299 ± 0,1193

Run- Nummer	Rumtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} ^{max}]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
2721	Strahl	02.05.11 02:16 – 02:26	34934	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,245 ± 1	500,068 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9672 ± 0,1196
2722	Strahl	02.05.11 02:26 – 02:35	35176	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,162 ± 1	500,069 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9632 ± 0,1196
2723	Strahl	02.05.11 02:35 – 02:44	35331	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,499 ± 1	500,243 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9709 ± 0,1196
2725	Strahl	02.05.11 02:53 – 03:01	31536	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,274 ± 1	499,681 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9866 ± 0,1197
2726	Strahl	02.05.11 03:01 – 03:10	36729	NeCO ₂ (90:10)	98,0	7,298 ± 1	500,028 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9715 ± 0,1196
2728	Strahl	02.05.11 03:19 – 03:22	12465	NeCO ₂ (90:10)	98,0	11,010 ± 1	501,930 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0562 ± 0,1202
2729	Strahl	02.05.11 03:22 – 03:25	9704	NeCO ₂ (90:10)	98,0	11,713 ± 1	499,722 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1937 ± 0,1211
2730	Strahl	02.05.11 03:25 – 03:27	6986	NeCO ₂ (90:10)	97,9	10,384 ± 1	503,017 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9760 ± 0,1197
2731	Strahl	02.05.11 03:27 – 03:36	37753	NeCO ₂ (90:10)	98,0	11,520 ± 1	501,291 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1103 ± 0,1206
2732	Strahl	02.05.11 03:36 – 03:40	16358	NeCO ₂ (90:10)	98,0	11,371 ± 1	503,116 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0175 ± 0,1199
2734	Strahl	02.05.11 03:44 – 03:53	37276	NeCO ₂ (90:10)	98,0	10,807 ± 1	503,046 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9944 ± 0,1198
2735	Strahl	02.05.11 03:53 – 04:03	37422	NeCO ₂ (90:10)	98,0	10,562 ± 1	501,054 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0763 ± 0,1203
2736	Strahl	02.05.11 04:03 – 04:12	37427	NeCO ₂ (90:10)	98,0	10,640 ± 1	502,241 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0242 ± 0,1200
2737	Strahl	02.05.11 04:12 – 04:21	37339	NeCO ₂ (90:10)	98,0	10,882 ± 1	503,097 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9955 ± 0,1198
2738	Strahl	02.05.11 04:21 – 04:31	36750	NeCO ₂ (90:10)	98,0	10,915 ± 1	503,712 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9684 ± 0,1196
2739	Strahl	02.05.11 04:31 – 04:38	4473	NeCO ₂ (90:10)	97,9	10,177 ± 1	502,730 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9798 ± 0,1197
2740	Strahl	02.05.11 04:38 – 04:42	8249	NeCO ₂ (90:10)	98,0	10,651 ± 1	501,343 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0669 ± 0,1203
2741	Strahl	02.05.11 04:42 – 04:54	37307	NeCO ₂ (90:10)	97,9	11,071 ± 1	502,253 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0439 ± 0,1201
2742	Strahl	02.05.11 04:54 – 05:04	37192	NeCO ₂ (90:10)	97,9	10,563 ± 1	501,726 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0448 ± 0,1201
2743	Strahl	02.05.11 05:04 – 05:15	37121	NeCO ₂ (90:10)	98,0	11,110 ± 1	501,471 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0825 ± 0,1204
2744	Strahl	02.05.11 05:15 – 05:25	37066	NeCO ₂ (90:10)	98,0	10,828 ± 1	502,104 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0395 ± 0,1201
2745	Strahl	02.05.11 05:25 – 05:35	37141	NeCO ₂ (90:10)	98,0	10,704 ± 1	501,945 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0411 ± 0,1201
2748	Strahl	02.05.11 05:54 – 06:03	36952	NeCO ₂ (90:10)	97,9	10,766 ± 1	501,309 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0739 ± 0,1203
2749	Strahl	02.05.11 06:03 – 06:13	36859	NeCO ₂ (90:10)	97,9	10,546 ± 1	501,175 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0699 ± 0,1203
2751	Strahl	02.05.11 06:32 – 06:44	36841	NeCO ₂ (90:10)	97,9	10,749 ± 1	500,220 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1245 ± 0,1207
2752	Strahl	02.05.11 06:44 – 06:46	2620	NeCO ₂ (90:10)	97,9	10,428 ± 1	500,789 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0825 ± 0,1204
2753	Strahl	02.05.11 06:45 – 06:57	36820	NeCO ₂ (90:10)	97,9	10,246 ± 1	500,389 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0927 ± 0,1204
2754	Strahl	02.05.11 06:57 – 07:07	37841	NeCO ₂ (90:10)	97,9	10,412 ± 1	501,615 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0429 ± 0,1201
2758	Strahl	02.05.11 07:29 – 07:35	27926	NeCO ₂ (90:10)	98,0	10,419 ± 1	502,624 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9960 ± 0,1198
2765	Strahl	02.05.11 08:41 – 08:52	760	NeCO ₂ (90:10)	98,0	14,071 ± 1	502,241 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1861 ± 0,1211
2766	Strahl	02.05.11 08:52 – 09:03	7843	NeCO ₂ (90:10)	98,0	10,073 ± 1	501,371 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0385 ± 0,1201
2767	Strahl	02.05.11 09:01 – 09:17	34613	NeCO ₂ (90:10)	97,9	10,115 ± 1	501,347 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0416 ± 0,1201
2768	Strahl	02.05.11 09:17 – 09:21	595	NeCO ₂ (90:10)	98,0	11,471 ± 1	499,944 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1717 ± 0,1210
2769	Strahl	02.05.11 09:19 – 09:29	22887	NeCO ₂ (90:10)	98,0	10,550 ± 1	501,151 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0712 ± 0,1203
2770	Strahl	02.05.11 09:35 – 09:38	7497	NeCO ₂ (90:10)	97,9	10,078 ± 1	502,003 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0091 ± 0,1199
2771	Strahl	02.05.11 09:38 – 09:43	8663	NeCO ₂ (90:10)	97,9	10,021 ± 1	501,254 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0415 ± 0,1201
2772	Strahl	02.05.11 09:47 – 09:59	31906	NeCO ₂ (90:10)	97,9	10,071 ± 1	501,522 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0313 ± 0,1200
2773	Strahl	02.05.11 10:01 – 10:14	34741	NeCO ₂ (90:10)	99,9	10,055 ± 1	501,683 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0230 ± 0,1200
2963	kosm. Str.	02.06.11 22:22 – 23:06	206075	ArCO ₂ (90:10)	84,0	9,256 ± 1	500,025 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0633 ± 0,1202
2964	kosm. Str.	02.06.11 23:06 – 23:10	22147	ArCO ₂ (90:10)	84,0	9,485 ± 1	499,521 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0978 ± 0,1205
2965	kosm. Str.	02.06.11 23:11 – 23:19	35075	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,383 ± 1	494,356 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1008 ± 0,1205

Run- Nummer	Runtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} E _{max}]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
2968	kosm. Str.	03.06.11 00:20 – 00:30	47729	ArCO ₂ (90:10)	84,0	9,473 ± 1	500,391 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0563 ± 0,1202
2974	kosm. Str.	03.06.11 00:42 – 00:54	58069	ArCO ₂ (90:10)	84,0	9,350 ± 1	500,234 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0579 ± 0,1202
2975	kosm. Str.	03.06.11 00:55 – 01:33	188396	ArCO ₂ (90:10)	84,0	9,330 ± 1	498,498 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1388 ± 0,1208
2976	kosm. Str.	03.06.11 01:33 – 02:12	190138	ArCO ₂ (90:10)	84,0	9,363 ± 1	499,415 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0970 ± 0,1205
2977	kosm. Str.	03.06.11 02:12 – 02:49	185581	ArCO ₂ (90:10)	84,0	9,324 ± 1	499,089 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1106 ± 0,1206
2978	kosm. Str.	03.06.11 02:49 – 03:27	185329	ArCO ₂ (90:10)	84,0	9,587 ± 1	499,282 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1139 ± 0,1206
2979	kosm. Str.	03.06.11 03:27 – 04:05	188261	ArCO ₂ (90:10)	84,0	9,320 ± 1	499,196 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1053 ± 0,1205
2980	kosm. Str.	03.06.11 04:05 – 04:44	190762	ArCO ₂ (90:10)	84,0	9,396 ± 1	499,354 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1014 ± 0,1205
2981	kosm. Str.	03.06.11 04:44 – 05:23	193102	ArCO ₂ (90:10)	84,0	9,353 ± 1	499,208 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1063 ± 0,1205
3030	Strahl	03.06.11 22:56 – 01:27	43288	ArCO ₂ (90:10)	84,0	8,586 ± 1	495,768 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2331 ± 0,1214
3031	Strahl	04.06.11 02:16 – 02:35	5409	ArCO ₂ (90:10)	84,0	8,000 ± 1	496,109 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1890 ± 0,1211
3032	Strahl	04.06.11 03:20 – 03:30	193	ArCO ₂ (90:10)	84,0	9,148 ± 1	498,999 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1069 ± 0,1205
3033	Strahl	04.06.11 04:30 – 06:36	75920	ArCO ₂ (90:10)	84,0	9,157 ± 1	497,003 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2011 ± 0,1212
3034	Strahl	04.06.11 06:36 – 08:36	115771	ArCO ₂ (90:10)	84,0	8,271 ± 1	497,811 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1212 ± 0,1206
3035	Strahl	04.06.11 09:01 – 10:07	24744	ArCO ₂ (90:10)	84,0	8,361 ± 1	496,791 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1737 ± 0,1210
3036	Strahl	04.06.11 10:51 – 12:24	25672	ArCO ₂ (90:10)	84,0	8,031 ± 1	494,846 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2506 ± 0,1215
3038	Strahl	04.06.11 12:32 – 13:24	23537	ArCO ₂ (90:10)	84,0	8,357 ± 1	494,383 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2883 ± 0,1218
3039	Strahl	04.06.11 15:45 – 18:54	126590	ArCO ₂ (90:10)	84,0	8,138 ± 1	492,361 ± 1	727,80 ± 1,00	23,3751 ± 0,1224
3050	Strahl	04.06.11 22:53 – 23:49	107702	ArCO ₂ (90:10)	84,0	7,838 ± 1	493,040 ± 1	727,80 ± 1,00	23,3279 ± 0,1221
3051	Strahl	04.06.11 23:49 – 00:26	70147	ArCO ₂ (90:10)	84,0	7,862 ± 1	493,084 ± 1	727,80 ± 1,00	23,3270 ± 0,1220
3058	Strahl	05.06.11 01:04 – 01:23	35301	ArCO ₂ (90:10)	84,0	7,674 ± 1	493,226 ± 1	727,80 ± 1,00	23,3111 ± 0,1219
3059	Strahl	05.06.11 01:23 – 02:15	99535	ArCO ₂ (90:10)	84,0	7,939 ± 1	493,132 ± 1	727,80 ± 1,00	23,3283 ± 0,1221
3060	Strahl	05.06.11 02:17 – 02:22	8726	ArCO ₂ (90:10)	84,0	8,213 ± 1	493,433 ± 1	727,80 ± 1,00	23,3271 ± 0,1220
3061	Strahl	05.06.11 02:28 – 03:10	80443	ArCO ₂ (90:10)	84,0	7,144 ± 1	493,560 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2697 ± 0,1217
3062	Strahl	05.06.11 03:26 – 04:20	102980	ArCO ₂ (90:10)	84,0	8,158 ± 1	493,930 ± 1	727,80 ± 1,00	23,3005 ± 0,1219
3063	Strahl	05.06.11 04:20 – 05:21	110817	ArCO ₂ (90:10)	84,0	8,115 ± 1	492,914 ± 1	727,80 ± 1,00	23,3473 ± 0,1222
3178	Strahl	09.06.11 00:54 – 02:21	128073	ArCO ₂ (90:10)	65,0	206,704 ± 1	495,430 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1550 ± 0,2603
3179	Strahl	09.06.11 02:21 – 03:51	122881	ArCO ₂ (90:10)	65,0	207,125 ± 1	495,243 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1848 ± 0,2609
3185	Strahl	09.06.11 10:07 – 10:20	51807	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,253 ± 1	503,027 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1526 ± 0,2602
3186	Strahl	09.06.11 10:20 – 10:32	49173	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,375 ± 1	502,037 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2569 ± 0,2623
3188	Strahl	09.06.11 10:36 – 12:02	133460	ArCO ₂ (90:10)	65,0	210,514 ± 1	499,381 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1481 ± 0,2601
3189	Strahl	09.06.11 12:02 – 12:59	100836	ArCO ₂ (90:10)	64,9	208,540 ± 1	496,867 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1746 ± 0,2607
3190	Strahl	09.06.11 12:59 – 13:04	8960	ArCO ₂ (90:10)	65,0	206,132 ± 1	495,681 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1147 ± 0,2595
3191	Strahl	09.06.11 13:04 – 13:10	10992	ArCO ₂ (90:10)	65,0	161,142 ± 1	446,324 ± 1	262,79 ± 4,34	14,3309 ± 0,2637
3192	Strahl	09.06.11 13:12 – 13:38	47920	ArCO ₂ (90:10)	66,8	206,138 ± 1	496,110 ± 1	262,79 ± 4,34	14,0942 ± 0,2591
3196	Strahl	09.06.11 15:33 – 15:49	27423	ArCO ₂ (90:10)	64,1	210,615 ± 1	492,906 ± 1	262,79 ± 4,34	14,4776 ± 0,2666
3197	Strahl	09.06.11 15:49 – 15:55	10453	ArCO ₂ (90:10)	65,0	206,463 ± 1	492,332 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2964 ± 0,2631
3198	Strahl	09.06.11 15:55 – 16:00	10339	ArCO ₂ (90:10)	65,0	208,333 ± 1	492,283 ± 1	262,79 ± 4,34	14,3931 ± 0,2650
3199	Strahl	09.06.11 16:31 – 17:24	112043	ArCO ₂ (90:10)	64,9	208,693 ± 1	493,875 ± 1	262,79 ± 4,34	14,3309 ± 0,2637
3200	Strahl	09.06.11 17:24 – 18:28	136874	ArCO ₂ (90:10)	65,0	208,234 ± 1	494,270 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2881 ± 0,2629
3201	Strahl	09.06.11 18:28 – 19:39	142151	ArCO ₂ (90:10)	65,0	210,120 ± 1	494,872 ± 1	262,79 ± 4,34	14,3525 ± 0,2642

Run- Nummer	Runtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} _{max}]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
3202	Strahl	09.06.11 19:39 – 20:16	78083	ArCO ₂ (90:10)	65,0	201,897 ± 1	495,721 ± 1	262,79 ± 4,34	13,9094 ± 0,2554
3203	Strahl	09.06.11 20:34 – 21:45	144541	ArCO ₂ (90:10)	65,0	206,957 ± 1	495,402 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1688 ± 0,2605
3204	Strahl	09.06.11 21:45 – 22:40	109124	ArCO ₂ (90:10)	65,0	207,249 ± 1	493,913 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2568 ± 0,2623
3208	Strahl	09.06.11 23:14 – 00:23	148772	ArCO ₂ (90:10)	65,0	207,870 ± 1	494,268 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2700 ± 0,2625
3209	Strahl	10.06.11 00:27 – 01:36	148079	ArCO ₂ (90:10)	65,0	208,167 ± 1	494,192 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2886 ± 0,2629
3210	Strahl	10.06.11 01:36 – 02:50	148836	ArCO ₂ (90:10)	65,0	206,506 ± 1	494,260 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2028 ± 0,2612
3211	Strahl	10.06.11 02:50 – 04:00	149414	ArCO ₂ (90:10)	65,0	205,432 ± 1	494,605 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1331 ± 0,2598
3212	Strahl	10.06.11 04:00 – 05:08	148229	ArCO ₂ (90:10)	65,0	207,003 ± 1	494,412 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2198 ± 0,2615
3213	Strahl	10.06.11 05:08 – 06:24	146450	ArCO ₂ (90:10)	65,0	205,999 ± 1	494,281 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1768 ± 0,2607
3214	Strahl	10.06.11 06:24 – 07:36	144843	ArCO ₂ (90:10)	65,0	207,704 ± 1	494,133 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2685 ± 0,2625
3215	Strahl	10.06.11 07:36 – 07:40	4954	ArCO ₂ (90:10)	65,0	213,180 ± 1	494,622 ± 1	262,79 ± 4,34	14,5213 ± 0,2675
3217	Strahl	10.06.11 07:53 – 09:00	142052	ArCO ₂ (90:10)	65,0	207,119 ± 1	494,488 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2218 ± 0,2616
3218	Strahl	10.06.11 09:00 – 10:09	142649	ArCO ₂ (90:10)	65,0	203,560 ± 1	495,748 ± 1	262,79 ± 4,34	13,9873 ± 0,2570
3219	Strahl	10.06.11 10:09 – 11:15	142120	ArCO ₂ (90:10)	65,0	204,050 ± 1	494,970 ± 1	262,79 ± 4,34	14,0482 ± 0,2582
3220	Strahl	10.06.11 11:15 – 12:20	143304	ArCO ₂ (90:10)	65,0	204,169 ± 1	494,655 ± 1	262,79 ± 4,34	14,0692 ± 0,2586
3221	Strahl	10.06.11 12:20 – 13:26	130166	ArCO ₂ (90:10)	65,0	203,754 ± 1	493,321 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1139 ± 0,2595
3222	Strahl	10.06.11 13:47 – 14:54	147924	ArCO ₂ (90:10)	65,0	205,505 ± 1	491,955 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2674 ± 0,2625
3223	Strahl	10.06.11 14:54 – 15:59	148846	ArCO ₂ (90:10)	65,0	204,941 ± 1	491,524 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2608 ± 0,2624
3224	Strahl	10.06.11 15:59 – 17:07	149189	ArCO ₂ (90:10)	65,0	201,773 ± 1	490,365 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1616 ± 0,2604
3225	Strahl	10.06.11 17:07 – 18:13	150216	ArCO ₂ (90:10)	65,0	200,512 ± 1	489,803 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1273 ± 0,2597
3226	Strahl	10.06.11 18:13 – 19:17	146548	ArCO ₂ (90:10)	65,0	203,046 ± 1	489,942 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2453 ± 0,2620
3227	Strahl	10.06.11 19:17 – 19:38	47677	ArCO ₂ (90:10)	65,0	202,372 ± 1	490,302 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1941 ± 0,2610
3229	Strahl	10.06.11 20:58 – 21:15	38845	ArCO ₂ (90:10)	65,0	205,002 ± 1	490,839 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2980 ± 0,2631
3230	Strahl	10.06.11 21:24 – 21:26	4600	ArCO ₂ (90:10)	65,0	210,615 ± 1	490,709 ± 1	262,79 ± 4,34	14,5912 ± 0,2689
3231	Strahl	10.06.11 21:49 – 22:51	141089	ArCO ₂ (90:10)	65,0	203,802 ± 1	490,881 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2362 ± 0,2619
3232	Strahl	10.06.11 22:51 – 23:17	61331	ArCO ₂ (90:10)	65,0	205,732 ± 1	490,660 ± 1	262,79 ± 4,34	14,3437 ± 0,2640
3233	Strahl	10.06.11 23:26 – 00:30	137417	ArCO ₂ (90:10)	65,0	203,889 ± 1	490,632 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2529 ± 0,2622
3234	Strahl	11.06.11 00:31 – 01:33	135751	ArCO ₂ (90:10)	65,0	206,560 ± 1	491,158 ± 1	262,79 ± 4,34	14,3603 ± 0,2643
3235	Strahl	11.06.11 01:33 – 02:35	133405	ArCO ₂ (90:10)	65,0	202,913 ± 1	491,666 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1537 ± 0,2602
3236	Strahl	11.06.11 02:35 – 03:34	136282	ArCO ₂ (90:10)	65,0	201,371 ± 1	492,124 ± 1	262,79 ± 4,34	14,0563 ± 0,2583
3237	Strahl	11.06.11 03:34 – 05:15	137245	ArCO ₂ (90:10)	65,0	207,357 ± 1	492,057 ± 1	262,79 ± 4,34	14,3551 ± 0,2642
3238	Strahl	11.06.11 05:15 – 07:31	16109	ArCO ₂ (90:10)	65,0	203,490 ± 1	493,663 ± 1	262,79 ± 4,34	14,0844 ± 0,2589
3239	Strahl	11.06.11 07:31 – 08:34	144653	ArCO ₂ (90:10)	65,0	203,516 ± 1	494,235 ± 1	262,79 ± 4,34	14,0579 ± 0,2584
3240	Strahl	11.06.11 08:34 – 09:35	139255	ArCO ₂ (90:10)	65,0	208,789 ± 1	496,359 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2119 ± 0,2614
3241	Strahl	11.06.11 09:35 – 10:38	137696	ArCO ₂ (90:10)	65,0	210,149 ± 1	498,507 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1730 ± 0,2606
3242	Strahl	11.06.11 10:38 – 11:44	137563	ArCO ₂ (90:10)	65,0	207,843 ± 1	498,881 ± 1	262,79 ± 4,34	14,0425 ± 0,2581
3243	Strahl	11.06.11 11:44 – 12:41	138109	ArCO ₂ (90:10)	65,0	208,115 ± 1	498,184 ± 1	262,79 ± 4,34	14,0894 ± 0,2590
3245	Strahl	11.06.11 13:08 – 14:04	142310	ArCO ₂ (90:10)	65,0	207,152 ± 1	496,399 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1295 ± 0,2598
3246	Strahl	11.06.11 14:04 – 14:55	167755	ArCO ₂ (90:10)	65,0	207,412 ± 1	495,845 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1694 ± 0,2606
3247	Strahl	11.06.11 14:55 – 15:04	23701	ArCO ₂ (90:10)	65,0	206,772 ± 1	495,125 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1733 ± 0,2606
3253	Strahl	11.06.11 19:34 – 19:49	37721	ArCO ₂ (90:10)	65,0	205,366 ± 1	491,306 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2929 ± 0,2630

Run- Nummer	Run- typ	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} ^{max}]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/ps]
3254	Strahl	11.06.11 19:49 – 21:11	147064	ArCO ₂ (90:10)	65,0	203,191 ± 1	492,301 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1362 ± 0,2599
3255	Strahl	11.06.11 21:11 – 22:26	141643	ArCO ₂ (90:10)	65,0	209,272 ± 1	493,237 ± 1	262,79 ± 4,34	14,3923 ± 0,2650
3256	Strahl	11.06.11 22:26 – 23:21	140843	ArCO ₂ (90:10)	65,0	204,858 ± 1	492,894 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1889 ± 0,2609
3257	Strahl	11.06.11 23:21 – 23:37	39499	ArCO ₂ (90:10)	64,9	206,099 ± 1	493,575 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2165 ± 0,2615
3258	Strahl	11.06.11 23:38 – 00:35	129928	ArCO ₂ (90:10)	65,0	206,186 ± 1	494,276 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1862 ± 0,2609
3259	Strahl	12.06.11 00:35 – 01:35	128238	ArCO ₂ (90:10)	65,0	206,374 ± 1	494,837 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1679 ± 0,2605
3260	Strahl	12.06.11 01:35 – 02:26	130696	ArCO ₂ (90:10)	65,0	203,594 ± 1	495,409 ± 1	262,79 ± 4,34	14,0051 ± 0,2573
3261	Strahl	12.06.11 02:26 – 03:18	133940	ArCO ₂ (90:10)	65,0	206,700 ± 1	495,075 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1232 ± 0,2596
3262	Strahl	12.06.11 03:18 – 04:10	136043	ArCO ₂ (90:10)	65,0	207,008 ± 1	495,048 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1887 ± 0,2609
3263	Strahl	12.06.11 04:10 – 05:02	136758	ArCO ₂ (90:10)	65,0	206,961 ± 1	494,719 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2026 ± 0,2612
3264	Strahl	12.06.11 05:02 – 05:56	137142	ArCO ₂ (90:10)	65,0	208,654 ± 1	494,475 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2988 ± 0,2631
3265	Strahl	12.06.11 05:56 – 06:49	137017	ArCO ₂ (90:10)	65,0	205,479 ± 1	494,722 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1297 ± 0,2598
3266	Strahl	12.06.11 06:49 – 07:44	137608	ArCO ₂ (90:10)	65,0	207,275 ± 1	494,437 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2321 ± 0,2618
3267	Strahl	12.06.11 07:44 – 08:38	135776	ArCO ₂ (90:10)	65,0	205,434 ± 1	495,122 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1080 ± 0,2593
3268	Strahl	12.06.11 08:38 – 09:31	133401	ArCO ₂ (90:10)	65,0	208,100 ± 1	497,476 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1232 ± 0,2596
3269	Strahl	12.06.11 09:31 – 10:23	132920	ArCO ₂ (90:10)	65,0	209,037 ± 1	498,061 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1404 ± 0,2600
3270	Strahl	12.06.11 10:23 – 11:35	130409	ArCO ₂ (90:10)	65,0	208,524 ± 1	497,061 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1642 ± 0,2605
3271	Strahl	12.06.11 11:35 – 12:28	132602	ArCO ₂ (90:10)	65,0	205,333 ± 1	495,152 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1016 ± 0,2592
3272	Strahl	12.06.11 12:28 – 13:23	133917	ArCO ₂ (90:10)	65,0	206,305 ± 1	493,816 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2148 ± 0,2614
3273	Strahl	12.06.11 13:23 – 14:17	135800	ArCO ₂ (90:10)	65,0	205,017 ± 1	493,167 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1833 ± 0,2608
3274	Strahl	12.06.11 14:17 – 15:14	141080	ArCO ₂ (90:10)	65,0	204,558 ± 1	492,338 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2015 ± 0,2612
3275	Strahl	12.06.11 15:14 – 16:14	136047	ArCO ₂ (90:10)	65,0	202,290 ± 1	491,409 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1357 ± 0,2599
3276	Strahl	12.06.11 16:28 – 16:29	1581	ArCO ₂ (90:10)	65,0	204,415 ± 1	490,800 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2707 ± 0,2625
3277	Strahl	12.06.11 16:32 – 17:29	142005	ArCO ₂ (90:10)	65,0	204,425 ± 1	490,857 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2683 ± 0,2625
3278	Strahl	12.06.11 17:29 – 18:28	142169	ArCO ₂ (90:10)	65,0	202,898 ± 1	490,544 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2081 ± 0,2613
3279	Strahl	12.06.11 18:28 – 19:25	141097	ArCO ₂ (90:10)	65,0	202,634 ± 1	490,081 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2180 ± 0,2615
3280	Strahl	12.06.11 19:25 – 20:22	141951	ArCO ₂ (90:10)	65,0	202,560 ± 1	490,069 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2149 ± 0,2614
3281	Strahl	12.06.11 20:22 – 21:23	139782	ArCO ₂ (90:10)	65,0	204,352 ± 1	490,393 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2878 ± 0,2629
3282	Strahl	12.06.11 21:23 – 22:16	135957	ArCO ₂ (90:10)	65,0	203,831 ± 1	491,114 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2261 ± 0,2617
3283	Strahl	12.06.11 22:16 – 23:10	132811	ArCO ₂ (90:10)	65,0	206,326 ± 1	491,746 ± 1	262,79 ± 4,34	14,3189 ± 0,2635
3284	Strahl	12.06.11 23:10 – 00:03	130240	ArCO ₂ (90:10)	65,0	206,248 ± 1	492,190 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2928 ± 0,2630
3285	Strahl	13.06.11 00:03 – 01:23	128661	ArCO ₂ (90:10)	65,0	204,879 ± 1	492,558 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2065 ± 0,2613
3286	Strahl	13.06.11 01:23 – 02:22	132220	ArCO ₂ (90:10)	65,0	203,710 ± 1	492,672 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1434 ± 0,2600
3287	Strahl	13.06.11 02:22 – 03:20	136577	ArCO ₂ (90:10)	65,0	200,760 ± 1	492,350 ± 1	262,79 ± 4,34	14,0159 ± 0,2575
3288	Strahl	13.06.11 03:20 – 04:25	138000	ArCO ₂ (90:10)	65,0	201,646 ± 1	492,152 ± 1	262,79 ± 4,34	14,0682 ± 0,2586
3289	Strahl	13.06.11 04:25 – 05:29	138400	ArCO ₂ (90:10)	65,0	205,972 ± 1	492,098 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2836 ± 0,2628
3290	Strahl	13.06.11 05:29 – 06:30	143902	ArCO ₂ (90:10)	65,0	202,616 ± 1	492,444 ± 1	262,79 ± 4,34	14,1012 ± 0,2592
3291	Strahl	13.06.11 06:30 – 07:26	138362	ArCO ₂ (90:10)	65,0	205,858 ± 1	492,957 ± 1	262,79 ± 4,34	14,2352 ± 0,2618
3292	Strahl	13.06.11 07:26 – 08:19	142593	ArCO ₂ (90:10)	65,0	204,223 ± 1	494,475 ± 1	262,79 ± 4,34	14,0806 ± 0,2588
3293	Strahl	13.06.11 08:19 – 09:03	125385	ArCO ₂ (90:10)	65,0	204,907 ± 1	494,810 ± 1	262,79 ± 4,34	14,0975 ± 0,2591
3302	Strahl	13.06.11 17:25 – 17:58	102831	ArCO ₂ (90:10)	63,2	215,017 ± 1	492,680 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2418 ± 0,1622

Run- Nummer	Rumtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} _{max}]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
3303	Strahl	13.06.11 17:58 – 18:04	19682	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,276 ± 1	492,977 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1887 ± 0,1615
3305	Strahl	13.06.11 18:25 – 18:49	74624	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,191 ± 1	493,405 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1626 ± 0,1612
3306	Strahl	13.06.11 18:49 – 19:14	74453	ArCO ₂ (90:10)	65,0	213,954 ± 1	493,703 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1356 ± 0,1608
3307	Strahl	13.06.11 19:14 – 19:47	76047	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,920 ± 1	494,024 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1682 ± 0,1612
3308	Strahl	13.06.11 19:47 – 20:12	75859	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,286 ± 1	493,852 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1448 ± 0,1609
3309	Strahl	13.06.11 20:12 – 20:37	75863	ArCO ₂ (90:10)	65,0	213,891 ± 1	493,946 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1201 ± 0,1606
3310	Strahl	13.06.11 20:37 – 21:02	75354	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,056 ± 1	494,012 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1251 ± 0,1606
3311	Strahl	13.06.11 21:02 – 21:14	29181	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,330 ± 1	494,097 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1346 ± 0,1608
3312	Strahl	13.06.11 22:23 – 22:48	75311	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,697 ± 1	494,843 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1155 ± 0,1605
3313	Strahl	13.06.11 22:48 – 23:13	75532	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,256 ± 1	494,515 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1098 ± 0,1604
3314	Strahl	13.06.11 23:13 – 23:43	74871	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,565 ± 1	494,236 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1395 ± 0,1608
3315	Strahl	13.06.11 23:43 – 00:09	75367	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,575 ± 1	494,699 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1166 ± 0,1605
3316	Strahl	14.06.11 00:09 – 00:11	6461	ArCO ₂ (90:10)	65,0	213,669 ± 1	494,439 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0842 ± 0,1601
3317	Strahl	14.06.11 00:16 – 00:41	75124	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,542 ± 1	494,849 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1074 ± 0,1604
3318	Strahl	14.06.11 00:41 – 01:05	74971	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,939 ± 1	495,106 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1145 ± 0,1605
3319	Strahl	14.06.11 01:05 – 01:29	74914	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,372 ± 1	495,828 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0999 ± 0,1603
3320	Strahl	14.06.11 01:29 – 01:54	73970	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,647 ± 1	495,888 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1107 ± 0,1605
3321	Strahl	14.06.11 01:54 – 02:20	74496	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,308 ± 1	496,110 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0825 ± 0,1601
3322	Strahl	14.06.11 02:20 – 02:41	60779	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,401 ± 1	496,566 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0644 ± 0,1598
3323	Strahl	14.06.11 03:02 – 03:27	72821	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,799 ± 1	497,082 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0585 ± 0,1597
3324	Strahl	14.06.11 03:27 – 03:52	73099	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,984 ± 1	497,208 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0614 ± 0,1598
3325	Strahl	14.06.11 03:52 – 04:16	73174	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,269 ± 1	497,269 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0726 ± 0,1599
3326	Strahl	14.06.11 04:16 – 04:18	3828	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,502 ± 1	496,128 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0914 ± 0,1602
3327	Strahl	14.06.11 04:27 – 04:51	73748	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,151 ± 1	497,031 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0786 ± 0,1600
3328	Strahl	14.06.11 04:51 – 05:20	73496	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,333 ± 1	497,036 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0875 ± 0,1601
3329	Strahl	14.06.11 05:20 – 05:46	74190	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,046 ± 1	496,971 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0764 ± 0,1600
3330	Strahl	14.06.11 05:46 – 06:10	74191	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,154 ± 1	496,945 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0831 ± 0,1601
3331	Strahl	14.06.11 06:10 – 06:34	74130	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,975 ± 1	496,939 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0744 ± 0,1600
3332	Strahl	14.06.11 06:34 – 06:37	10479	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,607 ± 1	496,903 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1080 ± 0,1604
3333	Strahl	14.06.11 06:46 – 07:20	68521	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,501 ± 1	497,382 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0786 ± 0,1600
3334	Strahl	14.06.11 07:28 – 07:38	22243	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,366 ± 1	497,606 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0606 ± 0,1598
3346	Strahl	14.06.11 18:49 – 19:17	73389	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,584 ± 1	497,193 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0922 ± 0,1602
3347	Strahl	14.06.11 19:17 – 19:52	73129	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,253 ± 1	497,686 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0510 ± 0,1596
3348	Strahl	14.06.11 19:52 – 20:17	73131	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,114 ± 1	498,029 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0769 ± 0,1600
3349	Strahl	14.06.11 20:17 – 20:42	73183	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,485 ± 1	499,365 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0287 ± 0,1593
3350	Strahl	14.06.11 20:42 – 21:16	68361	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,682 ± 1	499,966 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0086 ± 0,1591
3351	Strahl	14.06.11 21:19 – 21:28	16250	ArCO ₂ (90:10)	65,0	218,216 ± 1	500,006 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0332 ± 0,1594
3352	Strahl	14.06.11 22:00 – 22:37	113405	ArCO ₂ (90:10)	65,0	218,058 ± 1	500,429 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0043 ± 0,1590
3353	Strahl	14.06.11 22:37 – 23:15	113069	ArCO ₂ (90:10)	65,0	218,561 ± 1	500,989 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0015 ± 0,1590
3354	Strahl	14.06.11 23:15 – 23:53	112817	ArCO ₂ (90:10)	65,0	218,987 ± 1	501,340 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0052 ± 0,1590
3355	Strahl	14.06.11 23:53 – 00:31	112450	ArCO ₂ (90:10)	65,0	218,714 ± 1	501,457 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9859 ± 0,1588

Run- Nummer	Runtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} ^{max}]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
3356	Strahl	15.06.11 00:31 – 01:14	111918	ArCO ₂ (90:10)	65,0	218,436 ± 1	501,300 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9799 ± 0,1587
3357	Strahl	15.06.11 01:14 – 01:52	110945	ArCO ₂ (90:10)	65,0	218,405 ± 1	501,137 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9864 ± 0,1588
3358	Strahl	15.06.11 01:52 – 02:29	109859	ArCO ₂ (90:10)	65,0	218,462 ± 1	501,276 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9824 ± 0,1587
3359	Strahl	15.06.11 02:29 – 03:06	108030	ArCO ₂ (90:10)	65,0	218,953 ± 1	501,881 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9767 ± 0,1586
3360	Strahl	15.06.11 03:06 – 03:43	107822	ArCO ₂ (90:10)	65,0	219,598 ± 1	502,196 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9930 ± 0,1589
3361	Strahl	15.06.11 03:43 – 04:25	106442	ArCO ₂ (90:10)	65,0	219,162 ± 1	502,186 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9720 ± 0,1586
3362	Strahl	15.06.11 04:25 – 05:03	106276	ArCO ₂ (90:10)	65,0	219,425 ± 1	502,238 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9824 ± 0,1587
3363	Strahl	15.06.11 05:03 – 05:39	105736	ArCO ₂ (90:10)	65,0	219,389 ± 1	502,585 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9635 ± 0,1585
3364	Strahl	15.06.11 05:39 – 06:15	105663	ArCO ₂ (90:10)	65,0	219,342 ± 1	502,750 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9531 ± 0,1583
3365	Strahl	15.06.11 06:15 – 07:00	104765	ArCO ₂ (90:10)	65,0	219,689 ± 1	503,473 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9346 ± 0,1581
3366	Strahl	15.06.11 07:00 – 07:36	105273	ArCO ₂ (90:10)	65,0	220,533 ± 1	505,096 ± 1	254,27 ± 2,01	13,8964 ± 0,1575
3367	Strahl	15.06.11 07:36 – 08:12	105608	ArCO ₂ (90:10)	65,0	220,967 ± 1	505,450 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9003 ± 0,1576
3368	Strahl	15.06.11 08:12 – 08:49	105787	ArCO ₂ (90:10)	65,0	220,924 ± 1	505,659 ± 1	254,27 ± 2,01	13,8880 ± 0,1574
3369	Strahl	15.06.11 08:49 – 09:29	106167	ArCO ₂ (90:10)	65,0	221,795 ± 1	505,546 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9362 ± 0,1581
3370	Strahl	15.06.11 09:29 – 10:06	107481	ArCO ₂ (90:10)	65,0	221,371 ± 1	506,062 ± 1	254,27 ± 2,01	13,8902 ± 0,1575
3371	Strahl	15.06.11 10:06 – 11:03	107708	ArCO ₂ (90:10)	65,0	220,573 ± 1	504,286 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9381 ± 0,1581
3372	Strahl	15.06.11 11:03 – 11:43	110105	ArCO ₂ (90:10)	65,0	219,697 ± 1	503,023 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9571 ± 0,1584
3373	Strahl	15.06.11 11:43 – 12:20	110349	ArCO ₂ (90:10)	65,0	219,506 ± 1	502,229 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9869 ± 0,1588
3374	Strahl	15.06.11 12:20 – 13:19	110618	ArCO ₂ (90:10)	65,0	219,186 ± 1	501,957 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9845 ± 0,1587
3375	Strahl	15.06.11 13:19 – 13:58	112268	ArCO ₂ (90:10)	65,0	219,251 ± 1	501,786 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9962 ± 0,1589
3376	Strahl	15.06.11 13:58 – 14:36	113014	ArCO ₂ (90:10)	65,0	218,470 ± 1	501,058 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9935 ± 0,1589
3377	Strahl	15.06.11 14:36 – 15:15	113408	ArCO ₂ (90:10)	65,0	218,079 ± 1	500,769 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9885 ± 0,1588
3378	Strahl	15.06.11 15:15 – 16:03	113767	ArCO ₂ (90:10)	65,0	218,202 ± 1	500,209 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0224 ± 0,1593
3379	Strahl	15.06.11 16:03 – 16:14	3204	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,860 ± 1	499,804 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9759 ± 0,1586
3402	Strahl	15.06.11 18:40 – 19:27	110472	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,890 ± 1	495,971 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1188 ± 0,1606
3404	Strahl	15.06.11 20:06 – 20:44	113200	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,029 ± 1	496,542 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0971 ± 0,1603
3405	Strahl	15.06.11 20:44 – 21:21	113901	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,991 ± 1	496,612 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0916 ± 0,1602
3406	Strahl	15.06.11 21:21 – 21:59	114024	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,652 ± 1	496,398 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0854 ± 0,1601
3407	Strahl	15.06.11 21:59 – 22:40	113912	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,239 ± 1	496,498 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1098 ± 0,1604
3408	Strahl	15.06.11 22:40 – 23:18	113664	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,198 ± 1	496,591 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1031 ± 0,1604
3409	Strahl	15.06.11 23:18 – 23:56	114049	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,326 ± 1	496,615 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1083 ± 0,1604
3410	Strahl	15.06.11 23:56 – 00:34	113732	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,459 ± 1	497,045 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0934 ± 0,1602
3411	Strahl	16.06.11 00:34 – 01:14	114219	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,032 ± 1	497,535 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0976 ± 0,1603
3412	Strahl	16.06.11 01:14 – 01:52	113443	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,308 ± 1	497,136 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0812 ± 0,1601
3413	Strahl	16.06.11 01:52 – 02:30	112951	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,682 ± 1	496,615 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0760 ± 0,1600
3414	Strahl	16.06.11 02:30 – 03:08	111545	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,651 ± 1	496,417 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0844 ± 0,1601
3415	Strahl	16.06.11 03:08 – 03:45	111074	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,857 ± 1	496,066 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1123 ± 0,1605
3416	Strahl	16.06.11 03:45 – 04:22	109754	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,578 ± 1	495,874 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1080 ± 0,1604
3417	Strahl	16.06.11 04:22 – 04:59	109109	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,737 ± 1	496,200 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0996 ± 0,1603
3418	Strahl	16.06.11 04:59 – 05:42	108084	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,413 ± 1	496,871 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0998 ± 0,1603
3419	Strahl	16.06.11 05:42 – 06:19	107297	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,313 ± 1	497,111 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0827 ± 0,1601

Run- Nummer	Rumtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} max]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
3420	Strahl	16.06.11 06:19 – 06:55	107070	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,078 ± 1	498,365 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0583 ± 0,1597
3421	Strahl	16.06.11 06:55 – 07:30	107219	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,572 ± 1	499,305 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0360 ± 0,1594
3422	Strahl	16.06.11 07:30 – 08:08	107512	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,486 ± 1	499,235 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0352 ± 0,1594
3423	Strahl	16.06.11 08:08 – 08:44	107620	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,072 ± 1	498,976 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0275 ± 0,1593
3424	Strahl	16.06.11 08:44 – 09:19	107617	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,149 ± 1	498,475 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0563 ± 0,1597
3425	Strahl	16.06.11 09:19 – 09:55	108587	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,614 ± 1	497,228 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0920 ± 0,1602
3426	Strahl	16.06.11 09:55 – 10:31	109347	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,866 ± 1	496,089 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1116 ± 0,1605
3427	Strahl	16.06.11 10:31 – 10:47	49139	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,313 ± 1	495,243 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1264 ± 0,1607
3428	Strahl	16.06.11 11:15 – 11:52	108920	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,744 ± 1	493,771 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1721 ± 0,1613
3429	Strahl	16.06.11 11:52 – 12:28	109623	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,421 ± 1	493,728 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1579 ± 0,1611
3430	Strahl	16.06.11 12:28 – 13:05	108469	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,643 ± 1	493,954 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1577 ± 0,1611
3431	Strahl	16.06.11 13:05 – 13:41	108186	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,680 ± 1	494,081 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1532 ± 0,1610
3432	Strahl	16.06.11 13:41 – 14:17	108747	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,521 ± 1	493,976 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1504 ± 0,1610
3433	Strahl	16.06.11 14:17 – 14:53	108354	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,397 ± 1	493,745 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1558 ± 0,1611
3434	Strahl	16.06.11 14:53 – 15:01	24706	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,324 ± 1	493,629 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1580 ± 0,1611
3435	Strahl	16.06.11 15:34 – 16:12	97376	ArCO ₂ (90:10)	65,0	213,922 ± 1	493,451 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1467 ± 0,1609
3436	Strahl	16.06.11 18:46 – 18:48	10417	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,480 ± 1	495,086 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1428 ± 0,1609
3437	Strahl	16.06.11 19:08 – 19:41	106548	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,302 ± 1	495,287 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1236 ± 0,1606
3438	Strahl	16.06.11 19:41 – 20:17	106276	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,420 ± 1	495,730 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1073 ± 0,1604
3439	Strahl	16.06.11 20:17 – 20:50	104894	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,623 ± 1	496,202 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0937 ± 0,1602
3440	Strahl	16.06.11 20:50 – 21:23	104950	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,787 ± 1	496,543 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0849 ± 0,1601
3441	Strahl	16.06.11 21:23 – 21:55	104921	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,020 ± 1	496,301 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1087 ± 0,1604
3442	Strahl	16.06.11 21:55 – 22:28	103407	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,896 ± 1	496,181 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1085 ± 0,1604
3443	Strahl	16.06.11 22:28 – 23:00	103061	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,783 ± 1	496,590 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0823 ± 0,1601
3444	Strahl	16.06.11 23:00 – 23:32	102682	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,115 ± 1	497,116 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0726 ± 0,1599
3445	Strahl	16.06.11 23:32 – 00:04	104245	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,029 ± 1	498,003 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0739 ± 0,1600
3446	Strahl	17.06.11 00:04 – 00:37	105877	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,729 ± 1	498,121 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0530 ± 0,1597
3447	Strahl	17.06.11 00:37 – 01:14	105375	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,084 ± 1	498,575 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0481 ± 0,1596
3448	Strahl	17.06.11 01:14 – 01:47	106651	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,996 ± 1	498,426 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0511 ± 0,1596
3449	Strahl	17.06.11 01:47 – 02:20	106479	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,415 ± 1	498,779 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0544 ± 0,1597
3450	Strahl	17.06.11 02:20 – 02:53	106515	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,648 ± 1	499,107 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0497 ± 0,1596
3451	Strahl	17.06.11 02:53 – 03:48	99041	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,894 ± 1	499,293 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0527 ± 0,1597
3452	Strahl	17.06.11 03:48 – 04:31	39323	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,555 ± 1	499,190 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0409 ± 0,1595
3453	Strahl	17.06.11 04:31 – 05:27	19110	ArCO ₂ (90:10)	65,0	218,948 ± 1	498,796 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1306 ± 0,1607
3454	Strahl	17.06.11 05:28 – 06:01	118292	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,150 ± 1	498,392 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0605 ± 0,1598
3455	Strahl	17.06.11 06:01 – 06:37	115974	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,147 ± 1	498,862 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0369 ± 0,1595
3456	Strahl	17.06.11 06:37 – 07:05	99621	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,001 ± 1	498,965 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0245 ± 0,1593
3457	Strahl	17.06.11 07:58 – 07:58	851	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,324 ± 1	499,436 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0172 ± 0,1592
3458	Strahl	17.06.11 09:54 – 10:23	74650	ArCO ₂ (90:10)	65,0	218,328 ± 1	501,464 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9665 ± 0,1585
3459	Strahl	17.06.11 11:02 – 11:37	103536	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,536 ± 1	499,462 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0264 ± 0,1593
3460	Strahl	17.06.11 11:37 – 12:09	104726	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,933 ± 1	497,644 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0871 ± 0,1601

Run- Nummer	Run- typ	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% $E_{\text{drift}}^{\text{max}}$]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/ps]
3461	Strahl	17.06.11 12:09 – 12:42	105531	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,081 ± 1	496,229 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1154 ± 0,1605
3462	Strahl	17.06.11 12:42 – 13:09	89264	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,139 ± 1	494,842 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1379 ± 0,1608
3463	Strahl	17.06.11 13:14 – 13:23	27298	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,242 ± 1	493,912 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1395 ± 0,1608
3464	Strahl	17.06.11 13:38 – 14:11	109142	ArCO ₂ (90:10)	65,0	213,652 ± 1	492,890 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1614 ± 0,1611
3465	Strahl	17.06.11 14:11 – 14:45	109595	ArCO ₂ (90:10)	65,0	213,106 ± 1	491,655 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1964 ± 0,1616
3466	Strahl	17.06.11 14:45 – 15:19	109621	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,373 ± 1	490,562 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2148 ± 0,1619
3467	Strahl	17.06.11 15:19 – 15:53	103618	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,996 ± 1	489,919 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2284 ± 0,1621
3468	Strahl	17.06.11 16:04 – 16:21	52008	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,637 ± 1	489,196 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2471 ± 0,1623
3498	Strahl	17.06.11 19:08 – 19:42	118341	ArCO ₂ (90:10)	65,0	210,767 ± 1	487,880 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2700 ± 0,1626
3499	Strahl	17.06.11 19:42 – 20:19	111164	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,112 ± 1	488,045 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2793 ± 0,1628
3500	Strahl	17.06.11 20:19 – 20:49	83600	ArCO ₂ (90:10)	65,0	210,611 ± 1	487,798 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2662 ± 0,1626
3501	Strahl	17.06.11 22:34 – 23:10	110687	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,293 ± 1	488,526 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2638 ± 0,1625
3502	Strahl	17.06.11 23:10 – 23:46	111841	ArCO ₂ (90:10)	65,0	210,856 ± 1	488,038 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2665 ± 0,1626
3503	Strahl	17.06.11 23:46 – 00:20	110499	ArCO ₂ (90:10)	65,0	210,924 ± 1	487,906 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2768 ± 0,1627
3504	Strahl	18.06.11 00:20 – 00:55	107646	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,015 ± 1	487,986 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2773 ± 0,1627
3505	Strahl	18.06.11 00:55 – 01:29	108960	ArCO ₂ (90:10)	65,0	210,555 ± 1	487,786 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2639 ± 0,1625
3506	Strahl	18.06.11 01:29 – 02:03	107317	ArCO ₂ (90:10)	65,0	210,644 ± 1	487,862 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2646 ± 0,1626
3507	Strahl	18.06.11 02:03 – 02:37	106874	ArCO ₂ (90:10)	65,0	210,706 ± 1	487,595 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2816 ± 0,1628
3508	Strahl	18.06.11 02:37 – 03:10	106136	ArCO ₂ (90:10)	65,0	210,699 ± 1	487,402 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2912 ± 0,1629
3509	Strahl	18.06.11 03:10 – 03:43	105430	ArCO ₂ (90:10)	65,0	210,700 ± 1	487,496 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2864 ± 0,1629
3510	Strahl	18.06.11 03:43 – 04:16	106593	ArCO ₂ (90:10)	65,0	210,650 ± 1	487,658 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2754 ± 0,1627
3511	Strahl	18.06.11 04:16 – 04:52	106559	ArCO ₂ (90:10)	65,0	210,221 ± 1	487,409 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2662 ± 0,1626
3512	Strahl	18.06.11 04:52 – 05:26	107750	ArCO ₂ (90:10)	65,0	210,251 ± 1	487,357 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2704 ± 0,1626
3513	Strahl	18.06.11 05:26 – 06:00	107487	ArCO ₂ (90:10)	65,0	210,947 ± 1	487,611 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2932 ± 0,1629
3514	Strahl	18.06.11 06:00 – 06:38	105205	ArCO ₂ (90:10)	65,0	210,562 ± 1	487,948 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2560 ± 0,1624
3515	Strahl	18.06.11 06:38 – 07:18	102902	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,403 ± 1	488,618 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2648 ± 0,1626
3516	Strahl	18.06.11 07:18 – 07:51	104903	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,927 ± 1	490,080 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2167 ± 0,1619
3517	Strahl	18.06.11 07:51 – 08:24	104847	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,671 ± 1	490,793 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2182 ± 0,1619
3518	Strahl	18.06.11 08:24 – 08:57	104846	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,187 ± 1	490,230 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2223 ± 0,1620
3519	Strahl	18.06.11 08:57 – 09:30	103902	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,130 ± 1	490,193 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2213 ± 0,1620
3520	Strahl	18.06.11 09:30 – 10:05	103378	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,065 ± 1	490,107 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2223 ± 0,1620
3521	Strahl	18.06.11 10:05 – 10:38	103818	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,641 ± 1	490,241 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2450 ± 0,1623
3522	Strahl	18.06.11 10:38 – 11:11	104992	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,382 ± 1	490,600 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2133 ± 0,1619
3523	Strahl	18.06.11 11:11 – 11:44	106763	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,693 ± 1	490,985 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2096 ± 0,1618
3524	Strahl	18.06.11 11:44 – 12:18	106839	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,104 ± 1	491,068 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1753 ± 0,1613
3525	Strahl	18.06.11 12:18 – 12:54	104337	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,550 ± 1	490,492 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2275 ± 0,1620
3526	Strahl	18.06.11 12:54 – 13:28	113155	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,250 ± 1	490,219 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2261 ± 0,1620
3527	Strahl	18.06.11 13:28 – 14:03	121883	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,064 ± 1	490,188 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2181 ± 0,1619
3528	Strahl	18.06.11 14:03 – 14:36	109158	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,876 ± 1	490,138 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2111 ± 0,1618
3529	Strahl	18.06.11 14:36 – 15:09	122031	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,991 ± 1	490,022 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2229 ± 0,1620
3530	Strahl	18.06.11 15:09 – 15:44	121136	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,074 ± 1	489,513 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2532 ± 0,1624

Run- Nummer	Rumtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} ^{max}]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
3531	Strahl	18.06.11 15:44 – 16:12	87748	ArCO ₂ (90:10)	63,3	211,578 ± 1	489,241 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2418 ± 0,1622
3534	Strahl	18.06.11 18:31 – 18:37	20843	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,926 ± 1	491,348 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2029 ± 0,1617
3535	Strahl	18.06.11 18:37 – 18:47	33837	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,951 ± 1	490,151 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2655 ± 0,1626
3536	Strahl	18.06.11 18:58 – 19:32	111429	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,792 ± 1	490,612 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1827 ± 0,1614
3537	Strahl	18.06.11 19:32 – 20:05	120571	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,151 ± 1	491,483 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1567 ± 0,1611
3538	Strahl	18.06.11 20:05 – 20:38	109232	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,228 ± 1	491,313 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1692 ± 0,1613
3539	Strahl	18.06.11 20:38 – 21:10	108731	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,630 ± 1	490,752 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1673 ± 0,1612
3540	Strahl	18.06.11 21:10 – 21:44	107171	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,322 ± 1	490,545 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2131 ± 0,1618
3541	Strahl	18.06.11 21:44 – 22:16	108792	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,961 ± 1	490,574 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1932 ± 0,1616
3542	Strahl	18.06.11 22:16 – 22:49	109085	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,406 ± 1	490,549 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2172 ± 0,1619
3543	Strahl	18.06.11 22:49 – 23:22	109645	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,691 ± 1	490,532 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1816 ± 0,1614
3544	Strahl	18.06.11 23:22 – 23:30	15780	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,115 ± 1	490,384 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1599 ± 0,1611
3545	Strahl	18.06.11 23:31 – 00:06	109375	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,095 ± 1	490,570 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2002 ± 0,1617
3546	Strahl	19.06.11 00:06 – 00:39	109831	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,864 ± 1	490,834 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1750 ± 0,1613
3547	Strahl	19.06.11 00:39 – 01:13	109639	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,426 ± 1	491,061 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1921 ± 0,1616
3548	Strahl	19.06.11 01:13 – 01:50	109576	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,205 ± 1	490,944 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1868 ± 0,1615
3549	Strahl	19.06.11 01:51 – 02:24	109948	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,408 ± 1	490,907 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1990 ± 0,1617
3550	Strahl	19.06.11 02:24 – 02:57	109361	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,071 ± 1	490,962 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1790 ± 0,1614
3551	Strahl	19.06.11 02:57 – 03:30	110235	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,324 ± 1	490,775 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2014 ± 0,1617
3552	Strahl	19.06.11 03:30 – 04:03	109404	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,371 ± 1	490,333 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1754 ± 0,1613
3553	Strahl	19.06.11 04:03 – 04:41	107509	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,870 ± 1	490,327 ± 1	254,27 ± 2,01	14,2011 ± 0,1617
3554	Strahl	19.06.11 04:41 – 05:14	109235	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,768 ± 1	490,757 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1741 ± 0,1613
3555	Strahl	19.06.11 05:14 – 05:47	109137	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,139 ± 1	490,851 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1881 ± 0,1615
3556	Strahl	19.06.11 05:47 – 06:20	109296	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,553 ± 1	491,134 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1948 ± 0,1616
3557	Strahl	19.06.11 06:20 – 06:54	108962	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,951 ± 1	491,270 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1573 ± 0,1611
3558	Strahl	19.06.11 06:54 – 07:28	109090	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,024 ± 1	490,987 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1754 ± 0,1613
3559	Strahl	19.06.11 07:28 – 08:01	109457	ArCO ₂ (90:10)	65,0	211,749 ± 1	490,947 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1635 ± 0,1612
3560	Strahl	19.06.11 08:01 – 08:35	109414	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,540 ± 1	491,279 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1868 ± 0,1615
3561	Strahl	19.06.11 08:35 – 09:08	109064	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,377 ± 1	491,456 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1695 ± 0,1613
3562	Strahl	19.06.11 09:08 – 09:41	107312	ArCO ₂ (90:10)	65,0	212,369 ± 1	491,987 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1422 ± 0,1609
3563	Strahl	19.06.11 09:41 – 10:16	106745	ArCO ₂ (90:10)	65,0	213,623 ± 1	493,081 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1503 ± 0,1610
3564	Strahl	19.06.11 10:16 – 10:48	106802	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,473 ± 1	494,187 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1373 ± 0,1608
3565	Strahl	19.06.11 10:48 – 11:21	106950	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,439 ± 1	494,936 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0979 ± 0,1603
3566	Strahl	19.06.11 11:21 – 11:54	107332	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,313 ± 1	495,126 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0820 ± 0,1601
3567	Strahl	19.06.11 11:54 – 12:27	106874	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,331 ± 1	495,082 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0851 ± 0,1601
3568	Strahl	19.06.11 12:27 – 13:04	82921	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,304 ± 1	494,418 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1171 ± 0,1605
3569	Strahl	19.06.11 14:14 – 14:49	109050	ArCO ₂ (90:10)	65,0	213,431 ± 1	493,704 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1091 ± 0,1604
3570	Strahl	19.06.11 14:49 – 15:22	108837	ArCO ₂ (90:10)	65,0	213,869 ± 1	493,502 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1414 ± 0,1609
3571	Strahl	19.06.11 15:22 – 15:56	109717	ArCO ₂ (90:10)	65,0	213,391 ± 1	492,943 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1455 ± 0,1609
3572	Strahl	19.06.11 15:56 – 16:02	20087	ArCO ₂ (90:10)	65,0	213,292 ± 1	492,930 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1412 ± 0,1609
3598	Strahl	19.06.11 18:25 – 18:58	104335	ArCO ₂ (90:10)	65,0	213,970 ± 1	492,880 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1781 ± 0,1614

Run- Nummer	Runtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} E _{max}]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
3599	Strahl	19.06.11 18:58 – 19:30	105936	ArCO ₂ (90:10)	65,0	213,733 ± 1	493,533 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1330 ± 0,1608
3600	Strahl	19.06.11 19:30 – 20:02	106170	ArCO ₂ (90:10)	65,0	213,639 ± 1	494,117 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0988 ± 0,1603
3601	Strahl	19.06.11 20:02 – 20:35	106666	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,307 ± 1	494,556 ± 1	254,27 ± 2,01	14,1103 ± 0,1604
3602	Strahl	19.06.11 20:35 – 21:08	106485	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,726 ± 1	495,408 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0886 ± 0,1602
3603	Strahl	19.06.11 21:08 – 21:16	27436	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,321 ± 1	495,571 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0601 ± 0,1598
3604	Strahl	19.06.11 21:39 – 22:12	106744	ArCO ₂ (90:10)	65,0	214,840 ± 1	496,213 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0540 ± 0,1597
3605	Strahl	19.06.11 22:12 – 22:46	106617	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,191 ± 1	496,099 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0772 ± 0,1600
3606	Strahl	19.06.11 22:46 – 23:21	106585	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,676 ± 1	496,652 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0738 ± 0,1600
3607	Strahl	19.06.11 23:21 – 23:55	106608	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,255 ± 1	496,581 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0563 ± 0,1597
3608	Strahl	19.06.11 23:55 – 00:29	106380	ArCO ₂ (90:10)	65,0	215,809 ± 1	497,865 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0199 ± 0,1592
3609	Strahl	20.06.11 00:29 – 01:03	106021	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,829 ± 1	499,641 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9825 ± 0,1587
3610	Strahl	20.06.11 01:03 – 01:37	106102	ArCO ₂ (90:10)	65,0	217,071 ± 1	499,736 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9897 ± 0,1588
3611	Strahl	20.06.11 01:37 – 02:18	106514	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,979 ± 1	499,229 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0103 ± 0,1591
3612	Strahl	20.06.11 02:18 – 02:54	109333	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,871 ± 1	498,609 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0358 ± 0,1594
3613	Strahl	20.06.11 02:54 – 03:29	106636	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,516 ± 1	498,478 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0246 ± 0,1593
3614	Strahl	20.06.11 03:29 – 04:05	107178	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,466 ± 1	498,367 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0276 ± 0,1593
3615	Strahl	20.06.11 04:05 – 04:41	107098	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,668 ± 1	498,424 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0349 ± 0,1594
3616	Strahl	20.06.11 04:41 – 05:21	106806	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,383 ± 1	498,100 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0368 ± 0,1594
3617	Strahl	20.06.11 05:21 – 05:57	106636	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,153 ± 1	498,188 ± 1	254,27 ± 2,01	14,0210 ± 0,1592
3618	Strahl	20.06.11 05:57 – 06:20	67125	ArCO ₂ (90:10)	65,0	216,016 ± 1	498,510 ± 1	254,27 ± 2,01	13,9982 ± 0,1589
3676	kosm. Str.	10.11.11 02:11 – 02:13	6408	ArCO ₂ (90:10)	85,0	4,643 ± 1	499,851 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8566 ± 0,1188
3679	kosm. Str.	10.11.11 02:34 – 04:28	393234	ArCO ₂ (90:10)	84,9	14,167 ± 1	502,780 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1651 ± 0,1209
3705	kosm. Str.	10.11.11 17:10 – 17:12	11684	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,400 ± 1	499,270 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9185 ± 0,1193
3706	kosm. Str.	10.11.11 17:16 – 18:25	393967	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,342 ± 1	499,049 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9260 ± 0,1193
3707	kosm. Str.	10.11.11 18:25 – 18:29	17425	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,432 ± 1	499,219 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9223 ± 0,1193
3708	kosm. Str.	10.11.11 22:33 – 22:59	138421	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,459 ± 1	498,231 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9695 ± 0,1196
3709	kosm. Str.	10.11.11 22:59 – 23:25	139584	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,208 ± 1	498,370 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9514 ± 0,1195
3710	kosm. Str.	10.11.11 23:25 – 23:52	141838	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,241 ± 1	498,114 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9648 ± 0,1196
3711	kosm. Str.	10.11.11 23:52 – 00:05	68876	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,349 ± 1	498,115 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9698 ± 0,1196
3774	kosm. Str.	11.11.11 23:43 – 23:45	13331	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,338 ± 1	499,834 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8895 ± 0,1191
3775	kosm. Str.	11.11.11 23:45 – 00:06	116647	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,769 ± 1	499,221 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8915 ± 0,1191
3776	kosm. Str.	12.11.11 00:06 – 00:26	114929	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,160 ± 1	499,467 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8982 ± 0,1191
3777	kosm. Str.	12.11.11 00:26 – 00:47	116444	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,144 ± 1	499,352 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9028 ± 0,1192
3778	kosm. Str.	12.11.11 00:47 – 01:07	117050	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,096 ± 1	499,273 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9042 ± 0,1192
3779	kosm. Str.	12.11.11 01:07 – 01:27	116902	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,108 ± 1	499,730 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8836 ± 0,1190
3780	kosm. Str.	12.11.11 01:27 – 01:47	116724	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,227 ± 1	500,066 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8701 ± 0,1189
3781	kosm. Str.	12.11.11 01:47 – 02:08	116715	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,141 ± 1	500,066 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8696 ± 0,1189
3782	kosm. Str.	12.11.11 02:08 – 02:28	116300	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,051 ± 1	499,943 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8712 ± 0,1189
3783	kosm. Str.	12.11.11 02:28 – 02:48	117155	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,001 ± 1	500,137 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8599 ± 0,1189
3784	kosm. Str.	12.11.11 02:48 – 03:08	117211	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,209 ± 1	500,519 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8518 ± 0,1188
3785	kosm. Str.	12.11.11 03:08 – 03:29	118023	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,142 ± 1	499,932 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8758 ± 0,1190

Run- Nummer	Runtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} max]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
3786	kosm. Str.	12.11.11 03:29 – 03:49	114543	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,220 ± 1	500,886 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8355 ± 0,1187
3787	kosm. Str.	12.11.11 03:49 – 04:09	115948	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,026 ± 1	500,008 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8670 ± 0,1189
3788	kosm. Str.	12.11.11 04:09 – 04:29	115102	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,140 ± 1	499,724 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8854 ± 0,1190
3789	kosm. Str.	12.11.11 04:29 – 04:49	114944	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,140 ± 1	500,170 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8648 ± 0,1189
3790	kosm. Str.	12.11.11 04:49 – 05:09	113717	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,974 ± 1	500,588 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8378 ± 0,1187
3791	kosm. Str.	12.11.11 05:09 – 05:30	116523	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,258 ± 1	500,380 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8605 ± 0,1189
3792	kosm. Str.	12.11.11 05:30 – 05:51	118570	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,284 ± 1	500,098 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8747 ± 0,1190
3793	kosm. Str.	12.11.11 05:51 – 06:11	116900	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,216 ± 1	500,916 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8339 ± 0,1187
3794	kosm. Str.	12.11.11 06:11 – 06:31	118171	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,379 ± 1	500,890 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8426 ± 0,1187
3795	kosm. Str.	12.11.11 06:31 – 06:52	116327	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,410 ± 1	501,174 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8309 ± 0,1187
3796	kosm. Str.	12.11.11 06:52 – 07:12	117822	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,053 ± 1	500,306 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8545 ± 0,1188
3797	kosm. Str.	12.11.11 07:12 – 07:33	117920	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,079 ± 1	500,382 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8521 ± 0,1188
3798	kosm. Str.	12.11.11 07:33 – 07:54	119084	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,343 ± 1	501,311 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8215 ± 0,1186
3799	kosm. Str.	12.11.11 07:54 – 08:14	119050	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,070 ± 1	501,263 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8112 ± 0,1185
3800	kosm. Str.	12.11.11 08:14 – 08:16	8752	ArCO ₂ (90:10)	85,9	6,339 ± 1	501,780 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8458 ± 0,1188
3821	kosm. Str.	12.11.11 12:50 – 13:12	129903	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,213 ± 1	502,675 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7530 ± 0,1181
3822	kosm. Str.	12.11.11 13:12 – 13:35	130043	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,231 ± 1	502,804 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7479 ± 0,1181
3823	kosm. Str.	12.11.11 13:35 – 13:58	130047	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,445 ± 1	502,506 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7714 ± 0,1183
3824	kosm. Str.	12.11.11 13:58 – 14:21	132999	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,031 ± 1	502,780 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7399 ± 0,1181
3825	kosm. Str.	12.11.11 14:21 – 14:44	135907	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,258 ± 1	502,777 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7504 ± 0,1181
3826	kosm. Str.	12.11.11 14:44 – 15:08	137089	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,161 ± 1	502,649 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7518 ± 0,1181
3827	kosm. Str.	12.11.11 15:08 – 15:36	162296	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,261 ± 1	503,329 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7253 ± 0,1180
3828	kosm. Str.	12.11.11 15:36 – 16:03	158482	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,164 ± 1	503,377 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7187 ± 0,1179
3829	kosm. Str.	12.11.11 16:03 – 16:30	156210	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,199 ± 1	503,137 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7312 ± 0,1180
3830	kosm. Str.	12.11.11 16:30 – 16:56	150619	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,316 ± 1	502,940 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7456 ± 0,1181
3831	kosm. Str.	12.11.11 16:56 – 17:23	158772	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,268 ± 1	503,394 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7227 ± 0,1179
3832	kosm. Str.	12.11.11 17:23 – 17:51	158968	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,091 ± 1	503,558 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7071 ± 0,1178
3833	kosm. Str.	12.11.11 17:51 – 18:18	160019	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,216 ± 1	503,825 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7006 ± 0,1178
3834	kosm. Str.	12.11.11 18:18 – 18:43	142523	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,229 ± 1	503,474 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7172 ± 0,1179
3849	kosm. Str.	12.11.11 23:03 – 23:30	155326	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,105 ± 1	504,304 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6738 ± 0,1176
3850	kosm. Str.	12.11.11 23:30 – 23:57	158555	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,954 ± 1	504,144 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6742 ± 0,1176
3851	kosm. Str.	12.11.11 23:57 – 00:25	161273	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,265 ± 1	503,486 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7183 ± 0,1179
3852	kosm. Str.	13.11.11 00:25 – 00:53	163573	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,231 ± 1	504,132 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6874 ± 0,1177
3853	kosm. Str.	13.11.11 00:53 – 01:21	165103	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,121 ± 1	503,945 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6909 ± 0,1177
3854	kosm. Str.	13.11.11 01:21 – 01:49	165311	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,000 ± 1	503,581 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7019 ± 0,1178
3855	kosm. Str.	13.11.11 01:49 – 02:18	164744	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,037 ± 1	503,558 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7047 ± 0,1178
3856	kosm. Str.	13.11.11 02:18 – 02:46	163980	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,934 ± 1	503,898 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6845 ± 0,1177
3857	kosm. Str.	13.11.11 02:46 – 03:14	164563	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,195 ± 1	503,578 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7109 ± 0,1179
3858	kosm. Str.	13.11.11 03:14 – 03:42	161893	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,961 ± 1	503,405 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7081 ± 0,1178
3859	kosm. Str.	13.11.11 03:42 – 04:10	162821	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,959 ± 1	503,521 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7028 ± 0,1178
3860	kosm. Str.	13.11.11 04:10 – 04:38	162330	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,151 ± 1	503,819 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6980 ± 0,1178

Run- Nummer	Runtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} ^{max}]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
3861	kosm. Str.	13.11.11 04:38 – 05:06	163513	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,166 ± 1	503,653 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7062 ± 0,1178
3862	kosm. Str.	13.11.11 05:06 – 05:35	163840	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,191 ± 1	503,767 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7021 ± 0,1178
3863	kosm. Str.	13.11.11 05:35 – 06:04	164186	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,936 ± 1	503,316 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7111 ± 0,1179
3864	kosm. Str.	13.11.11 06:04 – 06:33	165349	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,084 ± 1	503,491 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7099 ± 0,1179
3865	kosm. Str.	13.11.11 06:33 – 07:02	163812	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,460 ± 1	503,555 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6786 ± 0,1176
3890	kosm. Str.	13.11.11 11:14 – 11:41	161761	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,052 ± 1	504,180 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6771 ± 0,1176
3891	kosm. Str.	13.11.11 11:41 – 12:09	165324	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,088 ± 1	503,529 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7083 ± 0,1178
3892	kosm. Str.	13.11.11 12:09 – 12:38	167259	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,038 ± 1	503,507 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7070 ± 0,1178
3893	kosm. Str.	13.11.11 12:38 – 13:06	169228	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,005 ± 1	502,934 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7317 ± 0,1180
3894	kosm. Str.	13.11.11 13:06 – 13:35	169790	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,110 ± 1	502,589 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7522 ± 0,1181
3895	kosm. Str.	13.11.11 13:35 – 13:56	114725	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,185 ± 1	502,313 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7683 ± 0,1182
3896	kosm. Str.	13.11.11 14:21 – 15:03	249912	ArCO ₂ (90:10)	86,0	4,953 ± 1	501,911 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7761 ± 0,1183
3897	kosm. Str.	13.11.11 15:03 – 15:45	246804	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,078 ± 1	502,081 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7740 ± 0,1183
3898	kosm. Str.	13.11.11 15:45 – 16:27	245679	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,007 ± 1	502,167 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7668 ± 0,1182
3899	kosm. Str.	13.11.11 16:27 – 17:08	245084	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,077 ± 1	502,083 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7738 ± 0,1183
3900	kosm. Str.	13.11.11 17:08 – 17:20	63675	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,767 ± 1	501,175 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8013 ± 0,1185
3901	kosm. Str.	13.11.11 17:36 – 17:53	103706	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,049 ± 1	501,930 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7796 ± 0,1183
3921	kosm. Str.	13.11.11 20:01 – 20:14	77254	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,346 ± 1	502,086 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7861 ± 0,1184
3923	kosm. Str.	13.11.11 20:36 – 20:59	121217	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,871 ± 1	501,894 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7731 ± 0,1183
3924	kosm. Str.	13.11.11 20:59 – 21:23	137766	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,825 ± 1	502,265 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7540 ± 0,1181
3925	kosm. Str.	13.11.11 21:23 – 21:48	150589	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,738 ± 1	502,080 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7585 ± 0,1182
3926	kosm. Str.	13.11.11 21:48 – 22:15	160356	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,682 ± 1	501,232 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7948 ± 0,1184
3927	kosm. Str.	13.11.11 22:15 – 22:44	167885	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,954 ± 1	501,422 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7985 ± 0,1184
3928	kosm. Str.	13.11.11 22:44 – 23:13	173121	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,910 ± 1	501,299 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8022 ± 0,1185
3929	kosm. Str.	13.11.11 23:13 – 23:20	31896	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,125 ± 1	501,439 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7598 ± 0,1182
3930	kosm. Str.	13.11.11 23:57 – 00:21	138116	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,941 ± 1	501,368 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8004 ± 0,1185
3931	kosm. Str.	14.11.11 00:25 – 00:25	4642	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,069 ± 1	501,003 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8231 ± 0,1186
3932	kosm. Str.	14.11.11 00:25 – 00:54	165099	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,101 ± 1	501,233 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8140 ± 0,1186
3933	kosm. Str.	14.11.11 00:54 – 01:21	163147	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,999 ± 1	500,404 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8474 ± 0,1188
3934	kosm. Str.	14.11.11 01:21 – 01:49	164058	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,969 ± 1	500,809 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8274 ± 0,1186
3935	kosm. Str.	14.11.11 01:49 – 02:18	167028	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,885 ± 1	500,607 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8328 ± 0,1187
3936	kosm. Str.	14.11.11 02:18 – 02:47	168717	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,937 ± 1	500,115 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8579 ± 0,1189
3937	kosm. Str.	14.11.11 02:47 – 03:13	156834	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,876 ± 1	499,952 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8627 ± 0,1189
3938	kosm. Str.	14.11.11 03:48 – 04:16	161260	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,843 ± 1	501,060 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8101 ± 0,1185
3939	kosm. Str.	14.11.11 04:16 – 04:34	106011	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,694 ± 1	500,565 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8260 ± 0,1186
3940	kosm. Str.	14.11.11 00:48 – 05:10	154368	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,894 ± 1	500,723 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8279 ± 0,1186
3941	kosm. Str.	14.11.11 05:10 – 05:37	158011	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,962 ± 1	500,333 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8490 ± 0,1188
3942	kosm. Str.	14.11.11 05:37 – 06:04	157451	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,900 ± 1	500,257 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8497 ± 0,1188
3943	kosm. Str.	14.11.11 06:04 – 06:31	158798	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,876 ± 1	500,692 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8285 ± 0,1187
3944	kosm. Str.	14.11.11 06:31 – 06:58	156572	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,902 ± 1	499,996 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8618 ± 0,1189
3984	kosm. Str.	14.11.11 09:15 – 09:35	113933	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,820 ± 1	499,393 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9323 ± 0,1194

Run- Nummer	Runtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} max]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
3986	kosm. Str.	14.11.11 09:54 – 10:16	126633	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,232 ± 1	499,954 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8790 ± 0,1190
3987	kosm. Str.	14.11.11 10:16 – 10:38	130201	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,115 ± 1	500,337 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8559 ± 0,1188
3988	kosm. Str.	14.11.11 10:38 – 11:01	132803	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,203 ± 1	499,598 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8941 ± 0,1191
3989	kosm. Str.	14.11.11 11:01 – 11:29	133608	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,266 ± 1	498,829 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9327 ± 0,1194
3990	kosm. Str.	14.11.11 11:29 – 11:57	134433	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,063 ± 1	498,322 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9469 ± 0,1195
3991	kosm. Str.	14.11.11 11:57 – 12:26	59119	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,459 ± 1	498,570 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9537 ± 0,1195
3992	kosm. Str.	14.11.11 12:40 – 13:01	124723	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,217 ± 1	497,571 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9890 ± 0,1197
3993	kosm. Str.	14.11.11 13:01 – 13:15	47685	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,574 ± 1	497,823 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9939 ± 0,1198
3994	kosm. Str.	14.11.11 13:28 – 13:50	121937	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,209 ± 1	497,287 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0019 ± 0,1198
3995	kosm. Str.	14.11.11 13:50 – 14:10	121007	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,248 ± 1	496,670 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0327 ± 0,1200
3996	kosm. Str.	14.11.11 14:10 – 14:31	119995	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,403 ± 1	497,460 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0029 ± 0,1198
3997	kosm. Str.	14.11.11 14:31 – 14:51	120616	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,148 ± 1	497,172 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0044 ± 0,1198
3998	kosm. Str.	14.11.11 14:51 – 15:12	120742	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,408 ± 1	496,763 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0358 ± 0,1201
3999	kosm. Str.	14.11.11 15:12 – 15:32	120218	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,410 ± 1	497,004 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0246 ± 0,1200
4000	kosm. Str.	14.11.11 15:32 – 15:53	119509	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,170 ± 1	496,735 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0259 ± 0,1200
4001	kosm. Str.	14.11.11 15:53 – 16:06	73575	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,231 ± 1	496,669 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0319 ± 0,1200
4002	kosm. Str.	14.11.11 16:06 – 16:18	69186	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,425 ± 1	496,372 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0549 ± 0,1202
4003	kosm. Str.	14.11.11 16:18 – 16:39	119543	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,202 ± 1	494,337 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1403 ± 0,1208
4004	kosm. Str.	14.11.11 16:39 – 16:53	83482	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,587 ± 1	496,157 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0726 ± 0,1203
4005	kosm. Str.	14.11.11 17:19 – 17:20	10122	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,222 ± 1	495,937 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0658 ± 0,1203
4006	kosm. Str.	14.11.11 17:21 – 17:40	117321	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,311 ± 1	496,210 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0572 ± 0,1202
4007	kosm. Str.	14.11.11 17:40 – 18:02	117003	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,325 ± 1	495,602 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0864 ± 0,1204
4008	kosm. Str.	14.11.11 18:02 – 18:31	116906	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,036 ± 1	496,876 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0131 ± 0,1199
4009	kosm. Str.	14.11.11 18:31 – 18:51	116344	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,187 ± 1	496,519 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0369 ± 0,1201
4012	kosm. Str.	15.11.11 15:26 – 15:32	31079	NeCO ₂ (90:10)	95,9	4,702 ± 1	498,177 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9368 ± 0,1194
4014	kosm. Str.	15.11.11 15:57 – 16:19	126680	NeCO ₂ (90:10)	95,9	4,908 ± 1	498,681 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9230 ± 0,1193
4015	kosm. Str.	15.11.11 16:19 – 16:41	128686	NeCO ₂ (90:10)	95,9	4,834 ± 1	498,611 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9228 ± 0,1193
4016	kosm. Str.	15.11.11 16:41 – 16:57	82958	NeCO ₂ (90:10)	95,9	5,000 ± 1	499,497 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8894 ± 0,1191
4017	kosm. Str.	15.11.11 17:07 – 17:15	47619	NeCO ₂ (90:10)	95,9	4,701 ± 1	499,739 ± 1	727,80 ± 1,00	22,8644 ± 0,1189
4225	kosm. Str.	22.11.11 17:39 – 18:03	147041	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,198 ± 1	494,605 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1275 ± 0,1207
4226	kosm. Str.	22.11.11 18:03 – 18:11	46979	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,043 ± 1	496,118 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0489 ± 0,1201
4227	kosm. Str.	22.11.11 18:11 – 18:13	11810	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,340 ± 1	495,186 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1067 ± 0,1205
4248	kosm. Str.	22.11.11 21:11 – 21:28	102249	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,023 ± 1	495,766 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0645 ± 0,1203
4249	kosm. Str.	22.11.11 21:28 – 21:47	114455	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,167 ± 1	495,368 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0430 ± 0,1201
4250	kosm. Str.	22.11.11 21:47 – 22:09	129256	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,970 ± 1	495,174 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0899 ± 0,1204
4251	kosm. Str.	22.11.11 22:09 – 22:33	140404	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,045 ± 1	495,595 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0736 ± 0,1203
4252	kosm. Str.	22.11.11 22:33 – 22:40	42662	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,847 ± 1	495,110 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0871 ± 0,1204
4253	kosm. Str.	22.11.11 22:42 – 23:06	143639	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,508 ± 1	493,581 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1907 ± 0,1211
4254	kosm. Str.	22.11.11 23:06 – 23:14	44758	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,278 ± 1	494,224 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1493 ± 0,1208
4255	kosm. Str.	22.11.11 23:18 – 23:42	144288	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,008 ± 1	496,417 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0332 ± 0,1200
4256	kosm. Str.	22.11.11 23:42 – 00:07	144026	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,050 ± 1	497,335 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9923 ± 0,1198

Run- Nummer	Runtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} ^{max}]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
4258	kosm. Str.	23.11.11 00:10 – 00:36	159061	ArCO ₂ (90:10)	86,0	4,911 ± 1	492,633 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2074 ± 0,1212
4259	kosm. Str.	23.11.11 00:36 – 01:03	159291	ArCO ₂ (90:10)	86,0	5,513 ± 1	491,505 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2900 ± 0,1218
4260	kosm. Str.	23.11.11 01:05 – 01:33	163515	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,882 ± 1	494,373 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1235 ± 0,1207
4261	kosm. Str.	23.11.11 01:33 – 02:01	165934	ArCO ₂ (90:10)	85,9	4,996 ± 1	493,890 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1518 ± 0,1208
4262	kosm. Str.	23.11.11 02:01 – 02:15	84546	ArCO ₂ (90:10)	85,9	5,063 ± 1	494,872 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1085 ± 0,1206
4336	Strahl	30.10.12 17:38 – 17:46	59702	ArCO ₂ (90:10)	84,0	2,377 ± 1	502,815 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6177 ± 0,1172
4337	Strahl	30.10.12 17:46 – 17:48	12495	ArCO ₂ (90:10)	84,0	2,000 ± 1	502,392 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6198 ± 0,1172
4338	Strahl	30.10.12 17:50 – 17:59	69922	ArCO ₂ (90:10)	84,0	2,358 ± 1	502,601 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6265 ± 0,1173
4339	Strahl	30.10.12 17:59 – 18:05	49241	ArCO ₂ (90:10)	84,0	2,037 ± 1	502,594 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6123 ± 0,1172
4341	Strahl	30.10.12 18:16 – 18:25	68488	ArCO ₂ (90:10)	84,0	2,889 ± 1	502,898 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6371 ± 0,1174
4342	Strahl	30.10.12 18:25 – 18:34	64514	ArCO ₂ (90:10)	84,0	2,441 ± 1	502,840 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6195 ± 0,1172
4343	Strahl	30.10.12 18:34 – 18:35	10705	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,023 ± 1	502,399 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6658 ± 0,1176
4344	Strahl	30.10.12 22:00 – 22:03	13032	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,296 ± 1	502,306 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6824 ± 0,1177
4345	Strahl	30.10.12 22:03 – 22:04	3692	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,965 ± 1	501,752 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7381 ± 0,1180
4346	Strahl	30.10.12 22:47 – 22:48	1899	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,071 ± 1	502,684 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6550 ± 0,1175
4347	Strahl	30.10.12 22:57 – 23:02	17070	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,527 ± 1	502,857 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6679 ± 0,1176
4348	Strahl	30.10.12 23:02 – 23:07	17039	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,521 ± 1	502,773 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6714 ± 0,1176
4349	Strahl	30.10.12 23:07 – 23:09	1833	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,994 ± 1	502,575 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7019 ± 0,1178
4351	Strahl	30.10.12 23:43 – 23:50	22476	ArCO ₂ (90:10)	92,8	4,119 ± 1	488,026 ± 1	727,80 ± 1,00	23,3903 ± 0,1225
4353	Strahl	31.10.12 19:15 – 19:17	5694	ArCO ₂ (90:10)	80,0	4,146 ± 1	496,577 ± 1	727,80 ± 1,00	22,9854 ± 0,1197
4356	Strahl	31.10.12 22:09 – 22:12	11717	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,295 ± 1	494,404 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0473 ± 0,1201
4357	Strahl	31.10.12 22:12 – 22:15	11907	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,282 ± 1	494,538 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0404 ± 0,1201
4358	Strahl	31.10.12 22:15 – 22:19	12288	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,252 ± 1	494,356 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0476 ± 0,1201
4359	Strahl	31.10.12 22:19 – 22:22	12143	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,259 ± 1	494,471 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0425 ± 0,1201
4360	Strahl	31.10.12 22:22 – 22:25	12008	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,297 ± 1	494,365 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0492 ± 0,1201
4361	Strahl	31.10.12 22:25 – 22:28	11888	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,255 ± 1	494,342 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0483 ± 0,1201
4362	Strahl	31.10.12 22:28 – 22:32	11972	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,281 ± 1	494,206 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0559 ± 0,1202
4363	Strahl	31.10.12 22:32 – 22:35	10554	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,257 ± 1	494,134 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0582 ± 0,1202
4365	Strahl	31.10.12 22:43 – 22:47	12031	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,296 ± 1	494,544 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0408 ± 0,1201
4366	Strahl	31.10.12 22:47 – 22:50	11918	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,291 ± 1	494,483 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0434 ± 0,1201
4367	Strahl	31.10.12 22:50 – 22:53	11809	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,316 ± 1	494,586 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0397 ± 0,1201
4368	Strahl	31.10.12 22:53 – 22:57	11858	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,300 ± 1	494,390 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0482 ± 0,1201
4369	Strahl	31.10.12 22:57 – 23:00	11987	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,308 ± 1	494,530 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0420 ± 0,1201
4370	Strahl	31.10.12 23:00 – 23:03	11852	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,897 ± 1	494,258 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0825 ± 0,1204
4371	Strahl	31.10.12 23:03 – 23:06	11737	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,996 ± 1	494,302 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0851 ± 0,1204
4372	Strahl	31.10.12 23:06 – 23:08	5955	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,289 ± 1	494,198 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0567 ± 0,1202
4373	Strahl	31.10.12 23:10 – 23:13	11881	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,251 ± 1	494,205 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0546 ± 0,1202
4374	Strahl	31.10.12 23:13 – 23:15	5551	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,320 ± 1	494,267 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0549 ± 0,1202
4375	Strahl	31.10.12 23:18 – 23:22	11733	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,289 ± 1	494,515 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0418 ± 0,1201
4376	Strahl	31.10.12 23:22 – 23:25	11846	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,995 ± 1	494,409 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0800 ± 0,1204
4377	Strahl	31.10.12 23:25 – 23:28	11777	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,318 ± 1	494,595 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0394 ± 0,1201

Run- Nummer	Runtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} max]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
4378	Strahl	31.10.12 23:28 – 23:31	11757	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,307 ± 1	494,495 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0436 ± 0,1201
4379	Strahl	31.10.12 23:31 – 23:32	2730	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,279 ± 1	494,311 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0509 ± 0,1202
4384	Strahl	01.11.12 21:36 – 21:37	5321	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,026 ± 1	485,797 ± 1	727,80 ± 1,00	23,4941 ± 0,1232
4387	Strahl	01.11.12 21:47 – 21:58	11615	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,971 ± 1	486,397 ± 1	727,80 ± 1,00	23,4621 ± 0,1230
4388	Strahl	01.11.12 21:58 – 22:00	5728	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,011 ± 1	486,229 ± 1	727,80 ± 1,00	23,4723 ± 0,1230
4389	Strahl	01.11.12 22:03 – 22:06	11675	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,996 ± 1	486,401 ± 1	727,80 ± 1,00	23,4631 ± 0,1230
4390	Strahl	01.11.12 22:06 – 22:09	11642	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,009 ± 1	486,332 ± 1	727,80 ± 1,00	23,4671 ± 0,1230
4391	Strahl	01.11.12 22:09 – 22:11	9494	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,967 ± 1	486,383 ± 1	727,80 ± 1,00	23,4626 ± 0,1230
4392	Strahl	01.11.12 22:12 – 22:15	11776	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,973 ± 1	486,062 ± 1	727,80 ± 1,00	23,4785 ± 0,1231
4393	Strahl	01.11.12 22:15 – 22:19	12810	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,995 ± 1	486,071 ± 1	727,80 ± 1,00	23,4792 ± 0,1231
4394	Strahl	01.11.12 22:19 – 22:20	3633	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,911 ± 1	486,189 ± 1	727,80 ± 1,00	23,4694 ± 0,1230
4395	Strahl	01.11.12 22:21 – 22:24	11744	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,959 ± 1	486,257 ± 1	727,80 ± 1,00	23,4683 ± 0,1230
4396	Strahl	01.11.12 22:24 – 22:27	11680	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,019 ± 1	486,250 ± 1	727,80 ± 1,00	23,4716 ± 0,1230
4397	Strahl	01.11.12 22:27 – 22:28	1889	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,872 ± 1	485,926 ± 1	727,80 ± 1,00	23,4802 ± 0,1231
4399	Strahl	01.11.12 22:39 – 23:17	164493	ArCO ₂ (90:10)	84,0	5,216 ± 1	487,228 ± 1	727,80 ± 1,00	23,4823 ± 0,1231
4400	Strahl	01.11.12 23:17 – 23:56	164386	ArCO ₂ (90:10)	84,0	5,197 ± 1	487,788 ± 1	727,80 ± 1,00	23,4541 ± 0,1229
4414	kosm. Str.	02.11.12 11:44 – 12:06	145172	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,956 ± 1	491,915 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2437 ± 0,1215
4415	kosm. Str.	02.11.12 12:06 – 12:27	137993	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,940 ± 1	491,609 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2576 ± 0,1216
4416	kosm. Str.	02.11.12 12:27 – 12:49	144840	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,869 ± 1	491,886 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2410 ± 0,1215
4418	kosm. Str.	02.11.12 13:22 – 13:25	19728	ArCO ₂ (90:10)	84,0	5,023 ± 1	491,960 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2448 ± 0,1215
4419	kosm. Str.	02.11.12 13:29 – 13:51	142925	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,899 ± 1	492,935 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1924 ± 0,1211
4421	kosm. Str.	02.11.12 13:53 – 14:13	135439	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,956 ± 1	492,610 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2106 ± 0,1213
4422	kosm. Str.	02.11.12 14:13 – 14:16	18498	ArCO ₂ (90:10)	83,9	5,077 ± 1	493,364 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1805 ± 0,1210
4423	kosm. Str.	02.11.12 14:17 – 14:38	139392	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,945 ± 1	491,655 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2556 ± 0,1216
4424	kosm. Str.	02.11.12 16:17 – 16:31	96021	ArCO ₂ (90:10)	84,0	5,055 ± 1	490,983 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2930 ± 0,1218
4425	kosm. Str.	02.11.12 16:40 – 16:48	53622	ArCO ₂ (90:10)	84,0	5,026 ± 1	491,004 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2907 ± 0,1218
4426	kosm. Str.	02.11.12 16:50 – 17:15	176481	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,809 ± 1	490,590 ± 1	727,80 ± 1,00	23,3001 ± 0,1219
4427	kosm. Str.	02.11.12 17:15 – 17:23	50394	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,967 ± 1	491,405 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2686 ± 0,1216
4428	kosm. Str.	02.11.12 17:24 – 17:50	175464	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,404 ± 1	489,875 ± 1	727,80 ± 1,00	23,3150 ± 0,1220
4429	kosm. Str.	02.11.12 17:50 – 18:05	106930	ArCO ₂ (90:10)	83,9	4,861 ± 1	490,267 ± 1	727,80 ± 1,00	23,3181 ± 0,1220
4430	kosm. Str.	02.11.12 18:18 – 18:44	176521	ArCO ₂ (90:10)	84,0	5,017 ± 1	489,872 ± 1	727,80 ± 1,00	23,3446 ± 0,1222
4431	kosm. Str.	02.11.12 18:45 – 19:10	177658	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,876 ± 1	489,437 ± 1	727,80 ± 1,00	23,3588 ± 0,1223
4432	kosm. Str.	02.11.12 19:10 – 19:35	177909	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,123 ± 1	488,843 ± 1	727,80 ± 1,00	23,3511 ± 0,1222
4433	kosm. Str.	02.11.12 19:35 – 19:52	115100	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,858 ± 1	489,006 ± 1	727,80 ± 1,00	23,3787 ± 0,1224
4434	kosm. Str.	02.11.12 19:56 – 20:21	176204	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,824 ± 1	493,326 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1703 ± 0,1210
4435	kosm. Str.	02.11.12 20:21 – 20:46	174669	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,959 ± 1	493,428 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1719 ± 0,1210
4436	kosm. Str.	02.11.12 20:52 – 21:17	173334	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,879 ± 1	493,197 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1790 ± 0,1210
4437	kosm. Str.	02.11.12 21:17 – 21:42	175672	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,973 ± 1	492,881 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1985 ± 0,1212
4438	kosm. Str.	02.11.12 21:43 – 22:09	176736	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,905 ± 1	493,217 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1793 ± 0,1210
4439	kosm. Str.	02.11.12 22:10 – 22:20	69976	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,812 ± 1	492,669 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2010 ± 0,1212
4440	kosm. Str.	02.11.12 22:23 – 22:38	107122	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,932 ± 1	492,862 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1975 ± 0,1212

Run- Nummer	Runtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} ^{max}]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
4442	Strahl	02.11.12 22:58 – 22:59	1900	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,009 ± 1	493,606 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1185 ± 0,1206
4443	Strahl	02.11.12 23:05 – 23:08	13001	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,847 ± 1	493,812 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1011 ± 0,1205
4444	Strahl	02.11.12 23:08 – 23:11	11751	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,861 ± 1	493,847 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1001 ± 0,1205
4445	Strahl	02.11.12 23:11 – 23:14	12178	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,998 ± 1	493,705 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1133 ± 0,1206
4446	Strahl	02.11.12 23:14 – 23:17	11631	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,833 ± 1	493,838 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0992 ± 0,1205
4447	Strahl	02.11.12 23:17 – 23:20	11575	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,000 ± 1	493,795 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1091 ± 0,1206
4448	Strahl	02.11.12 23:20 – 23:23	11056	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,847 ± 1	493,870 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0984 ± 0,1205
4449	Strahl	02.11.12 23:23 – 23:26	11237	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,997 ± 1	493,908 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1037 ± 0,1205
4450	Strahl	02.11.12 23:26 – 23:28	10009	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,996 ± 1	493,769 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1102 ± 0,1206
4451	Strahl	02.11.12 23:33 – 23:37	12685	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,004 ± 1	493,952 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1019 ± 0,1205
4452	Strahl	02.11.12 23:37 – 23:39	11144	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,097 ± 1	493,969 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1055 ± 0,1205
4453	Strahl	02.11.12 23:39 – 23:42	12202	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,798 ± 1	493,898 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0947 ± 0,1205
4454	Strahl	02.11.12 23:42 – 23:45	11277	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,780 ± 1	494,007 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0888 ± 0,1204
4455	Strahl	02.11.12 23:45 – 23:48	12362	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,992 ± 1	494,097 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0946 ± 0,1205
4456	Strahl	02.11.12 23:48 – 23:48	218	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,671 ± 1	493,756 ± 1	727,80 ± 1,00	23,0955 ± 0,1205
4458	Strahl	03.11.12 02:05 – 02:08	12101	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,995 ± 1	492,473 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1715 ± 0,1210
4459	Strahl	03.11.12 02:08 – 02:10	7750	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,880 ± 1	492,495 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1650 ± 0,1209
4460	Strahl	03.11.12 02:12 – 02:16	12866	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,992 ± 1	492,466 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1717 ± 0,1210
4461	Strahl	03.11.12 02:16 – 02:19	12310	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,810 ± 1	492,692 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1523 ± 0,1209
4462	Strahl	03.11.12 02:19 – 02:22	11682	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,881 ± 1	492,549 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1624 ± 0,1209
4463	Strahl	03.11.12 02:22 – 02:25	11653	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,998 ± 1	492,633 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1640 ± 0,1209
4465	Strahl	03.11.12 02:26 – 02:31	11750	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,838 ± 1	492,282 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1731 ± 0,1210
4466	Strahl	03.11.12 02:31 – 02:33	11471	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,844 ± 1	492,263 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1742 ± 0,1210
4467	Strahl	03.11.12 02:33 – 02:36	11589	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,889 ± 1	492,259 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1766 ± 0,1210
4469	Strahl	03.11.12 02:41 – 02:45	12956	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,904 ± 1	491,889 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1949 ± 0,1211
4470	Strahl	03.11.12 02:45 – 02:48	11671	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,993 ± 1	492,022 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1928 ± 0,1211
4472	Strahl	03.11.12 02:51 – 02:54	11560	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,856 ± 1	491,903 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1919 ± 0,1211
4473	Strahl	03.11.12 02:54 – 02:57	11627	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,994 ± 1	491,989 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1944 ± 0,1211
4475	Strahl	03.11.12 02:59 – 03:03	12941	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,986 ± 1	491,401 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2220 ± 0,1213
4476	Strahl	03.11.12 03:03 – 03:06	12456	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,993 ± 1	491,389 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2229 ± 0,1213
4477	Strahl	03.11.12 03:06 – 03:09	11588	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,883 ± 1	491,421 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2161 ± 0,1213
4478	Strahl	03.11.12 03:09 – 03:13	13385	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,853 ± 1	491,412 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2151 ± 0,1213
4479	Strahl	03.11.12 03:13 – 03:16	12742	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,977 ± 1	491,421 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2206 ± 0,1213
4481	Strahl	03.11.12 03:23 – 03:25	11507	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,820 ± 1	491,003 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2330 ± 0,1214
4482	Strahl	03.11.12 03:25 – 03:25	1211	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,749 ± 1	491,064 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2268 ± 0,1214
4484	Strahl	03.11.12 03:31 – 03:35	13494	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,784 ± 1	491,094 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2270 ± 0,1214
4485	Strahl	03.11.12 03:35 – 03:38	12353	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,806 ± 1	491,025 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2314 ± 0,1214
4487	Strahl	03.11.12 03:41 – 03:42	135	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,034 ± 1	491,393 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2247 ± 0,1213
4488	Strahl	03.11.12 03:42 – 03:45	11711	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,000 ± 1	491,108 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2366 ± 0,1214
4490	Strahl	03.11.12 03:49 – 03:52	11653	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,851 ± 1	490,397 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2635 ± 0,1216
4491	Strahl	03.11.12 03:52 – 03:55	11773	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,814 ± 1	490,461 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2586 ± 0,1216

Run- Nummer	Runtyp	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% E _{drift} _{max}]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm/μs]
4492	Strahl	03.11.12 03:55 - 03:58	11595	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,821 ± 1	490,385 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2626 ± 0,1216
4493	Strahl	03.11.12 03:58 - 04:00	11078	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,858 ± 1	490,369 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2651 ± 0,1216
4494	Strahl	03.11.12 04:00 - 04:04	2436	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,916 ± 1	491,212 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2277 ± 0,1214
4495	Strahl	03.11.12 04:04 - 04:10	11966	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,997 ± 1	491,118 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2360 ± 0,1214
4497	Strahl	03.11.12 04:13 - 04:15	10762	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,993 ± 1	491,077 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2378 ± 0,1214
4498	Strahl	03.11.12 04:17 - 04:17	68	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,863 ± 1	491,544 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2093 ± 0,1212
4500	Strahl	03.11.12 04:25 - 04:28	12263	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,853 ± 1	491,083 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2308 ± 0,1214
4503	Strahl	03.11.12 04:35 - 04:37	11848	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,823 ± 1	491,269 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2205 ± 0,1213
4504	Strahl	03.11.12 04:37 - 04:41	14381	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,829 ± 1	491,093 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2292 ± 0,1214
4505	Strahl	03.11.12 04:41 - 04:42	3153	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,004 ± 1	490,884 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2475 ± 0,1215
4506	Strahl	03.11.12 04:45 - 04:45	2137	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,874 ± 1	490,886 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2412 ± 0,1215
4507	Strahl	03.11.12 17:21 - 17:33	11372	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,011 ± 1	490,595 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2616 ± 0,1216
4509	Strahl	03.11.12 19:15 - 19:24	43372	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,691 ± 1	491,885 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2325 ± 0,1214
4510	Strahl	03.11.12 19:25 - 19:26	8026	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,925 ± 1	492,296 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2241 ± 0,1213
4512	Strahl	03.11.12 19:27 - 19:33	10993	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,867 ± 1	491,559 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2088 ± 0,1212
4513	Strahl	03.11.12 19:33 - 19:34	2082	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,834 ± 1	491,503 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2099 ± 0,1212
4514	Strahl	03.11.12 19:34 - 19:40	10321	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,992 ± 1	491,436 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2206 ± 0,1213
4515	Strahl	03.11.12 19:40 - 19:44	9755	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,879 ± 1	491,202 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2263 ± 0,1214
4516	Strahl	03.11.12 19:44 - 19:47	8046	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,989 ± 1	491,364 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2239 ± 0,1213
4517	Strahl	03.11.12 20:03 - 20:04	1207	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,998 ± 1	491,333 ± 1	727,80 ± 1,00	23,2258 ± 0,1214
4521	Strahl	03.11.12 21:15 - 21:33	16542	ArCO ₂ (90:10)	81,2	4,097 ± 1	492,498 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1751 ± 0,1210
4522	Strahl	03.11.12 21:38 - 21:59	20767	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,963 ± 1	491,958 ± 1	727,80 ± 1,00	23,1944 ± 0,1211
4559	Strahl	09.11.12 11:56 - 12:05	36135	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,946 ± 1	502,719 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6932 ± 0,1177
4562	Strahl	09.11.12 12:47 - 12:49	7480	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,631 ± 1	503,145 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6595 ± 0,1175
4563	Strahl	09.11.12 12:54 - 13:00	17741	ArCO ₂ (90:10)	92,9	3,815 ± 1	503,301 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6608 ± 0,1175
4568	kosm. Str.	10.11.12 11:31 - 12:37	221878	ArCO ₂ (90:10)	83,9	4,958 ± 1	504,500 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6582 ± 0,1175
4570	kosm. Str.	10.11.12 14:13 - 14:38	84131	ArCO ₂ (90:10)	83,9	4,971 ± 1	503,382 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7097 ± 0,1179
4572	Strahl	10.11.12 15:31 - 15:43	53275	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,757 ± 1	502,373 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7003 ± 0,1178
4573	Strahl	10.11.12 15:43 - 15:45	6075	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,845 ± 1	501,759 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7323 ± 0,1180
4574	Strahl	10.11.12 15:50 - 15:51	3351	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,862 ± 1	502,397 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7040 ± 0,1178
4576	Strahl	10.11.12 16:02 - 16:15	58036	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,730 ± 1	502,845 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6776 ± 0,1176
4577	Strahl	10.11.12 16:17 - 16:21	17843	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,044 ± 1	501,857 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6913 ± 0,1177
4578	Strahl	10.11.12 16:21 - 16:26	22449	ArCO ₂ (90:10)	84,0	2,753 ± 1	502,467 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6504 ± 0,1175
4579	Strahl	10.11.12 16:26 - 16:31	22133	ArCO ₂ (90:10)	84,0	2,715 ± 1	502,325 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6551 ± 0,1175
4580	Strahl	10.11.12 16:31 - 16:34	13114	ArCO ₂ (90:10)	84,0	2,768 ± 1	502,403 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6540 ± 0,1175
4582	Strahl	10.11.12 16:43 - 16:46	14504	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,426 ± 1	502,961 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6586 ± 0,1175
4583	Strahl	10.11.12 16:52 - 17:07	64928	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,701 ± 1	502,311 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7006 ± 0,1178
4584	Strahl	10.11.12 17:07 - 17:19	49879	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,607 ± 1	502,448 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6901 ± 0,1177
4585	Strahl	10.11.12 17:19 - 17:29	42171	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,792 ± 1	501,989 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7194 ± 0,1179
4586	Strahl	10.11.12 17:29 - 17:32	13866	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,867 ± 1	502,062 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7195 ± 0,1179
4587	Strahl	10.11.12 17:32 - 17:47	62190	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,681 ± 1	502,328 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6989 ± 0,1178

Run- Nummer	Run- typ	Datum und Uhrzeit	Anzahl Ereignisse	Gasgemisch	Driftfeld [% $E_{\text{max}}^{\text{drift}}$]	Kante GEM-Folie	Kante Kathode	Driftlänge [mm]	Driftgeschwindigkeit [mm./ps]
4589	Strahl	10.11.12 18:12 – 18:17	25854	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,354 ± 1	502,062 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6961 ± 0,1178
4610	Strahl	11.11.12 13:43 – 13:51	22502	ArCO ₂ (90:10)	83,9	4,469 ± 1	503,338 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6888 ± 0,1177
4611	Strahl	11.11.12 13:52 – 14:03	28522	ArCO ₂ (90:10)	83,9	4,439 ± 1	503,103 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6981 ± 0,1178
4612	Strahl	11.11.12 14:04 – 14:13	34303	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,672 ± 1	502,083 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7096 ± 0,1179
4613	Strahl	11.11.12 14:13 – 14:23	32621	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,632 ± 1	502,408 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6930 ± 0,1177
4614	Strahl	11.11.12 14:23 – 14:32	29421	ArCO ₂ (90:10)	84,0	2,994 ± 1	502,362 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6661 ± 0,1176
4615	Strahl	11.11.12 14:32 – 14:34	330	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,111 ± 1	502,675 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6573 ± 0,1175
4623	Strahl	11.11.12 15:21 – 15:48	36915	ArCO ₂ (90:10)	84,0	3,649 ± 1	502,480 ± 1	727,80 ± 1,00	22,6905 ± 0,1177
4629	Strahl	11.11.12 18:16 – 18:21	22785	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,645 ± 1	502,123 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7522 ± 0,1181
4630	Strahl	11.11.12 18:21 – 18:27	26218	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,588 ± 1	502,551 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7301 ± 0,1180
4631	Strahl	11.11.12 18:27 – 18:33	24202	ArCO ₂ (90:10)	84,0	4,484 ± 1	502,567 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7246 ± 0,1180
4632	Strahl	11.11.12 18:33 – 18:37	15087	ArCO ₂ (90:10)	83,8	4,454 ± 1	502,527 ± 1	727,80 ± 1,00	22,7251 ± 0,1180

Tabelle E.1: Rekonstruierte Driftgeschwindigkeiten.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Zeitachse	1
1.2	Elementarteilchen	2
1.3	Die starke Kopplungskonstante	3
1.4	Emissionsspektrum Argon	4
1.5	Totaler Wirkungsquerschnitt	4
1.6	Resonanzbeiträge	5
1.7	Die Elektronen-Stretcher-Anlage	6
1.8	Der CBELSA/TAPS-Aufbau	7
1.9	Das Goniometer	8
1.10	Der Tagger	9
1.11	Das polarisierte Target	10
1.12	Das Flüssig-Wasserstoff-Target	11
1.13	Der Crystal-Barrel-Detektor	11
1.14	Crystal-Barrel-Kristall	12
1.15	MiniTAPS	13
1.16	Der Innendetektor	14
1.17	Der Gas-Čerenkov-Detektor	15
1.18	GIM und FluMo	16
1.19	Triggereffizienz	17
1.20	Kristall-Hütchen	18
1.21	Zeichnung GEM-TPC	19
2.1	Maße des Spurdetektors	23
2.2	Funktionsprinzip einer TPC	24
2.3	Foto einer GEM-Folie	24
2.4	Feldverlauf an einer GEM-Folie	24
2.5	Funktionsweise einer GEM-Folie	25
2.6	Energieverlust dE/dx	27
2.7	Foto der TestBench	31
2.8	Szintillationsdetektoren	32
2.9	Siliziumstreifendetektoren	32
2.10	Planare GEM-Detektoren	33
2.11	Test-TPC	34
2.12	Test-TPC: Pad-Ausleseebene	35
2.13	Ereignis in der Test-TPC	35
2.14	GEM-TPC: Feldkäfig	36
2.15	GEM-TPC: GEM-Flansch	37
2.16	GEM-TPC: PadPlane	37
2.17	GEM-TPC: Media-Flansch	38
2.18	GEM-TPC	39
2.19	FOPI-Experiment	40
2.20	Ereignis in der GEM-TPC	40
2.21	Gassystem mit Kr83-Quelle	41
2.22	Kr83-Eichung: Ausgleichsfaktoren	42

2.23	Kr83-Eichung: Energieauflösung	42
2.24	GEM-TPC im Crystal-Barrel-Detektor	43
2.25	Rückfürjochs des Asterix-Experiments	44
2.26	Vorgeschlagene Konfiguration des supraleitenden Magneten	45
2.27	Magnetfeldsimulation: Schnitt durch den Crystal-Barrel-Detektor	45
2.28	Magnetfeldsimulation: Das Rückführjoch im CBELSA/TAPS-Aufbau	46
2.29	Magnetfeldsimulation: gesamter CBELSA/TAPS-Aufbau	46
3.1	GUI zur Erstellung von Magboltz-Eingabedateien	48
3.2	Simulation: Longitudinale Diffusion mit B-Feld	50
3.3	Simulation: Longitudinale Diffusion ohne B-Feld	51
3.4	Simulation: transversale Diffusion mit B-Feld	52
3.5	Simulation: transversale Diffusion ohne B-Feld	53
3.6	Simulation: Driftgeschwindigkeit mit B-Feld	54
3.7	Simulation: Driftgeschwindigkeit ohne B-Feld	54
3.8	Simulation: Temperaturabhängigkeit in ArCO ₂	55
3.9	Simulation: Temperaturabhängigkeit in NeCO ₂	56
3.10	Simulation: Druckabhängigkeit in ArCO ₂	57
3.11	Simulation: Druckabhängigkeit in NeCO ₂	58
3.12	Simulation: Konzentrationabhängigkeit in ArCO ₂	59
3.13	Simulation: Konzentrationabhängigkeit in NeCO ₂	59
3.14	Simulation: Verunreinigungen mit Sauerstoff in ArCO ₂	60
3.15	Simulation: Verunreinigungen mit Sauerstoff in NeCO ₂	60
3.16	Simulation: Verunreinigungen mit Wasser in ArCO ₂	61
3.17	Simulation: Verunreinigungen mit Wasser in NeCO ₂	61
4.1	W-IE-NE-R MPOD-Crate	64
4.2	ISEG HPn300	64
4.3	Auslese der Pt100-Sensoren	66
4.4	Umrechnung der Pt100-Widerstandswerte in Temperaturen	67
4.5	HUBER Unichiller UC080T-H	67
4.6	Kühlungsring der Front-End-Karten	67
4.7	Dual-XPort-Platine	68
4.8	Gassensoren am Media-Flansch	69
4.9	Labornetzgeräte EA-PS 3016-20B und HAMEG 4040	70
4.10	SPS	71
4.11	Aufbau des Gassystems für die TestBench	73
4.12	Gassystem für die TestBench	74
4.13	MKS 647b Gasfluss-/Druck-Controller	75
4.14	Foto des Gasmesssystems für die Test-TPC	75
5.1	SlowControl: Flussdiagramm des Hauptprogramms	81
5.2	SlowControl-Web-Oberfläche: Startseite	88
5.3	SlowControl-GUI GEM-TPC: Registerkarte 'TPC - HV'	89
5.4	Run-Datenbank-GUI: Registerkarte 'RunDB'	91
6.1	Langzeitstabilität Spannung	95
6.2	Langzeitstabilität Temperatur	95

6.3	Langzeitstabilität Druck	96
7.1	Driftgeschwindigkeit Übersicht	100
7.2	Analog-Ring-Speicher	100
7.3	Analyse: Schnitte	103
7.4	Analyse: Position der Kanten	104
7.5	Analyse: Position der Kanten und Targets	105
7.6	Analyse: Position der Kante und des Targets	107
7.7	Ergebnisse: Driftgeschwindigkeit	108
7.8	Ergebnisse: Driftgeschwindigkeit Pion-Strahlzeit	109
7.9	Ergebnisse: Temperaturabhängigkeit	110
7.10	Ergebnisse: Temperaturabhängigkeit	111
7.11	Ergebnisse: Positionsabhängigkeit	112
7.12	Ergebnisse: Temperaturabhängigkeit	113
7.13	Ergebnisse: Auflösung x	114
7.14	Ergebnisse: Spuranpassung TPC-CDC	115
7.15	Ergebnisse: Auflösung z	116
7.16	Ergebnisse: Energieverlust	116
A.1	Schaltplan der Pt100-Ausleseplatine	119
A.2	Design der Pt100-Ausleseplatine	120
A.3	Design der Dual-XPort-Platine	120
A.4	Schaltplan der Dual-XPort-Platine	121
C.1	SlowControl-Web-Oberfläche: Startseite	123
C.2	SlowControl-Web-Oberfläche: Letzte Werte	124
C.3	SlowControl-Web-Oberfläche: Alte Werte	125
C.4	SlowControl-Web-Oberfläche: Änderungen	125
C.5	SlowControl-Web-Oberfläche: Einstellungen	126
C.6	SlowControl-Web-Oberfläche: Logbuch	128
C.7	SlowControl-Web-Oberfläche: Übersicht	129
C.8	SlowControl-GUI GEM-TPC: Registerkarte ‘TPC - HV’	131
C.9	SlowControl-GUI GEM-TPC: Registerkarte ‘TPC - Graphs’	134
C.10	SlowControl-GUI GEM-TPC: Registerkarte ‘TPC - Special Ops’	135
C.11	SlowControl-GUI GEM-TPC: Registerkarte ‘Sensors’	136
C.12	SlowControl-GUI GEM-TPC: Registerkarte ‘Logbook’	137
C.13	SlowControl-GUI GEM-TPC: Registerkarte ‘Ancient Values’	138
C.14	Ausgabe alter Werte mit der GUI	139
C.15	SlowControl-GUI TestBench: Registerkarte ‘TPC - HV’ (TestBench)	140
C.16	SlowControl-GUI TestBench: Registerkarte ‘MPOD Crate’ (TestBench)	141
C.17	SlowControl-GUI TestBench: Registerkarte ‘Low Voltage’ (TestBench)	142
C.18	SlowControl-GUI TestBench: Registerkarte ‘Gas+Temperature’ (TestBench)	143
C.19	Run-Datenbank-GUI: Registerkarte ‘RunDB’	145
C.20	Run-Datenbank-GUI: Registerkarte ‘RunDB Graph’	147
C.21	Run-Datenbank-GUI: Registerkarte ‘Logbook’	148
C.22	Run-Datenbank-GUI: Registerkarte ‘Errors’	148

Tabellenverzeichnis

1.1	Polarisationsobservablen	5
2.1	Parameter der GEM-TPC	39
3.1	Eigenschaften verschiedener Gasgemische	49
4.1	Gaskorrekturfaktoren	73
6.1	Leistungsfähigkeit der SlowControl-Komponenten	94
B.1	Kalibrierung der Pt100-Auslese 1	122
B.2	Kalibrierung der Pt100-Auslese 2	122
E.1	Driftgeschwindigkeiten	199

Literaturverzeichnis

- [1] THOMSON, J.J.: *Cathode Rays*. The Philosophical Magazine, 44(293), 1897.
- [2] RUTHERFORD, ERNEST: *Collision of alpha Particles with Light Atoms; An Anomalous Effect in Nitrogen*. The Philosophical Magazine, 37(222):537–87, 1897.
- [3] CHADWICK, J.: *The Existence of a Neutron*. Proc. Roy. Soc., 136(830):692–708, 1932.
- [4] BOHR, NILS: *On the Constitution of Atoms and Molecules, Part I*. The Philosophical Magazine, 26(1):1–25, 1913.
- [5] FRISCH, R. und STERN, O.: *Über die magnetische Ablenkung von Wasserstoffmolekülen und das magnetische Moment des Protons. I*. Zeitschrift für Physik, 85(1-2):4–16, 1933.
- [6] ESTERMANN, I. und STERN, O.: *Über die magnetische Ablenkung von Wasserstoffmolekülen und das magnetische Moment des Protons. II*. Zeitschrift für Physik, 85(1-2):17–24, 1933.
- [7] ANDERSON, H.L., FERMI, E., LONG, E.A. und NAGLE, D.E.: *Total Cross Sections of Positive Pions in Hydrogen*. Phys. Rev., 85:936–936, Mar 1952.
- [8] MCALLISTER, R.W. und HOFSTADTER, R.: *Elastic Scattering of 188-Mev Electrons from the Proton and the Alpha Particle*. Phys. Rev., 102:851–856, May 1956.
- [9] HAND, L.N., MILLER, D.G. und WILSON, R.: *Electric and Magnetic Form Factors of the Nucleon*. Rev. Mod. Phys., 35:335–349, Apr 1963.
- [10] GELL-MANN, MURRAY: *A schematic model of baryons and mesons*. Physics Letters, 8(3):214–215, 1964.
- [11] ZWEIG, GEORGE: *An SU_3 model for strong interaction symmetry and its breaking: Part I*. (CERN-TH-401):24 p, 1964.
- [12] ZWEIG, GEORGE: *An SU_3 model for strong interaction symmetry and its breaking: Part II*. (CERN-TH-412):80 p, 1964.
- [13] STEIN, S., ATWOOD, W.B., BLOOM, E.D., COTTRELL, R.L., DESTAEBLER, H.C. et al.: *Electron Scattering at 4-Degrees with Energies of 4.5-GeV - 20-GeV*. Phys.Rev., D12:1884, 1975.
- [14] BERINGER, J. et al.: *Review of Particle Physics*. Phys. Rev. D, 86:010001, 2012.
- [15] GREENBERG, OSCAR W.: *Spin and unitary-spin independence in a paraquark model of baryons and mesons*. Phys. Rev. Lett., 13:598, 1964.
- [16] GROSS, DAVID J. und WILCZEK, FRANK: *Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories*. Phys. Rev. Lett., 30:1343–1246, 1973.
- [17] WIKIMEDIA COMMONS: *Emissionsspektrum Argon*. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Argon_Spectrum.jpg, 2010. (abgerufen am 26. November 2013).

- [18] NAKAMURA, K. et al.: *Review of particle physics*. J. Phys., G(37):075021, 2010.
- [19] VAN PEE, HARALD et al.: *Photoproduction of π^0 -mesons off protons from the $\Delta(1232)$ region to $E(\gamma) = 3$ GeV*. The European Physical Journal A, 31(1):61–77, 2007.
- [20] CREDÉ, VOLKER et al.: *Photoproduction of η -Mesons off Protons for 0.75 GeV $> E(\gamma) > 3$ GeV*. Phys. Rev. Lett., 94:012004, 2005.
- [21] LÖRING, ULRICH, METSCH, BERNARD C. und PETRY, HERBERT R.: *The light baryon spectrum in a relativistic quark model with instanton-induced quark forces: The non-strange baryon spectrum and ground-states*. Eur. Phys. J., A 10:395–446, 2001.
- [22] TIATOR, LOTHAR et al.: *pers. Komm.*, 2013.
- [23] ANISOVICH, A.V., KLEMP, E., NIKONOV, V.A., SARANTSEV, A.V. und THOMA, U.: *Nucleon resonances in the fourth resonance region*. Eur. Phys. J., A 47:153, 2011.
- [24] BARKER, I.S., DONNACHIE, A. und STORROW, J.K.: *Complete experiments in pseudoscalar photoproduction*. Nucl.Phys., B 95:347–356, 1975.
- [25] CHIANG, W. und TABAKIN, F.: *Completeness rules for spin observables in pseudoscalar meson photoproduction*. Phys. Rev. C, 55:2054–2066, 1997.
- [26] THIEL, ANNIKA: *Bestimmung der Doppelpolarisationsobservablen G in π^0 -Photoproduktion*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2012.
- [27] GOTTSCHALL, MANUELA: *Bestimmung der Doppelpolarisationsobservablen E für die Reaktion $\gamma p \rightarrow p\pi^0$ am CBELSA/TAPS-Experiment*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2012.
- [28] MÜLLER, JONAS: *Messung der Doppelpolarisationsobservablen E in der Reaktion $\gamma p \rightarrow p\eta$ mit dem CBELSA/TAPS-Experiment*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2013. in Vorbereitung.
- [29] HARTMANN, JAN. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2013. in Vorbereitung.
- [30] SEIFEN, TOBIAS. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2013. in Vorbereitung.
- [31] HILLERT, WOLFGANG: *The Bonn Electron Stretcher Accelerator ELSA: Past and future*. Eur. Phys. J., A 28(s01):139–148, 2006.
- [32] FROMMBERGER, FRANK: *Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA*. <http://www-elsa.physik.uni-bonn.de/Beschleuniger/ELSA-2013-1.gif>, 2013. (abgerufen am 26. November 2013).
- [33] BGO-OD EXPERIMENT. <http://bgo-od.physik.uni-bonn.de>.
- [34] WALTHER, DIETER: *pers. Komm.*, 2013.
- [35] KAMMER, SUSANNE: *Strahlpolarimetrie am CBELSA/TAPS Experiment*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2010.

- [36] FROMMBERGER, FRANK: *pers. Komm.*, 2013.
- [37] FORNET-PONSE, KATHRIN: *Die Photonenmarkierungsanlage fuer das Crystal-Barrel/TAPS-Experiment an ELSA*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2009.
- [38] BRADTKE, CHRISTIAN et al.: *A new frozen-spin target for 4π detection*. Nucl. Instrum. Meth., A 436:430, 1999.
- [39] HAMMANN, CHRISTIAN: *Aufbau eines Flüssigwasserstofftargets zur Durchführung von Kalibrationsmessungen am Crystal-Barrel-Experiment an ELSA*. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2009.
- [40] FLEMMING, HOLGER: *Entwurf und Aufbau eines Zellularlogik-Triggers für das Crystal-Barrel-Experiment an der Elektronenbeschleunigeranlage ELSA*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2001.
- [41] AKER, E. et al.: *The Crystal Barrel spectrometer at LEAR*. Nucl. Instrum. Meth., A 321:69–108, 1992.
- [42] BÖSE, SABINE: *Modifikation und Test des Lichtpulsersystems für den Crystal-Barrel-Aufbau an ELSA*. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2006.
- [43] FUNKE, CHRISTIAN: *Untersuchungen zur Energieauflösung von CsI-Kristallen mit Hochgeschwindigkeits-ADCs*. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2002.
- [44] WENDEL, CHRISTOPH: *Design und Aufbau eines Szintillationsdetektors zur Identifizierung geladener Teilchen im Crystal-Barrel-Vorwärtsdetektor*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2008.
- [45] FÖSEL, ANGELA: *Entwicklung und Bau eines Innendetektors für das Crystal-Barrel-Experiment an ELSA/Bonn*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen, 2001.
- [46] GRÜNER, MARCUS: *Modifikation und Test des Innendetektors für das Crystal-Barrel-Experiment*. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2006.
- [47] HARTMANN, JAN: *Zeitkalibrierung und Photonenflussbestimmung für das Crystal-Barrel-Experiment an ELSA*. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2008.
- [48] KAISER, DAVID: *Aufbau und Test des Gas-Čerenkov-Detektors für den Crystal-Barrel-Aufbau an ELSA*. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2007.
- [49] KONRAD, MICHAEL: *Ortssensitiver Detektor für hochenergetische Photonen bei höchsten Raten*. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2001.

- [50] DIELMANN, JESSICA: *Entwicklung, Aufbau und Test eines Detektors zur Bestimmung des Photonенflusses an der Bonner Photonенmarkierungsanlage*. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2008.
- [51] WINNEBECK, ALEXANDER: *Entwicklung und Implementierung eines universellen, FPGA basierten Triggermoduls für das Crystal-Barrel-Experiment an ELSA*. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2006.
- [52] HONISCH, CHRISTIAN: *Untersuchungen zu einer neuen Avalanche-Photodioden-Auslese für das Crystal-Barrel-Kalorimeter*. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 209.
- [53] URBAN, MARTIN: *Compensation of the Temperature Dependence of Avalanche Photodiodes for a new Readout of the Crystal Barrel Calorimeter*. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2011.
- [54] VAN PEE, HARALD: *pers. Komm.*, 2013.
- [55] DRINHAUS, JORRIT: *Aufbau und Test einer 3x3-CsI(Tl)-Kristallmatrix am getaggtен Photonенstrahl an ELSA*. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2012.
- [56] WINNEBECK, ALEXANDER: *Design Studies for a Tracking Upgrade of the Crystal Barrel Experiment at ELSA and Installation of a Tracking Test Bench*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2009.
- [57] SCHMITZ, ROMAN: *Simulationen zum Nachweis geladener Teilchen für das Crystal-Barrel-Experiment an ELSA*. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2008.
- [58] FABBETTI, LAURA et al.: *The PANDA GEM-based TPC Prototype*. Nucl. Instr. Meth. A, 628:204–208, 2011.
- [59] KETZER, BERNHARD: *The PANDA experiment at FAIR*. Int. J. Mod. Phys. A, 21:5675–5685, 2006.
- [60] ÄYSTÖ, L. et al.: *An International Accelerator Facility for Beams of Ions and Antiprotons*, 2001. Conceptual Design Report.
- [61] NYGREN, DAVID: *The Time-Projection Chamber - A new 4π detector for charged particles*. In: *PEP Summer Study*, Seiten 58–78, 08 1974. PEP-144.
- [62] NYGREN, DAVID R. und MARX, JAY N.: *The Time Projection Chamber*. Phys. Today, 31:46–53, 1978.
- [63] WENIG, SIEGFRIED: *Performance of the large-scale TPC system in the CERN heavy ion experiment NA49*. Nucl. Instr. Meth. A, 409:100–104, 1998.
- [64] ACKERMANN, K. H. et al.: *The STAR time projection chamber*. Nucl. Phys. A, 661:681–685, 1999.
- [65] THE ALICE COLLABORATION: *ALICE Technical Design Report: Time Projection Chamber*. Technischer Bericht, 2000.

- [66] ALME, J. et al.: *The ALICE TPC, a large 3-dimensional tracking device with fast readout for ultra-high multiplicity events*. Nucl. Instr. Meth. A, 622:316–367, 2010.
- [67] KAPPLER, STEFFEN G.: *Part II of II: Development of a GEM-based TPC Readout for Future Collider Experiments*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2007. IEKP-KA/2004-17.
- [68] SOBLOHER, BLANKA: *Simulationsstudien zu GEM-Folien für die Auslese einer TPC*. Diplomarbeit, Rheinisch-Westphälische Technische Hochschule Aachen, 2002.
- [69] SAULI, FABIO: *GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors*. Nucl. Instr. Meth. A, 386:531–534, 1997.
- [70] BALL, M., BÖHMER, F.V., DÖRHEIM, S., HÖPPNER, C., KETZER, B., KONOROV, I., NEUBERT, S., PAUL, S., RAUCH, J., UHL, S., VANDENBROUCKE, M., BERGER, M., BERGER-CHEN, J.-C., CUSANNO, F., FABIETTI, L., MÜNZER, R., ARORA, R., FRÜHAUF, J., KIŠ, M., LEIFELS, Y., KLEIPA, V., HEHNER, J., KUNKEL, J., KURZ, N., PETERS, K., RISCH, H., SCHMIDT, C. J., SCHMITT, L., SCHWAB, S., SOYK, D., VOSS, B., WEINERT, J., BECK, R., KAISER, D., LANG, M., SCHMITZ, R., WALTHER, D., BÜHLER, P., MÜLLNER, P., ZMESKAL, J. und HERMANN, N.: *Technical Design Study for the PANDA Time Projection Chamber*. ArXiv e-prints, 2012.
- [71] KETZER, B., BACHMANN, S., CAPEÁNS, M., DEUTEL, M., FRIEDRICH, J., KAPPLER, S., KONOROV, I., PAUL, S., PLACCI, A., REISINGER, K., ROPELEWSKI, L., SHEKHTMAN, L. und SAULI, F.: *GEM detectors for COMPASS*. IEEE Trans. Nucl. Sci., 48:1065–1069, 2001.
- [72] KETZER, B., ALTUNBAS, M.C., DEHMELT, K., EHLERS, J., FRIEDRICH, J., GRUBE, B., KAPPLER, S., KONOROV, I., PAUL, S., PLACCI, A., ROPELEWSKI, L., SAULI, F., SCHMITT, L. und SIMON, F.: *Triple GEM tracking detectors for COMPASS*. IEEE Trans. Nucl. Sci., 49:2403–2410, 2002. CERN-OPEN-2002-004.
- [73] BENCIVENNI, G. et al.: *A triple GEM detector with pad readout for high rate charged particle triggering*. Nucl. Instr. Meth. A, 488:493–502, 2002.
- [74] BENCIVENNI, G. und DOMENICI, D.: *An ultra-light cylindrical GEM detector as inner tracker at KLOE-2*. Nucl. Instr. Meth. A, 581:221–224, 2007.
- [75] ABBANEO, D. et al.: *Characterization of GEM Detectors for Application in the CMS Muon Detection System*. 2010.
- [76] KLEINKNECHT, KONRAD: *Detektoren für Teilchenstrahlung*. Teubner Studienbücher : Physik, 3rd Auflage, 1992.
- [77] HAUSCHILD, M., HEUER, R.D., KLEINWORT, C., LUDWIG, J., MOHR, W. et al.: *Particle identification with the OPAL jet chamber*. Nucl. Instr. Meth. A, 314:74–85, 1992.
- [78] BLUM, WALTER, RIEGLER, WERNER und ROLANDI, LUIGI: *Particle Detection with Drift Chambers*. Springer, 1st Auflage, 1993.

- [79] NEUBERT, SEBASTIAN: *A GEM-based TPC for \bar{P} PANDA - Detector Simulations and Prototype Design*. Diplomarbeit, Techn. Univ. München, 2005.
- [80] LOTZE, SVEN: *Ion Backdrift Minimisation in a GEM-Based TPC Readout*. Dissertation, Rheinisch-Westphälische Technische Hochschule Aachen, 2006.
- [81] WEITZEL, QUIRIN: *Precision Meson Spectroscopy: Diffractive Production at COMPASS and Development of a GEM-based TPC for PANDA*. Dissertation, Techn. Univ. München, 2008.
- [82] GRUPEN, C.: *Teilchendetektoren*. BI-Wiss.-Verlag, 1st Auflage, 1993.
- [83] BACHMANN, S., A. BRESSAN, KETZER, B., DEUTEL, M., ROPELEWSKI, L., SAULI, F., BONDAR, A.E., BUZULUTSKOV, A.F., SHEKHTMAN, L.I., SOKOLOV, A., TATARINOV, A.A., VASILEV, A., KAPPLER, S. und SCHULTE, E.C.: *Performance of GEM detectors in high intensity particle beams*. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A, 470(CERN-EP-2000-116. 3):548–561, Aug 2000.
- [84] DÖRHEIM, SVERRE: *Track Reconstruction in a Setup for the Characterization of a GEM-TPC at ELSA*. Diplomarbeit, Techn. Univ. München, 2009.
- [85] BAUM, G., KYYNÄRÄINEN, J. und TRIPET, A.: *COMPASS: a proposal for a common muon and proton apparatus for structure and spectroscopy*. Technischer Bericht CERN-SPSLC-96-14. SPSLC-P-297, CERN, Geneva, 1996.
- [86] MALLOT, G.K.: *The COMPASS spectrometer at CERN*. Nucl. Instr. Meth. A, 518(1–2):121–124, 2004.
- [87] VANDENBROUCKE, MAXENCE: *Development and Characterization of Micro-Pattern Gas Detectors for Intense Beams of Hadrons*. Dissertation, Techn. Univ. München, 2012.
- [88] HILDENBRAND, K.D.: *One year of operating 'FOPI': Results and status of the 4 pi detector facility at SIS / ESR*. GSI Nachr., 91-02:6–16, Mar 1992.
- [89] HARTMANN, OLAF N.: *The FOPI Experiment at GSI-SIS*. http://www-fopi.gsi.de/pub//conf/olaf_oepg2010.pdf. Presented at the 60th Annual Meeting of the Austrian Physical Society; University Salzburg, Austria, september 10th, 2010.
- [90] RYU, M.S., HONG, B., KANG, T.I. und FOPI KOLLABORATION: *FOPI Detector for Heavy-ion Collision Experiment at SIS/GSI*. Journal of the Korean Physical Society, 59(2):1605–1608, 2011.
- [91] SCHMITZ, ROMAN et al.: *Calibration of the GEM-TPC prototype with ^{83m}Kr* . JINST, 2014.
- [92] DYDAK, F.: *Analysis of HARP TPC krypton data*. HARP memo, 04-103, Apr 2004. 10 June 2004.
- [93] KOCH, H., AMSLER, C., AKER, E. und ARMSTRONG, T.: *Proposal: the crystal barrel*. oai:cds.cern.ch:725507. Technischer Bericht CERN-PSCC-85-56. PSCC-P-90, CERN, Genf, Schweiz, 1985.

- [94] HOBL, A. und MEYER-REUMERS, M.: *Barrel-Magnet-Studie, Project-No. 1812*. Technischer Bericht 1812-BP-7432-0, ACCEL (jetzt Bruker EST), Bergisch Gladbach, 2007.
- [95] CST - COMPUTER SIMULATION TECHNOLOGY. <http://www.cst.com/>.
- [96] BIAGI, STEPHEN FRANCIS: *A multiterm Boltzmann analysis of drift velocity, diffusion, gain and magnetic-field effects in Argon-Methane-water-vapour mixtures*. Nucl. Instr. Meth. A, 283:716–722, 1989.
- [97] BÖHMER, FELIX VALENTIN: *A High-Rate Time Projection Chamber for PANDA - Simulation Studies and GPU-based Track Finding*. Diplomarbeit, Techn. Univ. München, 2009.
- [98] BIAGI, STEPHEN FRANCIS: *MAGBOLTZ Transport parameters computation program (Data base for the cross sections of gases 30 gases)*. Nucl. Instr. Meth. A, 273:1–2, 1988.
- [99] BIAGI, STEPHEN FRANCIS: *MAGBOLTZ, Program to compute gas transport parameters*. CERN, <http://ref.web.cern.ch/ref/CERN/CNL/2000/001/magboltz>. Version 8.9.7.
- [100] VEENHOF, ROB: *Choosing a gas mixture for the ALICE TPC*. ALICE-INT-2003-29, 2003.
- [101] SHARMA, ARCHANA: *Properties of some gas mixtures used in tracking detectors*. 1998.
- [102] BREZINA, CHRISTOPH: *A GEM based Time Projection Chamber with pixel read-out*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2013.
- [103] W-IE-NE-R: *MPOD HV&LV Power Supply System - Technical Manual*, 2011.
- [104] ISEG SPEZIALELEKTRONIK GMBH: *High Voltage Power Supply EHS 80 vvx - Operator's manual*, 2006.
- [105] ISEG SPEZIALELEKTRONIK GMBH. <http://www.iseg-hv.com/de/>.
- [106] W-IE-NE-R, PLEIN & BAUS GMBH. <http://www.wiener-d.de/>.
- [107] ISEG SPEZIALELEKTRONIK GMBH: *19"/1HE - Hochspannungs-Netzgerät der Baureihe HPS 300 W und 800 W - Bedienungsanleitung*, 2006.
- [108] SYSTEMDESIGNSOFTWARE NI LABVIEW. <http://www.ni.com/labview/d/>.
- [109] HUBER: *Betriebsanleitung - Unichiller im Towergehäuse mit CC-Pilot*, 2009.
- [110] LANTRONIX: *XPort/XChip SoC - User Guide*, 2007.
- [111] MÜLLNER, PHILIPP: *GEM based Time Projection Chamber prototype for the PANDA experiment - Gas system development and forward tracking studies*. Dissertation, Stefan-Meyer-Institut der Universität Wien, 2012.
- [112] SENSIRION AG: *ASF1400 Bidirectional Mass Flow Meter - Manual*, 2008.
- [113] MEASUREMENT SPECIALTIES: *M5100 Heavy Industrial Pressure Transducer - Manual*, 2010.

- [114] POLLIN ELECTRONIC GMBH: *AVR-NET-IO-Board - Handbuch*, 2008.
- [115] SIEMENS: *SIMATIC Automatisierungssysteme S7-300, ET 200M Ex- Peripheriebaugruppen Gerätehandbuch*, 2007.
- [116] MKS INSTRUMENTS: *Multi Channel Flow Ratio/Pressure Controller Type 647B - Instruction Manual*, 1999.
- [117] TELEDYNE ANALYTICAL INSTRUMENTS: *OPERATING INSTRUCTIONS FOR Model 3190 Series Trace Oxygen Analyzer*, 1999.
- [118] AUSTREGESILO, A.: *Kompaktes Gasmesssystem für TPC-Prototyp von \bar{P} ANDA*. Technischer Bericht, München, 2006.
- [119] THIEL, ANNIKA: *Aufbau einer computergesteuerten Experimentüberwachung für den Crystal-Barrel-Aufbau an ELSA*. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2006.
- [120] POSTGRESQL. <http://www.postgresql.org/>.
- [121] HAMEG INSTRUMENTS GMBH: *Powersupply HMP 4030 / HMP 4040 - Handbuch / Manual*, 2009.
- [122] SLOWCONTROL-WEBSEITE DER GEM-TPC. <http://dldcs01.gsi.de/slowcontrol/>.
- [123] SLOWCONTROL-WEBSEITE DER TESTBENCH. <http://tbslow.cb.uni-bonn.de/slowcontrol/>.
- [124] QT PROJECT HOSTING: *Qt Project*. <http://qt-project.org/>.
- [125] GNU: *GNU Lesser General Public License (LGPL)*. <http://www.gnu.org/licenses/lgpl-3.0.de.html>.
- [126] MUSA, L. und SAFARIK, K.: *Letter of Intent for the Upgrade of the ALICE Experiment*. Technischer Bericht CERN-LHCC-2012-012. LHCC-I-022, CERN, Geneva, Aug 2012.
- [127] KETZER, BERNHARD, FÜR DIE GEM-TPC und ALICE TPC KOLLABORATIONEN: *A time projection chamber for high-rate experiments: Towards an upgrade of the {ALICE} {TPC}*. Nucl. Instr. Meth. A, 732(0):237–240, 2013. <ce:title>Vienna Conference on Instrumentation 2013</ce:title>.
- [128] RENFORDT, RAINER: *pers. Komm.*, 2013.
- [129] AL-TURANY, M., BERTINI, D., KARABOWICZ, R., KRESAN, D., MALZACHER, P., STOCKMANN, T. und UHLIG, F.: *The FairRoot framework*. Journal of Physics: Conference Series, 396(2):022001, 2012.
- [130] BRUN, RENE und RADEMAKERS, FONS: *ROOT - An object orientated data analysis framework*. Nucl. Instr. Meth. A, 389(1–2):81–86, 1997.
- [131] BÖHMER, FELIX VALENTIN et al.: *First Measurement of dE/dx with a large GEM-based TPC*. Nucl. Instr. Meth. A, 2013.

-
- [132] RAUCH, JOHANNES: *Pattern recognition in a high-rate GEM-TPC*. Journal of Physics: Conference Series, 396(2):022042, 2012.
- [133] HÖPPNER, C., NEUBERT, S., KETZER, B. und PAUL, S.: *A Novel Generic Framework for Track Fitting in Complex Detector Systems*. Nucl. Instr. Meth. A, 620:518–525, 2010.

Danksagung

Eine solche Arbeit ist alleine nicht zu schaffen, daher möchte ich mich abschließend bei allen danken, die mir beim Gelingen dieser Doktorarbeit geholfen haben.

Ganz herzlich danke ich meinem Chef, Prof. Reinhard Beck. Er hat mir in den letzten Jahren die Möglichkeit gegeben, an diesem spannenden und vielfältigen Thema zu arbeiten und dadurch neue Erfahrungen und Einblicke zu bekommen.

Prof. Klaus Desch danke ich sehr für die Übernahme des Zweitgutachtens, ebenso wie Prof. Ulf-G. Meißner und PD Dr.-Ing. Axel Nothnagel als weiteren Mitgliedern meiner Promotionskommission.

Ein großer Dank geht an Bernhard Ketzer, Sverre Døerheim, Martin Berger, Felix Böhrmer und die anderen Kollegen der GEM-TPC-Kollaboration fürs Fördern und Fordern, schlaflose Nächte, frustrierende Tage und trotzdem jeder Menge Spaß in Genf, Darmstadt und Bonn.

Michael Lang, Dieter Walther, Christian Funke, Hans-Georg Zaunick und Bernd Voss haben mir bei zahlreichen technischen Fragen helfen können und hatten immer ein offenes Ohr für mich.

Meinen Zimmernachbarn Roman Schmitz und Martin Urban danke ich sehr für die gemeinsame Zeit und dass sie mich (und die Kaffeemaschine) so lange ertragen haben.

Christoph Brezina, Eric Gutz und Manuela Gottschall bin ich sehr dankbar für die vergossene rote Tinte und ihre hilfreichen Bemerkungen und Anregungen.

Den Kollegen der Arbeitsgruppe Beck / Thoma möchte ich für die nette Atmosphäre danken, in der das Arbeiten auch nach vielen Jahren noch Spaß machte und man jederzeit auch über Themen außerhalb der Physik reden kann.

Auf die Unterstützung meiner Familie und Freunde konnte ich mich immer verlassen, ebenso wie auf deren Ablenkung zur richtigen Zeit.

Mein größter Dank geht an meine Frau Christina: Für einfach Alles, vor allem aber für ihren Glauben an mich und ihre Geduld.

