



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

CHARAKTERISIERUNG DER RATENFESTIGKEIT VON WIDERSTANDSPLATTENZÄHLERN

DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des wissenschaftlichen Grades
Diplom-Physiker

Vorgelegt von

Richard Peschke

geboren am 24.03.1985 in Hannover

Institut für Strahlenphysik, Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf
Fachrichtung Physik
Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften
der Technischen Universität Dresden

im
August 2011

Abgabedatum : xx.08.2011

1. Gutachter Professor Dr. Burkhard Kämpfer
2. Gutachter Professor Dr. Michael Kobel

KURZFASSUNG

In dieser Diplomarbeit sollen die Eigenschaften neuartiger, im Helmholtz-Zentrum-Dresden-Rossendorf (HZDR) entwickelter "Keramik Widerstandsplatten-Zähler" (kurz CRPCs) untersucht werden. Die Arbeit teilt sich in zwei Bereiche. Zum einen sollen die Eigenschaften der Keramikplatten untersucht werden. Hierbei ist von besonderem Interesse, wie sich der Widerstand mit der Temperatur ändert und wie homogen der Widerstand über die gesamte Platte verteilt ist. Zum anderen sollen die Eigenschaften der Detektor-Prototypen untersucht werden. Hierzu stand der Elektronen-Beschleuniger ELBE vom HZDR zur Verfügung. An ELBE wurde eine Messvorrichtung verwendet, die es erlaubte, den Detektor mit einzelnen Elektronen zu beschießen. In der Theorie bietet diese Messvorrichtung eine ideale Möglichkeit, die Detektoreigenschaften zu bestimmen. In der Praxis haben sich dabei diverse Probleme offenbart, die es zu überwinden galt. Schlussendlich konnte allerdings ein in sich konsistentes Bild der Detektoren gezeichnet werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Widerstandsplattenzähler von $10 \times 10 \text{ cm}^2$ eine Ratenfestigkeit von mehreren $10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ aufweisen. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass diese Detektoren eine Zeitauflösung von unter 80 ps erreichen. Damit übertreffen die im Institut für Strahlenphysik entwickelten Detektoren die Anforderungen des CBM Projekts und sind weltweit die bisher ratenfestesten RPCs mit hoher Zeitauflösung.

ABSTRACT

In this Diploma thesis, the properties of a new kind "Ceramics Resistive Plate Chambers" (short CRPCs) developed at the Helmholtz-Zentrum-Dresden-Rossendorf (HZDR) shall be investigated. The thesis separates in two sections. In the first one the properties of the ceramic plates shall be investigated. Matter of particular interest is how does the resistivity change with the temperature and whether the resistivity is uniformly distributed over the entire plate. On the other hand the properties of the detector prototypes shall be investigated. For that purpose the electron accelerator ELBE at HZDR was at disposal. At ELBE a measurement setup was used that allows to irradiate the detector with single electrons. In the theory the measurement setup offers an ideal opportunity to investigate the detector properties. In practice many difficulties turned out. Eventually a consistent picture of the detector could be drawn. It could be shown that the RPCs of the size of $10 \times 10 \text{ cm}^2$ possess a rate capability of several $10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Furthermore it could be shown that these detectors achieve a time resolution below 80 ps. With this the detectors, developed at the institute of radiation physics exceed the requirements of the CBM Project. They represent the worldwide highest rate capable RPCs with high time resolution.

KURZFASSUNG	5
ABSTRACT	5
1. EINFÜHRUNG.....	9
2. RPC DETEKTOREN	10
2.1 ANFORDERUNGEN DER CBM FLUGZEITWAND	10
2.2 BEDEUTUNG DER RPC DETEKTOREN IN DER FORSCHUNG	11
2.3 WIRKUNGSPRINZIP VON RPC DETEKTOREN	11
2.4 AUFBAU DER UNTERSUCHTEN RPCS.....	13
3. WIDERSTANDSMESSUNG	15
3.1 AUFGABENSTELLUNG	15
3.2 MESSAUFBAU	15
3.3 MESSABLAUF	16
3.4 UNTERSUCHTE PROBEN	16
3.5 ERGEBNISSE	18
3.5.1 UNTERSCHIEDLICHE HERSTELLUNGSVERFAHREN	18
3.5.2 HOMOGENITÄT DER KERAMIKPLATTEN	19
4. MESSUNG AN ELBE	21
4.1 DER TEILCHENBESCHLEUNIGER ELBE.....	21
4.2 MESSAUFBAU	21
4.3 DATENANNAHME	22
4.4 UNTERSUCHTE PARAMETER	25
5. ANALYSE DER AN ELBE GESAMMELTEN DATEN	27
5.1 ANALYSEUMGEBUNG	27
5.2 RAUSCHEN	27
5.3 PULSHÖHENANALYSE	28
5.4 EFFIZIENZ ANALYSE.....	31
5.4.1 DEFINITION: "ZÄHLER-EFFIZIENZ"	31
5.4.2 "ZÄHLER-EFFIZIENZ" ALS FUNKTION DER BETRIEBSSPANNUNG ("ARBEITSKURVE")	31
5.4.3 GRENZEN DER "ZÄHLER EFFIZIENZ"	32
5.4.4 QUANTIFIZIERUNG DER VERUNREINIGUNG DES ELEKTRONENSTRAHLS	37
5.4.5 DEFINITION: "FILE-EFFIZIENZ"	41
5.4.6 EFFIZIENZ ALS FUNKTION DES FLUSSES	45
5.4.7 LADUNGSDEFINIERTER "FILE-EFFIZIENZ"	50
5.4.8 FILE EFFIZIENZ-KOMBINIERTER METHODE.....	53

5.4.9	QUANTITATIVE BESTIMMUNG DER RATENFESTIGKEIT	54
5.4.10	EXEMPLARISCHE VERBESSERUNG DER "FILE-EFFIZIENZ" DURCH VERWENDUNG DER SZINTILLATIONSDETEKTOREN.....	57
5.4.11	EFFIZIENZ ALS FUNKTION DER POSITION.....	60
5.4.12	AKTIVE BEREICHE.....	62
5.4.13	CROSSTALK, FOOTPRINT UND VIELTREFFER EREIGNISSE	67
5.4.14	ZUSAMMENFASSUNG.....	73
5.5	ZEITAUFLÖSUNG	76
5.5.1	ZEITSPEKTREN	76
5.5.2	KOMBINATION VON LINKER UND RECHTER SEITE.....	77
5.5.3	ZEIT-SIGNALLADUNGS-KORREKTUR ("WALK CORRECTION")	78
5.5.4	PULSHÖHENANALYSE.....	81
5.5.5	VERGLEICH DER ZEITAUFLÖSUNGEN	83
5.5.6	ZEITAUFLÖSUNG ALS FUNKTION DES FLUSSES.....	84
5.5.7	ZUSAMMENFASSUNG:	87
6.	<u>ZUSAMMENFASSUNG:</u>	<u>89</u>
7.	<u>ANHANG</u>	<u>91</u>
5.5	GRENZEN DER ZÄHLER EFFIZIENZ.....	91
5.6	FILE EFFIZIENZ ALS FUNKTION DES FLUSSES	91
6.	<u>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</u>	<u>98</u>
7.	<u>TABELLENVERZEICHNIS</u>	<u>100</u>
8.	<u>LITERATURVERZEICHNIS.....</u>	<u>100</u>

1. EINFÜHRUNG

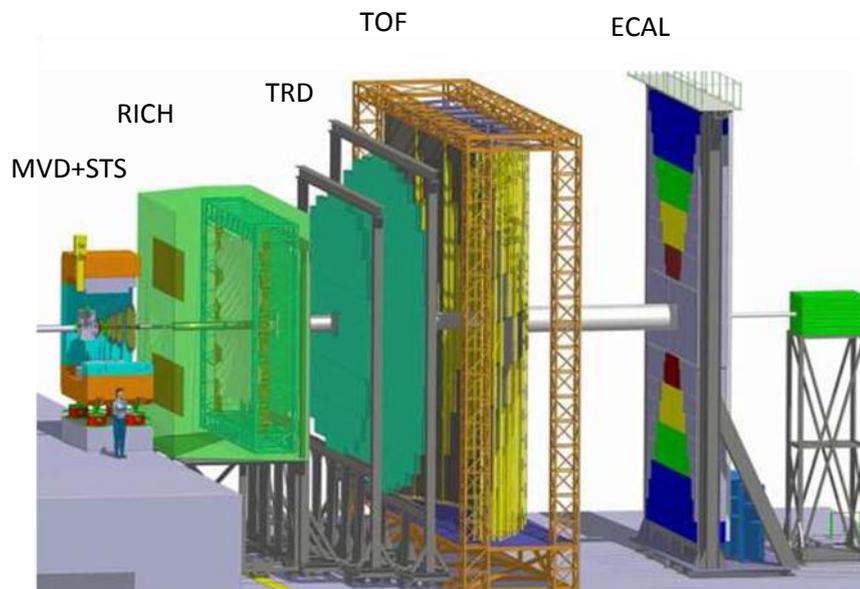


Abbildung 1: Aufbau des CBM-Detektors [1], der in fünf Segmente unterteilt ist. "Das Silicon Tracking System (STS) ist die zentrale Komponente des CBM Experiment. Es dient zur Spur- und Impulsmessung von geladenen Teilchen die am Target produziert werden. Zwischen Target und STS ermöglicht es ein Micro-Vertex-Detektor (MVD), Teilchenzerfall-Vertizes vom Ereignis-Vertex zu unterscheiden" [2]. "Der [Ring Imaging Cherenkov Detektor] RICH Detektor soll zur Elektronen Identifikation von niedrigsten Impulsen bis zu 10-12 GeV/c dienen..." [3]. Zur weiteren Identifikation der Teilchen dient der "Transition Radiation Detector" (TRD). Zur Hadronen Identifikation soll ein "Time Of Flight" (TOF) dienen. Zur Bestimmung der Teilchenenergie wird ein elektromagnetisches Kalorimeter (ECAL) eingesetzt.

Die Teilchenphysik stellt heute einen zentralen Bestandteil der Grundlagenforschung dar. Sie gestattet die Bedingungen wie sie in entfernten Sternen herrschen oder wie zu Beginn des Kosmos vorlagen, im Labormaßstab nachbilden. Dadurch ist es möglich, die grundlegenden Symmetrien der Materie im Universum zu untersuchen und fundamentale Erkenntnisse über das Universum als Ganzes zu gewinnen. Ein Experiment, welches dem Ziel gewidmet ist, die Kernmaterie unter besonderen Bedingungen zu untersuchen, ist das CBM (Compressed Baryonic Matter) Experiment an der zukünftigen Forschungseinrichtung FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research). Es widmet sich unter anderem der Suche nach: "in Medium Veränderungen von Hadronen in dichter Materie. Anzeichen für den deconfinement Phasenübergang bei hoher Baryonen-Dichte, ... sowie der Suche nach exotischen Materiezuständen, wie zum Beispiel Kondensate von 'strange' Teilchen" [4] in Schwerionenkollisionen mit Projektilenergien von 20 – 40 A GeV. Das CBM-Projekt befindet sich derzeit in einer fortgeschrittenen Planungsphase, in der die einzelnen Detektor-Komponenten des Systems optimiert werden sollen. Eine Komponente des CBM-Projekts ist die Flugzeitwand (engl. "Time Of Flight Wall" kurz TOF-wall) s. Abbildung 1. Diese soll zu Identifikation und Geschwindigkeitsmessung der einzelnen geladenen Hadronen verwendet werden. Da es sich bei CBM um ein Experiment mit festem Target im Labor handelt, bewegt sich das Schwerpunktsystem mit hoher Geschwindigkeit. Dies führt dazu, dass es in Vorwärtsrichtung des Detektors zu besonders hohen Teilchenflüssen kommt. Dies stellt an den TOF-wall besondere Herausforderungen im Bezug

2. RPC Detektoren

auf die Ratenfestigkeit. An der Meisterung dieser Herausforderungen wird in vielen Laboratorien weltweit gearbeitet. Vom Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf (HZDR) wurden in diesem Zusammenhang neuartige Keramik Widerstandsplattenzähler entwickelt. Die Charakterisierung dieser Detektoren ist die Aufgabenstellung dieser Arbeit

2. RPC DETEKTOREN

2.1 ANFORDERUNGEN DER CBM FLUGZEITWAND

Aufgrund der relativistischen Kinematik wird im CBM-Projekt mit hohen Teilchenflüssen in Vorwärtsrichtung zu rechnen sein. Simulationen ergeben, dass für die inneren Bereiche der TOF-wall Teilchenflüsse bis zu $\sim 25 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ erreicht werden [5]. Da der Teilchenfluss in den äußeren Bereichen des TOF-wall abnimmt, soll der TOF-wall, wie in Abbildung 2 gezeigt, aufgeteilt werden. Es ist zu erkennen, dass der TOF-wall aus 80 Segmente, sogenannten "Supermodulen", aufgebaut werden soll. Diese teilen sich nach Strahlenbelastung in 4 Gruppen auf. Da Standard Floatglass RPCs nur eine Ratenfestigkeit von $10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ erreichen, ist es notwendig, neuartige Detektoren zu entwickeln. Diese sollen unter anderem die folgenden Eigenschaften aufweisen: Effizienz $> 95\%$, Zeitauflösung $< 80 \text{ ps}$, Ratenfestigkeit $> 25 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ [5]. Im Folgenden soll gezeigt werden, dass die vom Institut für Strahlenphysik am HZDR entwickelten Keramik RPCs diesen Anforderungen genügen und sie teilweise sogar weit übertreffen.

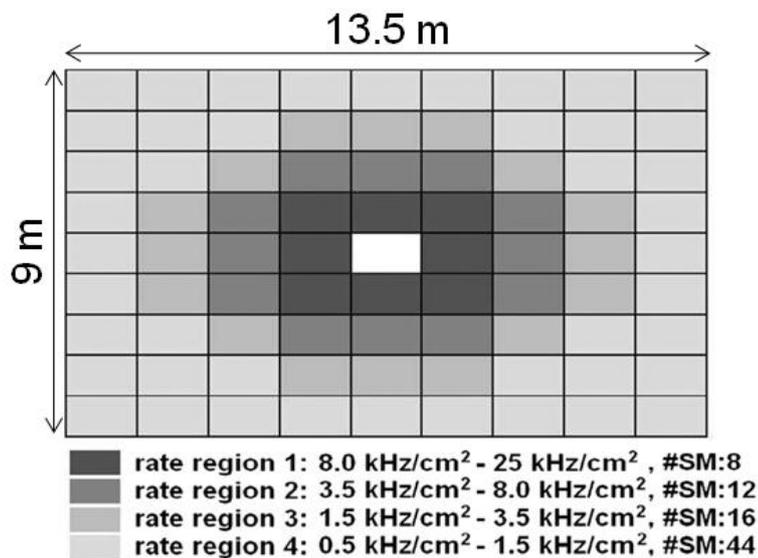


Abbildung 2: Erwartete Strahlenbelastung der 80 Supermodule der CBM-TOF-wall für Au+Au Kollisionen bei 25 A GeV. Aufgeteilt in Regionen mit ähnlichem Teilchenfluss, Quelle: [5]

2.2 BEDEUTUNG DER RPC DETEKTOREN IN DER FORSCHUNG

In der Forschung werden RPC Detektoren hauptsächlich zum Nachweis geladener Teilchen eingesetzt, da sie sich aufgrund ihres einfachen Designs für große Flächen eignen. Des Weiteren erreichen sie meist eine Effizienz von 98 %.

Klassische RPC Detektoren werden in der Forschung in zwei verschiedenen Bereichen eingesetzt. Zum einen als "Trigger Detektoren", deren Aufgabe darin besteht zu messen, ein Teilchen zu registrieren. Sie werden hauptsächlich aus Float Glas oder Bakelit hergestellt und haben Zeitauflösungen in der Größenordnung 1-2 ns und Ortsauflösungen von bis zu einigen Quadratmillimetern. Als typische Vertreter dieser Art können die RPCs im Myon System des ATLAS Detektors [6] am CERN genannt werden. Zum anderen werden RPCs auch als "Zeitauflösungsdetektoren" eingesetzt. Hierzu verwendet man Materialien wie Silicate Glas [7], Float Glas [8], oder leitendes Plastik [9]. Diese haben eine Zeitauflösung von weniger als 100 ps. Hierfür können als Beispiel die RPCs des FOPI [8] Detektors an dem GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung genannt werden. Der Nachteil von RPC Detektoren ist, dass sie mit zunehmendem Teilchenfluss stark an Effizienz verlieren. Es werden weltweit Anstrengungen unternommen, um diesen Effekt zu reduzieren und die Ratenfestigkeit zu erhöhen.

2.3 WIRKUNGSPRINZIP VON RPC DETEKTOREN

Das Prinzip eines RPC Detektors besteht aus einer mit Gas gefüllten Kammer, in der ein starkes homogenes elektrisches Feld herrscht. Fliegt ein geladenes Teilchen durch die Kammer, so wird das Gas entlang der Trajektorie ionisiert. Aufgrund des geringen Abstandes der Platten kommt es zur Bildung von nur wenigen Ion-Elektronen Paaren. Diese werden durch das starke elektrische Feld zu den Platten hin beschleunigt. Hierbei kommt es zu einer lawinenartigen Vervielfachung der Ladungsträger. Durch die Aufteilung der frei beweglichen Ladungsträger kommt es lokal zu einer Erniedrigung des elektrischen Feldes [10]. Dies kann an den Ausleseelektroden gemessen werden. Um die Lawine in ihrer Größe zu beschränken, sind zwischen Kathode und Anode isolierende Platten angebracht. Durch die isolierenden Platten wird verhindert, dass es zu einer "Streamer Entladung" kommt. Hierbei würde sich ein leitender Kanal zwischen den Elektroden ausbilden. Dieser hätte zur Folge, dass der Detektor an dieser Stelle für gewisse Zeit blind wäre. Dadurch wäre die Ratenfestigkeit sehr gering. Die höhere Ratenfestigkeit wird also auf Kosten der Signalhöhe erreicht. Aus diesem Grund müssen Signale eines RPC Detektors vorverstärkt werden, bevor sie von der Auswerteelektronik verarbeitet werden können.

2. RPC Detektoren

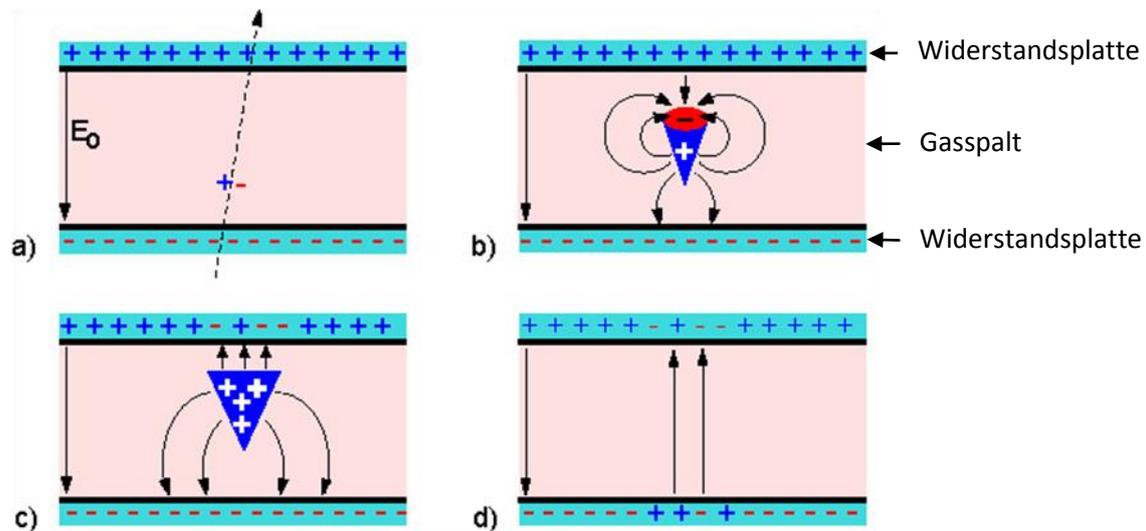


Abbildung 3: Gasionisation im Gasspalt eines RPC Detektors. "a) Gasionisation b) Lawinenentwicklung, Raumladungseffekte c) Ionendriftgeschwindigkeit langsamer d) Ladungen in den Elektrodenplatten beeinflussen elektrisches Feld" [11]

In Abbildung 3 ist der prinzipielle Ablauf einer Gasionisation im Gasspalt eines RPCs dargestellt. Der Ablauf lässt sich in vier Phasen unterteilen:

- Ein geladenes Teilchen fliegt durch den Detektor, und es kommt zu einer Gasionisation.
- Diese wird aufgrund des hohen elektrischen Feldes lawinenartig verstärkt. Dadurch kommt es zu einem Raumladungseffekt, der dem äußeren elektrischen Feld entgegenwirkt, wodurch sich die effektive Feldstärke im Inneren drastisch reduziert.
- Die Ionendriftgeschwindigkeit ist drei Größenordnungen langsamer als die von Elektronen, dadurch erreichen die Ionen die Elektroden später.
- Die Ladung sammelt sich auf den isolierenden Platten und fließt langsam über diese ab. Ist die Zeit, die für das Abfließen benötigte wird, größer als die Zeit zwischen 2 Lawinen so sammelt sich auf der isolierenden Platten eine Restladung, die zu einer Reduktion des elektrischen Feldes in dem Gasspalt führt. Dadurch wird die Gasverstärkung reduziert, wodurch die Signale kleiner werden und somit die Effizienz sowie die Zeitauflösung verschlechtert werden.

Die Ratenfestigkeit für gewöhnliche Glas RPCs liegt lediglich in der Größenordnung $25 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Die Ursache liegt in der in Anstrich d) beschriebenen Sammlung von Restladungen auf dem isolierenden Platten. Deswegen werden für moderne hochratenfeste RPCs neue Materialien gesucht, die einerseits einen deutlich niedrigeren Widerstand als Glas haben aber andererseits immer noch genug Widerstand bieten, um ein Durchlag zu verhindern. Zu den Neuentwicklungen gehören neben halbleitenden Gläsern auch keramische Materialien. Letztere sollen in dieser Arbeit behandelt werden. Eine weitere Eigenschaft von RPCs ist, dass aufgrund des konstanten elektrischen Feldes in dem Spalt die Größe der Lawine abhängig von der Position ist, an der die Ionisation stattfindet. Deswegen haben RPC Detektoren ein sehr breites Signalspektrum. Aus diesem Grund ist es praktisch nicht möglich, von der Signalgröße Rückschlüsse auf die Anzahl der Primärladungen zu schließen.

2.4 AUFBAU DER UNTERSUCHTEN RPCS

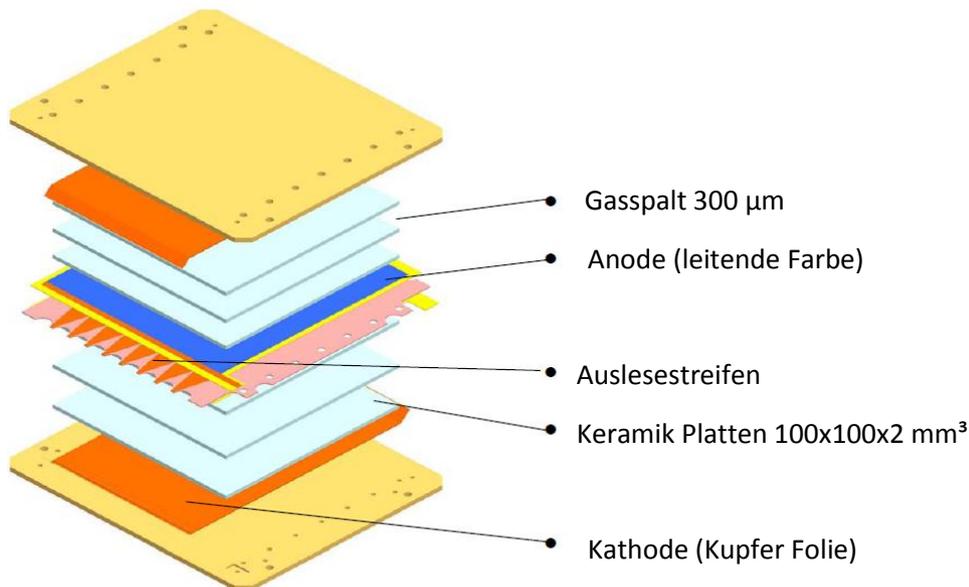


Abbildung 4: Schematischer Aufbau von CRPC1 und CRPC2 [12]

Im "Forschungszentrum Dresden Rossendorf", heute "Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf", wurden drei Prototypen des neuartigen "Keramik Widerstandsplatten Zähler" kurz CRPC (Ceramics Resistive Plate Chamber) gebaut. In Abbildung 4 ist der Aufbau der CRPCs dargestellt. Die unterschiedlichen Rossendorfer Modelle unterscheiden sich lediglich in der Größe und der Anzahl der Auslesestreifen. So hat der spätere CRPC4 eine aktive Fläche von 20x20cm² und 16 anstelle von 8 Auslesestreifen. Tabelle 1 gibt die Eigenschaften der untersuchten Detektoren wieder. Die Detektoren CRPC1 und CRPC2 unterscheiden sich hauptsächlich in der Oberflächenrauigkeit der isolierenden Platten. Der allgemeine Aufbau ist jedoch gleich.

Tabelle 1: Eigenschaften der untersuchten RPCs

Detektor	Aktive Fläche [cm ²]	Auslesestreifen	Streifenbreite [mm]	Oberflächenrauigkeit ¹ [nm]	Volumenwiderstand ² [Ω cm]
CRPC1	10×10	8	9	40	~10 ⁹
CRPC2	10×10	8	9	400	~10 ⁹
CRPC4	20×20	16	12\$??	400	~10 ¹⁰

¹ Oberflächenrauigkeit bezieht sich auf die Rauigkeit der Keramikplatten.

² Der Volumenwiderstand für CRPC4 wird im Laufe dieser Arbeit ermittelt. Die Werte für CRPC1 und 2 stammen aus [18].

2. RPC Detektoren

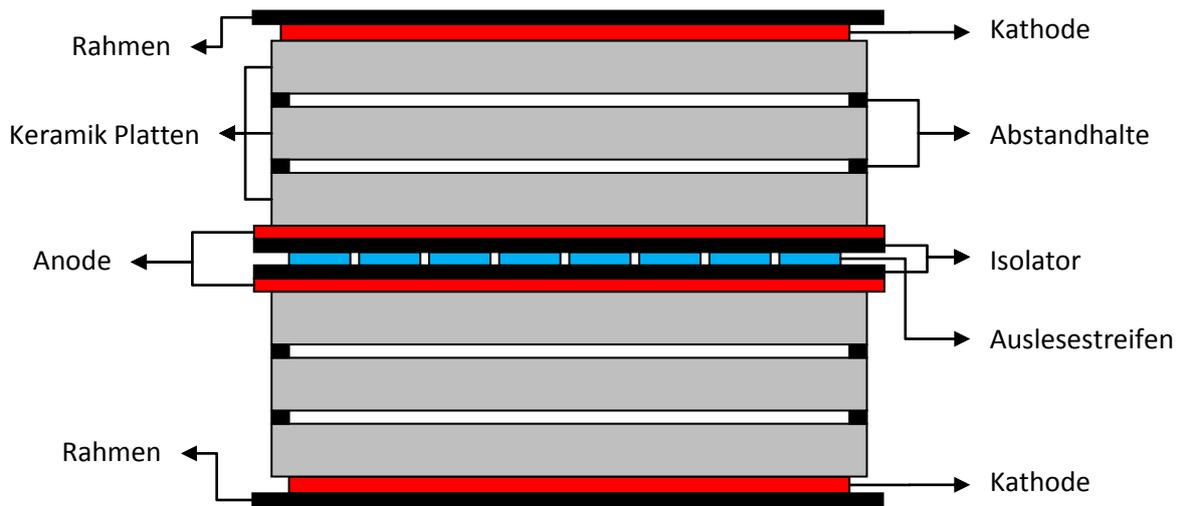


Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines CRPC Detektors mit 4 Gasspalten

Die Abbildung 5 zeigt einen Schnitt durch einen CRPC Detektor. Auf eine maßstabsgetreue Darstellung ist zugunsten höherer Übersichtlichkeit verzichtet worden. Im Vergleich mit Abbildung 3 ist zu erkennen, dass dieser Detektor vier Gasspalte hat. Dadurch erhöht sich die Signalhöhe und somit auch die Effizienz. Diesen Vorteil erkauft man sich mit einem höheren Materialbudget. Die Vorteile von größeren Signalen überwiegen aber deutlich die Nachteile. Zusätzlich ist zu erkennen, dass die Auslesestreifen von den Anoden getrennt sind. Dies bringt nach [13] eine Verbesserung der Signalhöhe um einen Faktor 2-3.

3. WIDERSTANDSMESSUNG

3.1 AUFGABENSTELLUNG

In diesem Teil soll die Beschaffenheit der isolierenden Keramikplatten untersucht werden. Im Besonderen soll gezeigt werden, wie die unterschiedlichen Herstellungsverfahren sich auf den Widerstand auswirken. Für die spätere Anwendung ist von großer Bedeutung, dass der Widerstand über die gesamte Platte konstant ist. Dies reduziert die möglichen Ursachen für Inhomogenitäten der Detektoreigenschaften. Desweiteren soll das Verhalten bei Erwärmung untersucht werden, da davon auszugehen ist, dass dies den Widerstand weiter reduziert. Im Fall der Glas-RPCs ist damit eine Verbesserung der Ratenfestigkeit erzielt worden. Dies ist im Bereich der Keramik-RPCs nicht geplant, da die Ratenfestigkeit ohnehin schon deutlich höher ist, als für aktuelle Projekte wie CBM benötigt wird. Der praktische Nutzen ist für den Moment darin zu sehen, dass die Platten auch bei höheren Temperaturen noch einen wenig veränderten Widerstand haben.

Aufgabenstellung:

1. Bestimmung des Widerstandes als Funktion der Temperatur
2. Prüfung der großen Platten auf Homogenität

3.2 MESSAUFBAU

Der Aufbau besteht aus 2 Elektroden, die in der Abbildung 6 als Messelektrode und Gegenelektrode bezeichnet sind. Diese sind unterhalb und oberhalb des Prüfkörpers angebracht und haben eine definierte Potentialdifferenz. Der Stromfluss wird mithilfe eines Picoamperemeters gemessen. Auf Abbildung 6 ist des Weiteren eine Ringelektrode zu erkennen. Diese hat die Aufgabe, Oberflächen- und Randströme abzufangen. Als Elektrodenmaterial wurde leitfähiger Gummi verwendet. Dieses hat den Vorteil, dass es nicht fest mit der Probe verbunden werden muss, und deswegen die Probe nicht verunreinigt wird. Hierbei handelt es sich um ein DIN zertifiziertes Prüfverfahren [14].

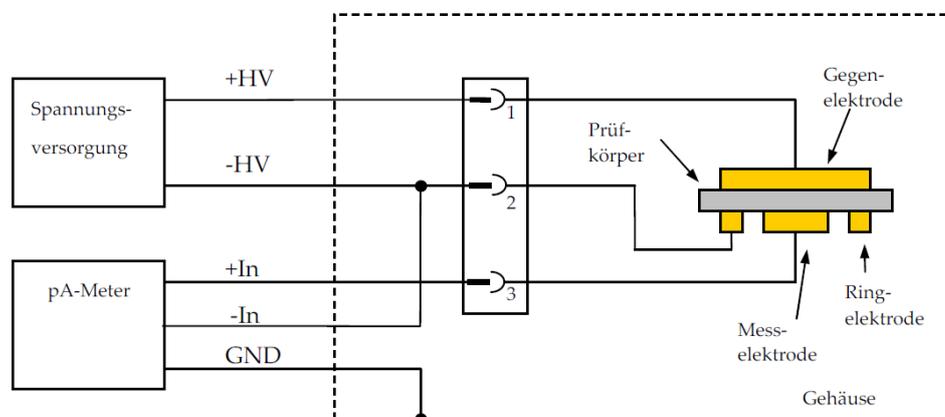


Abbildung 6: Schematischer Aufbau der Widerstandsmessvorrichtung [13]

3.3 MESSABLAUF

Da Bezüglich der elektrischen Eigenschaften die Keramikplatte nicht nur einen Widerstand besitzt, sondern auch eine Kapazität, muss die Einschwingzeit des Systems berücksichtigt werden. Für die Messungen wurde eine Messzeit von 600 s gewählt, von denen allerdings nur die letzten 400 s verwendet wurden. Damit sollte sichergestellt werden, dass die Aufladungseffekte keinen Einfluss auf den ermittelten Widerstand haben.

Zur Bestimmung der Temperatur stand ein elektronisches Thermometer zur Verfügung. Dieses war allerdings nicht direkt mit der Probe verbunden, sondern war freihängend im Ofen angebracht. Es ist nicht davon auszugehen, dass die Probe und das Thermometer immer auf gleicher Temperatur sind. Das hat zur Folge, dass keine kontinuierliche Messreihe genommen werden konnte, sondern es musste jede Temperatur einzeln eingestellt und gemessen werden. Die Wartezeit nach dem Einstellen der Temperatur wurde mit durchschnittlich zwei Stunden angesetzt. Nach dieser Zeit konnte sichergestellt werden, dass der Temperatursensor und die Probe auf gleicher Temperatur waren.

3.4 UNTERSUCHTE PROBEN

In Zusammenarbeit mit dem "Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS" wurde ein keramisches Material entwickelt, welches sich für die Verwendung in RPCs als besonders geeignet erwiesen hat. Bei der Keramik handelt es sich um einen Verbund von Siliciumcarbid³ (SiC) und Siliciumnitrid⁴ (Si₃N₄).

Siliciumcarbid ist eine chemische Verbindung aus Silicium und Kohlenstoff [15]. Mit einem Volumenwiderstand in der Größenordnung $10^4 \Omega \text{ cm}$ [13] bildet es den leitenden Teil der Verbundwerkstoffes. Bei SiC handelt es sich um ein Varistor-Material (von engl. „**variable resistor**“), das bedeutet, dass der Widerstand mit zunehmender Spannung sinkt. Diese Eigenschaft bleibt auch im Verbund erhalten.

Siliciumnitrid ist eine chemische Verbindung aus Silicium und Stickstoff [16] und hat einen Volumenwiderstand zwischen 10^{11} und $10^{12} \Omega \text{ cm}$ [13]. Damit ist es der isolierende Teil des Verbundwerkstoffes. Siliciumnitrid wird aufgrund seiner außergewöhnlichen Festigkeit für Hochleistungslager verwendet [17]. Dies eröffnet für die Zukunft die Möglichkeit, besonders dünne Platten herzustellen, da im späteren Betrieb praktisch keine mechanischen Kräfte mehr auf die Platten wirken. Dies hätte den Vorteil, dass Material eingespart werden könnte, was die Detektoren kostengünstiger machen würde.

Im Verbundwerkstoff lässt sich der Volumenwiderstand über das Mischungsverhältnis der Komponenten einstellen. In *Abbildung 7* ist zu erkennen, dass es möglich ist, den Volumenwiderstand zwischen 10^7 und $10^{12} \Omega \text{ cm}$ einzustellen. Desweiteren ist zu erkennen, dass der Volumenwiderstand

³ Die Schreibweise ist nicht eindeutig. Es finden sich folgende andere Schreibweisen und Bezeichnungen: Siliziumcarbid, Siliziumkarbid und Karborund

⁴ Auch Siliziumnitrid

exponentiell vom Mischungsverhältnis abhängt. Deswegen ist es sehr schwierig, große Platten mit einer ausreichenden Homogenität herzustellen.

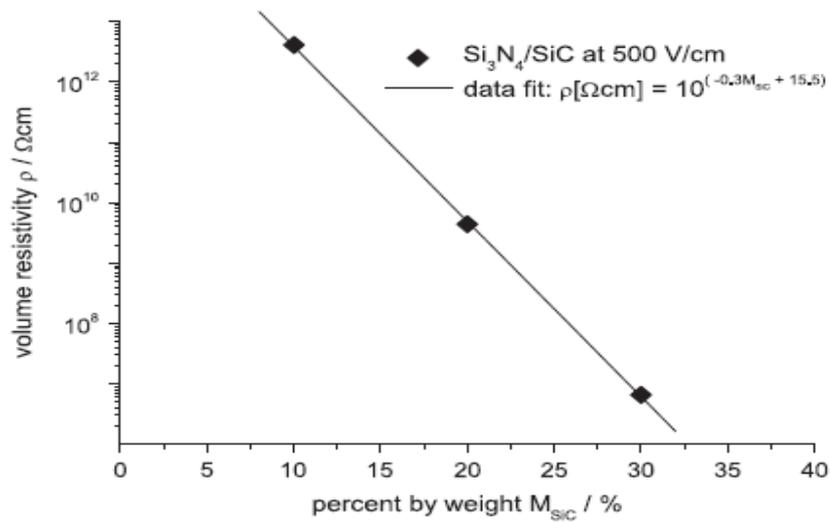


Abbildung 7: Zitat: "Volumenwiderstand als Funktion des SiC Anteils in Gewichtsprozent. Die Messungen wurden an Proben mit einer Diagonalen von 3 cm gemessen. Die Proben haben den vollen Fertigungsprozess durchlaufen." [18]

3. Widerstandsmessung

3.5 ERGEBNISSE

3.5.1 UNTERSCHIEDLICHE HERSTELLUNGSVERFAHREN

Wie Abbildung 8 zu entnehmen ist, ist das Temperaturverhalten der Keramikproben exponentiell und wird mit der folgenden Formel approximiert:

$$R(T) = R_0 \cdot e^{-a \cdot T} \quad (1)$$

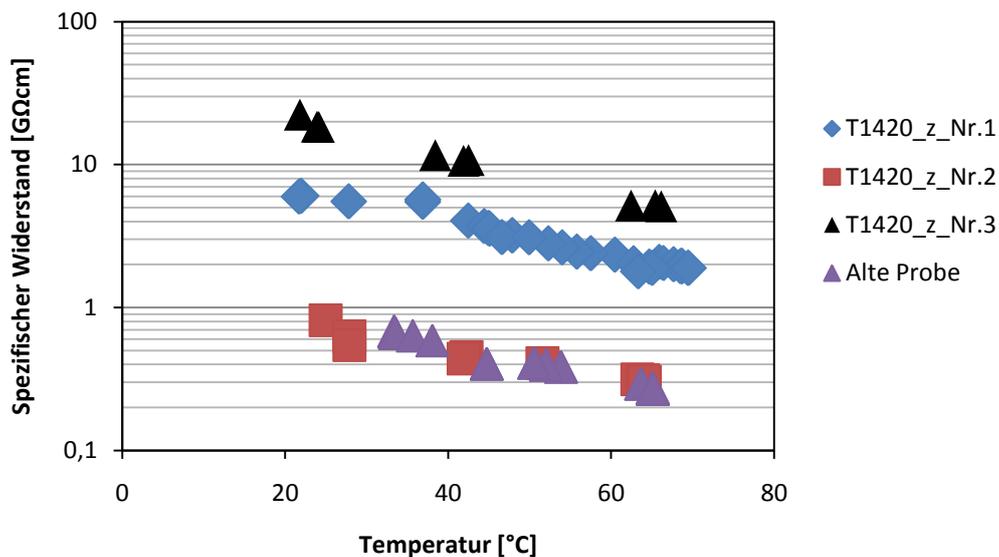


Abbildung 8: Temperaturverhalten des spezifischen Widerstandes von ausgewählten Proben

Aus Tabelle 2 ist zu entnehmen, dass das Ausheizen der Proben zu einer deutlichen Erhöhung des Widerstandes führt. Dies ist durch das Verbrennen des Kohlenstoffs zu erklären.

Tabelle 2: Eigenschaften der Keramikproben

Material	$R_0=R(T=0^\circ\text{C})$ in $\text{G}\Omega\text{cm}$ (extrapoliert)	a in $\text{G}\Omega\text{cm}/^\circ\text{C}$	Besonderheiten der Proben
Probe 1	13,15	0,0279	Bei niedriger Temperatur ausgeheizt
Probe 2	1,45	0,0248	Nicht ausgeheizt
Probe 3	48,26	0,0334	Bei hoher Temperatur ausgeheizt
Vergleichs Probe	1,78	0,0242	In CRPC1 und CRPC2 verwendet

3.5.2 HOMOGENITÄT DER KERAMIKPLATTEN

Anfangs war es bei den Keramikplatten nicht möglich, den Volumenwiderstand zu bestimmen, da dieser sich im Laufe der Zeit um mehrere Größenordnungen geändert hat. In Abbildung 9 ist zu erkennen, dass die Probe einen gewissen Aufladungseffekt zeigt. Die genaue Herkunft dieses Effektes ist unverstanden. Es wird angenommen, dass es sich dabei entweder um ein kapazitives Aufladen oder um eine Art von Ladungsträgerverarmung durch Stromfluss handelt, ähnlich wie bei einem p-n-Übergang einer Diode, nur mit dem Unterschied, dass die Verarmung hier unipolar ist (siehe Abbildung 9 rechts). Es konnte eine Lösung für das Problem gefunden werden. Diese bestand darin, die Proben in einem Ultraschallbad zu reinigen und anschließend bei 100°C mehrere Stunden auszuheizen. Dieses Verfahren wird derzeit für alle neuen Platten angewendet.

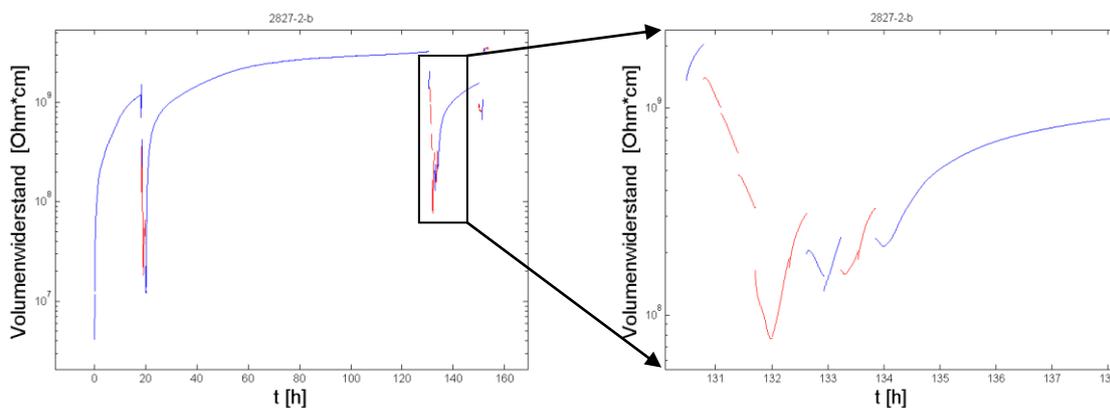


Abbildung 9: Zeitverhalten der Probe 2827-2-b. Blaue Linien repräsentieren Messungen mit $U = +100$ V, rote Linien mit $U = -100$ V

Keramikplatte 2827-2:

In diesem Teil der Auswertung sollte die Homogenität überprüft werden. Dazu wurde der Volumenwiderstand an verschiedenen Punkten auf der Probe gemessen. Der Abbildung 10 ist zu entnehmen, dass die untersuchte Platte 2827-2 einen mittleren Volumenwiderstand von $(4,3 \pm 1,0) \cdot 10^9 \Omega \text{ cm}$ hat.

Im weiteren Verlauf wurden 29 solcher Keramikplatten untersucht. Zur Bestimmung der Homogenität wurden jeweils an den Ecken zwei Messungen durchgeführt⁵. In Abbildung 11 ist zu erkennen, dass der Mittelwert des Volumenwiderstandes für die Platten 1-29 als konstant angesehen werden kann. Die Abweichungen innerhalb einer Platte können aber mehr als eine Größenordnung betragen. Es wurde darauf verzichtet, die Standardabweichung anzugeben, da pro Platte lediglich 4 Messpunkte mit je 2 Messungen aufgenommen wurden. Stattdessen sind die Fehlerbalken in Abbildung 11 durch den maximalen bzw. minimalen Messwert bestimmt.

⁵ Die Messungen wurden von meinem Kollegen Alejandro Laso durchgeführt.

3. Widerstandsmessung

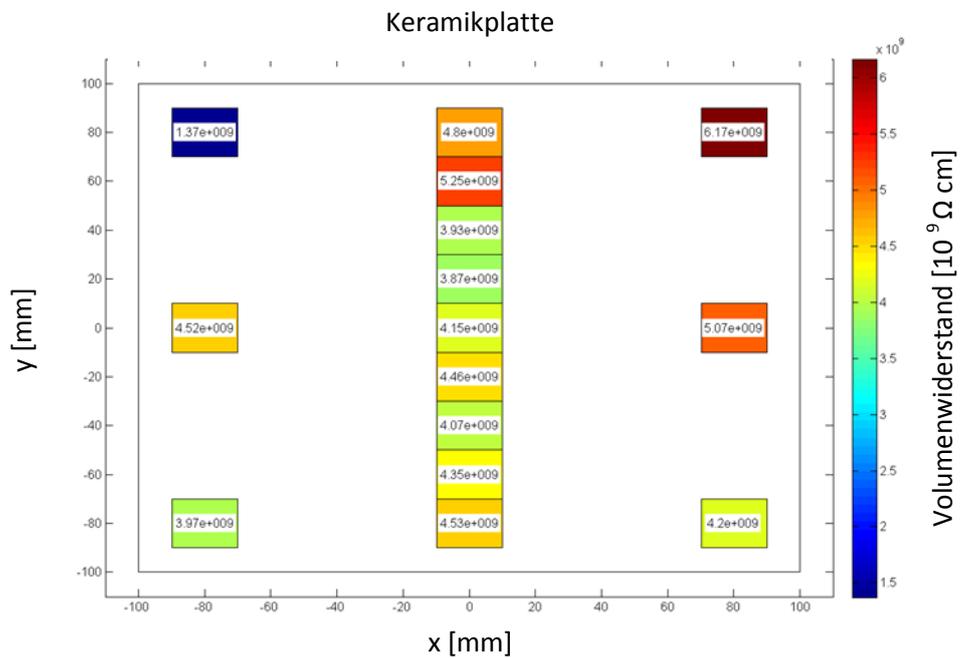


Abbildung 10: Homogenität der Keramikplatte 2827-2

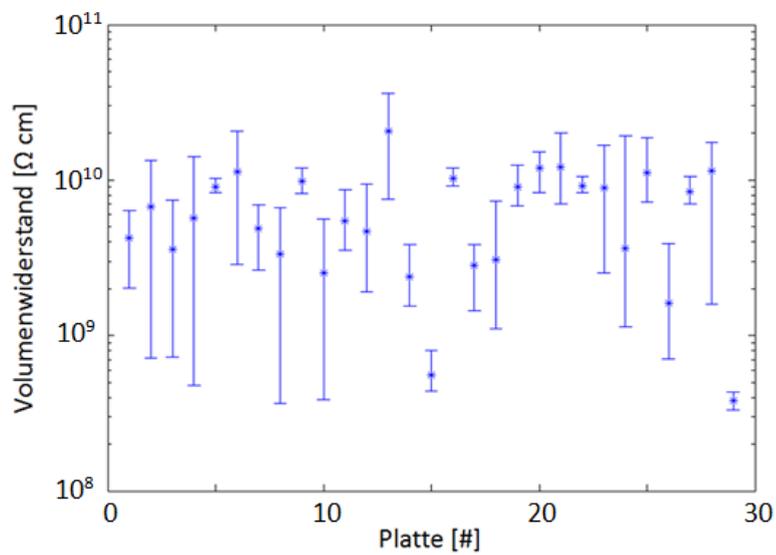


Abbildung 11: Der Volumenwiderstand der untersuchten Keramikplatten. Die Fehlerbalken sind durch die jeweils maximalen bzw. minimalen Werte bestimmt.

4. MESSUNG AN ELBE

4.1 DER TEILCHENBESCHLEUNIGER ELBE

Das Akronym ELBE steht für "Elektronen Linearbeschleuniger für Strahlen hoher Brillanz und niedriger Emittanz". ELBE liefert einen Elektronenstrahl mit bis zu 40 MeV pro Elektron. Bei Elektronen dieser Energie handelt es sich um minimalionisierende Teilchen, das heißt Elektronen dieser Energie geben den geringsten Energieeintrag im Detektor. Deswegen sind minimalionisierende Teilchen von allen geladenen Teilchen am aufwändigsten nachzuweisen. Aus diesem Grund eignen sie sich gut, um die Effizienz von Detektoren zu bestimmen.

Für die Untersuchung der Detektoren stand ein sogenannter "Einzelelektronenstrahl" zur Verfügung. Bei diesem wurde der Elektronenstrahl so stark verdünnt, dass nur noch ein Bruchteil der Pakete gefüllt sind. Die verbleibenden Pakete bestehen, in den meisten Fällen⁶, nur aus einem Elektron. Auf diese Weise lässt sich die Elektronenrate des Beschleunigers von 1 bis 10^6 s^{-1} einstellen. Als Referenzzeit für die Bestimmung der Zeitauflösung dient die "Radio-Frequency" (kurz RF) des ELBE Beschleunigers. Die Paketlänge beträgt 5 ps. Bei der Konvertierung und Digitalisierung verschlechtert sich die Genauigkeit allerdings auf 40-60 ps.

4.2 MESSAUFBAU

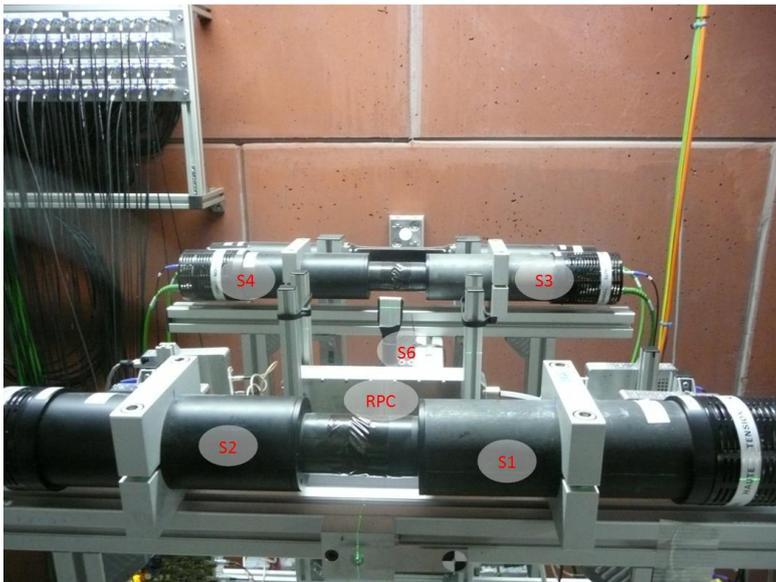


Abbildung 12: Messaufbau zum RPC-Test an ELBE

Im Folgenden soll der Messaufbau an ELBE skizziert werden. In Abbildung 12 ist eine Fotografie des Messaufbaus zu sehen. Dabei sind die vorderen und hinteren Szintillationsdetektoren (S1, S2, und S3,

⁶ In Kapitel 5.4.4 folgt die Quantifizierung der Verunreinigung.

4. Messung an ELBE

S4) zu erkennen. Diese werden in Koinzidenz betrieben und definieren das "Elektron ging durch RPC Signal" kurz "S". Dieses Signal besteht nur aus einem Bruchteil der Elektronen, die auf den RPC auftreffen, da ein geringer Raumwinkel von den zwei Szintillationsdetektoren abgedeckt wird. Gerade deshalb eignet sich das Signal gut als Referenzsignal. Es ist davon auszugehen, dass, abgesehen von den Randbereichen, die Elektronen auch wirklich durch den Detektor geflogen sind und sich auf diese Art die wirkliche Effizienz des Detektors bestimmen lässt. In Abbildung 12 ist der RPC Detektor aus dem Strahl geschoben worden. Dies dient der Übersichtlichkeit, dadurch waren die Szintillationsdetektoren hinter und über dem RPC zu sehen. In der Abbildung 13 ist der Aufbau schematisch dargestellt. Der Detektor S5 dient zur Bestimmung des Strahlprofils.

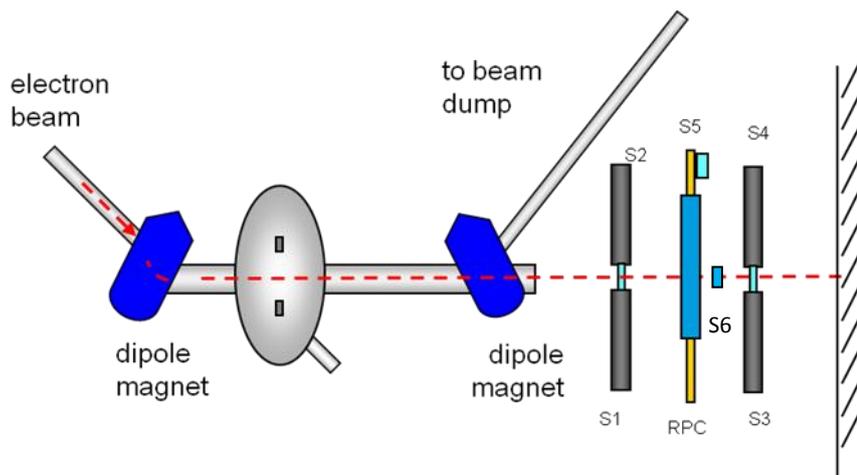


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Messaufbaus [13]

4.3 DATENANNAHME

Die Datenannahme (englisch "Data acquisition" kurz "DAQ") besteht in diesem Experiment aus zwei Teilen. Zum einen werden Zählraten der Detektoren und logischer Verknüpfungen protokolliert, zum anderen werden Zeit- und Ladungsinformationen von einzelnen Ereignissen erfasst.

Zuerst soll sich der Bestimmung der Zählraten gewidmet werden. Für die spätere Auswertung werden fünf Signale verwendet:

S1	Ein Photovervielfacher des Szintillators vor dem RPC
OR1	logisches OR eines Vorverstärkers des RPCs
OR	Logisches OR aller Vorverstärker des RPCs
S=S12346	Logisches UND der Szintillationsdetektoren vor und hinter dem RPC (kurz S)
S&OR	Logisches UND zwischen S&OR
RF	Radio-Frequenz von ELBE

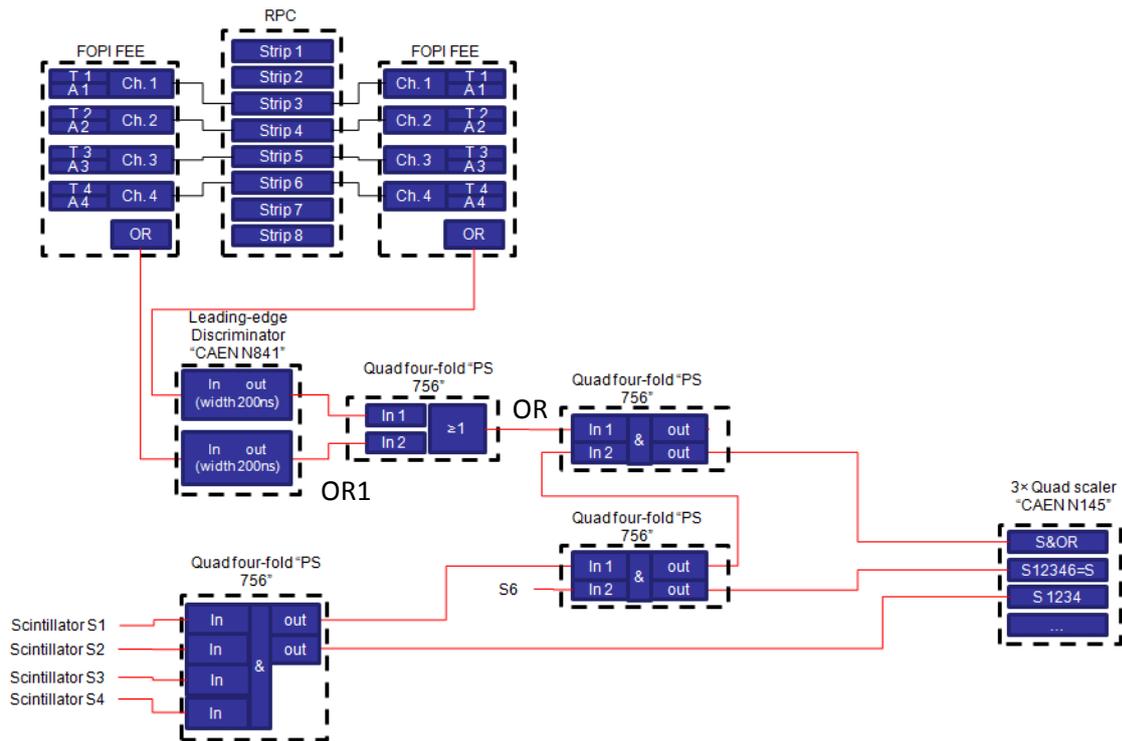


Abbildung 14: Logik-Verkabelung

In Abbildung 14 ist die Logik-Verkabelung des Messaufbaus zu sehen. Abbildung 14 ist nicht vollständig: es wurde die Verkabelung der analogen und digitalen FOPI front end elektronik (FEE) Kanäle zur DAQ wegelassen, um das Bild nicht unnötig zu überladen. Die Idee hinter der Verkabelung ist, dass man eine statistische Stichprobe von Signalen bekommt, bei denen sichergestellt ist, dass das untersuchte Elektron durch den RPC geflogen ist. Diese Signale bilden die Grundlage für die Auswertung, da zum einen nur solche Ereignisse wegeschrieben werden, die ein gültiges S=S12346 Signal haben. Zum anderen erfolgt die Bestimmung der Effizienz über die Koinzidenz von S und OR. Für die Effizienzbestimmung ist es wichtig, explizit darauf hinzuweisen, dass die Signallänge, die an den leading-edge discriminatoren der RPC Vorverstärker erzeugt wird, eine Länge von 200 ns hat. Zusätzlich mit der Signallänge des S Signals von 50 ns ergibt sich damit eine maximale Überlagerungslänge von 250 ns. Damit ergibt sich eine periodische maximale Zählrate von $4 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$. Bei allen Zählraten in der Größenordnung $4 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ kann nicht mehr davon ausgegangen werden, dass alle Ereignisse sauber zu trennen sind. Dieser Effekt kann bei nicht periodischen Zählraten bereits bei niedrigeren Raten eintreten. Als Rechenbeispiel soll der Einzelelektronenmodus von ELBE dienen. Dieser hat eine Beschleunigungsfrequenz von 13 MHz. Das bedeutet, dass alle 77 ns ein Paket ankommt. Aus der Länge des OR Signals von 200 ns ergibt sich, dass theoretisch ein bis zwei vorangegangene Signale zu dem Signal S&OR beitragen können. Damit ergibt sich bereits bei einer Elektronenrate von $1,3 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ eine statistische Verunreinigung von ca. 10 %. Die Quantifizierung der Verunreinigung erfolgt im Abschnitt 5.4.4.

4. Messung an ELBE

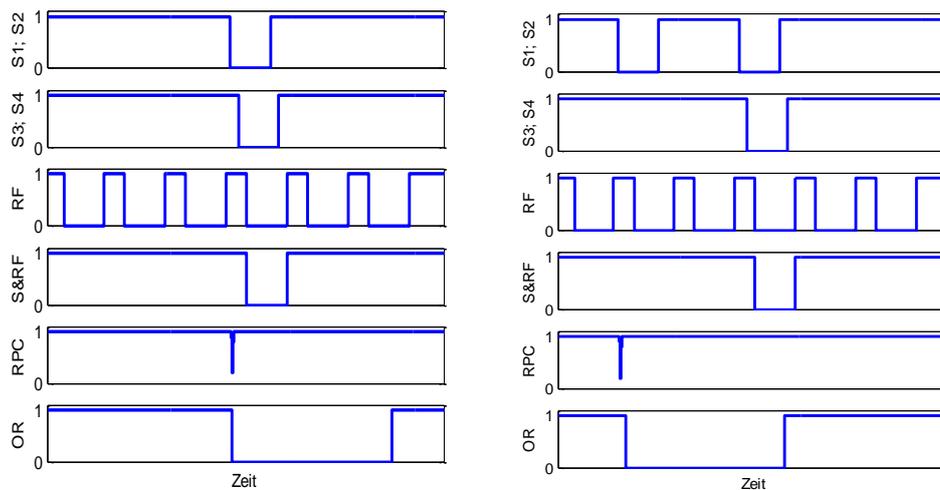


Abbildung 15: Trigger-Logik. Links: gültiges Ereignis, bei dem es kein Vor-Trigger-Ereignis gab. Rechts: ungültiges Ereignis, bei dem das OR Signal noch wegen des vorangegangenen Elektrons geschaltet war. Das Signal S&RF startet den TDC. Die abfallende Kannte ist in idealisierter Form identisch mit der des RF Signals. In der Praxis ist das Signal aber durch die endliche Verarbeitungsdauer des Logikelements verzögert. (negative Logik)

Die linke Seite der Abbildung 15 zeigt ein gültiges Ereignis. Die Detektoren S1 S2 S3 S4 (und S6) haben das Elektron registriert und geben zusammen das S Signal. In Abbildung 15 ist S&RF eingezeichnet. Hierbei handelt es sich um eine logische Verknüpfung zwischen S und RF, wobei darauf geachtet wurde, dass die zeitbestimmende Flanke die des RF Signal ist. Dieses Signal dient als Trigger für den TDC. Des Weiteren ist das RPC Signal dargestellt. Hierbei handelt es sich um das analoge Signal des RPC Detektors. Dieses löst das OR Signal aus und das Ereignis wird korrekterweise als positives Ereignis gewertet.

In der rechten Seite der Abbildung 15 ist zu erkennen, dass 2 Ereignisse in S1, S2 registriert wurden. Der Detektor hinter dem RPC hat allerdings nur das zweite Ereignis gesehen. Die Ereignisse, die von beiden Detektoren gesehen werden definieren die Stichprobe. Im Idealfall sollen die anderen ignoriert werden. In diesem Beispiel hat der RPC nur das erste Elektron registriert. Aufgrund der Länge des OR Signals kommt es aber trotzdem zu einer Überlagerung von S&OR und in Folge dessen wird das Ereignis als positives Ereignis registriert.

Das Erfassen der Einzelereignisse erfolgt mit den folgenden Modulen:

QDC: CAEN V965 [19]

TDC: V1290N [20]

Highlights:

- 16 Auslesekanäle
- Zwei Wertebereiche: 0-100 fC und 0-900 fC
- 12 bit Auflösung
- 25 fC pro QDC-Kanal bzw. 200 fC

Highlights:

- 16 Auslesekanäle
- 21 bit Auflösung
- 25 ps pro TDC-Kanal
- 52 μ s Wertebereich

Als Startauslöser für den TDC diente eine Verknüpfung aus S&RF Signal. Um die Genauigkeit weiter zu erhöhen wird in jedem TDC zusätzlich das RF Signal weggeschrieben. Vor der eigentlichen Auswertung wird von jedem Signal zuerst das RF Signal abgezogen.

4.4 UNTERSUCHTE PARAMETER

Für die spätere Anwendung des Detektors ist die Kenntnis der folgenden Eigenschaft essentiell:

- Rauschen
- Effizienz
- Zeitauflösung
- Clustergröße
- Aktive Bereiche

Die Größen können, von den folgenden Parametern abhängen:

- Teilchenfluss
- Betriebsspannung
- Position des Elektronenstrahls auf dem Detektor

Im Folgenden soll nun eine Definition der untersuchten Größen stattfinden:

1. Teilchenfluss:

Der Teilchenfluss wird über die Zählrate des Detektors $S1$ sowie über die bestrahlte Fläche des RPC mit der folgenden Formel bestimmt:

$$Fluss = \frac{S1}{\frac{\pi}{4} \cdot FWHM_x \cdot FWHM_y} \approx \frac{S1}{5 \text{ cm}^2} \quad (2)$$

$FWHM_{x,y}$ bezeichnen hier die Halbwertsbreiten der Horizontalen (x) und vertikalen (y) Intensitätsverteilung auf Höhe des RPC. Diese wurden mit einem separaten kleinflächigen, beweglich angebrachten Szintillationsdetektor (Durchmesser 1 cm) bestimmt. An dieser Stelle ist es wichtig zu betonen, dass nicht der gesamte Detektor, sondern nur ein Bereich von der Größe $FWHM_x$ und $FWHM_y$, bestrahlt wurde. Die Begriffe "Fluss" und "Teilchenfluss" werden, da Verwechslungen ausgeschlossen sind, synonym verwendet.

2. Betriebsspannung und elektrische Feldstärke:

Tabelle 3: Elektrische Feldstärke als Funktion der Betriebsspannung

Betriebsspannung [kV]	E-Feld [kV/cm]
5,8	95
6,0	98
6,2	101
6,4	103
6,5	104

4. Messung an ELBE

Die Betriebsspannung bezeichnet die Potentialdifferenz zwischen Kathode und Anode. Hieraus errechnet sich die für Vergleichbarkeit mit anderen RPCs wichtige elektrische Feldstärke in den Gasspalten des Detektors. Die Umrechnung ist in Tabelle 3 angegeben.

3. Position:

Der RPC war auf einem ferngesteuerten Tisch montiert. Dieser konnte millimetergenau in horizontaler sowie vertikaler Richtung verstellt werden. In der hier verwendeten Definition wird mit "Position" die Lage der Strahlachse auf dem RPC bezeichnet. Dazu wird das Koordinatensystem in die Mitte des RPC gelegt. Die x Werte werden größer, je weiter sich der Strahl aus Strahlrichtung nach rechts bewegt. Die y Werte werden größer, je weiter sich der Strahl nach oben bewegt.

4. Zeitauflösung:

Als Zeitauflösung wird, solange es nicht explizit angegeben wird, immer die 1σ Abweichung eines Gauß-Fits des TDC Spektrums verwendet. Es werden verschiedene Filter auf die Daten angewendet. Diese werden immer angegeben oder werden aus den Indizes ersichtlich.

5. Cluster Größe:

Als Cluster Größe wird das arithmetische Mittel über die Anzahl der Streifen, die gleichzeitig ein gültiges Zeitsignal haben, definiert.

6. Rauschen:

Bei der Definition des Rauschens ist es wichtig zu betonen, dass es zwei verschiedene Quellen für das Rauschen gibt. Zum einen das wirkliche Rauschen des Detektors. Hierbei handelt es sich um zufällige Ionisationen in Gasraum, die zu einer Lawine und folglich zu einem Signal am Ausgang führen. Zum anderen gibt es das "Rauschen" von ELBE. Hierbei handelt es sich um Elektronen, die von ELBE emittiert werden und den RPC treffen, ohne dabei die Koinzidenz auszulösen. Es handelt sich im eigentlichen Sinne nicht um Rauschen, sondern um echte Ereignisse, die lediglich von der Logik nicht ausgewählt wurden, weil ihre Flugbahn nicht durch die Koinzidenzdetektoren ging. Dieses "Rauschen" liefert keinerlei zusätzliche Information, da es sich dabei nicht um eine Eigenschaft des Detektors handelt. Es erscheinen lediglich im Abstand von 77 ns gehäuft Ereignisse im TDC, die gewissermaßen als Duplikate des Hauptpeaks zu sehen sind. Das Rauschen im Allgemeinen führt zu einer Verschlechterung der Statistik. Da es im Moment lediglich möglich ist, einen Wert pro Ereignis zu speichern, liefert die DAQ jeweils nur den letzten Wert und ist somit für alle Ereignisse davor blind. Für niedrige Flüsse ist der Verlust an Statistik praktisch bedeutungslos, für hohe Flüsse dagegen nicht vernachlässigbar. Dies wird im Abschnitt 5.4.5 beschrieben.

7. Ratenfestigkeit:

Die Ratenfestigkeit eines Detektors lässt sich nach [5] über zwei kritische Flüsse bestimmen. Zum einen den Fluss, bei dem die Effizienz um 5 % abgesunken ist, zum anderen den Fluss, bei dem die Zeitauflösung sich um 20 ps verschlechtert hat. Erstere wird in dieser Arbeit mit "Ratenfestigkeit der Effizienz" bezeichnet, letztere mit "Ratenfestigkeit der Zeitauflösung".

5. ANALYSE DER AN ELBE GESAMMELTEN DATEN

5.1 ANALYSEUMGEBUNG

Während der 4 Strahlzeiten zum RPC-Test an ELBE wurden mehr als 300 Einzelmessungen gemacht. Die Anzahl der Messungen zeigt die Notwendigkeit effizienter Analyseprogramme. Hierzu wurde in der Programmiersprache "MATLAB" eine Analyseumgebung geschaffen, mit der sowohl die Untersuchung einzelner Messungen wie auch die Analyse kompletter Messreihen möglich ist.

5.2 RAUSCHEN

Da nicht für alle Betriebsspannungen und Detektoren Messungen ohne Elektronenstrahl durchgeführt wurden, musste das Rauschen des Detektors aus den vorhandenen Daten extrapoliert werden. Hierzu diente zum einen das Signal S1 des Szintillationsdetektors zum anderen das OR1 Signal des RPCs. Das S1 Signal dient zur Bestimmung des Teilchenflusses. Das RPC-OR1 Signal liefert die Zählrate einer Seite des RPC Detektors. Da, insbesondere für niedrige Flüsse, die Abweichung zwischen linker und rechter Seite nur im Prozentbereich liegt, ist die Verwendung einer Seite ausreichend.

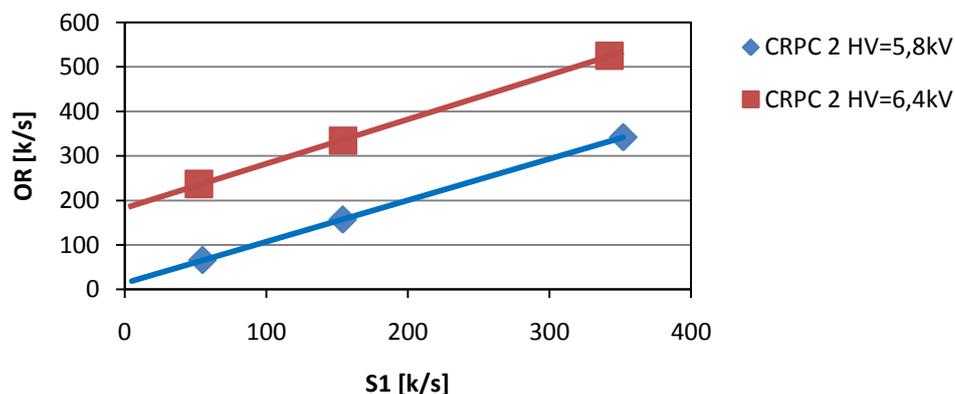


Abbildung 16: RPC-OR als Funktion von S1. Der Schnittpunkt mit der y-Achse gibt die Stärke des Rauschens an

In Abbildung 16 ist zu erkennen, wie für zwei Betriebsspannungen das Rauschen ermittelt wird. Im Laufe der Arbeit wird sich zeigen, dass das OR Signal in Sättigung gerät. Aus diesem Grund wird nur ein Bruchteil der Messreihe verwendet, um das Rauschen zu schätzen. In Tabelle 4 ist der Vergleich zwischen dem direkt gemessenem Rauschen und dem extrapoliertem Rauschen dargestellt. Es ist zu

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

erkennen, dass das extrapolierte Rauschen das gemessene Rauschen um $\sim 24\%$ überschätzt. Bei der Aufbereitung der Daten für die Abbildung 17 wurde diese Abweichung korrigiert.

Tabelle 4: Vergleich zwischen gemessenem Rauschen und dem extrapolierten Rauschen

Detektor und Betriebsspannung	Rauschen (direkt gemessen)	Rauschen (extrapoliert)
CRPC1, HV = 5,8 kV	$8,6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$	$11 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$
CRPC1, HV = 6,0 kV	$17 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$	$19 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$
CRPC2, HV = 6,0 kV	$45 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$	$59 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$

Um eine bessere Vergleichbarkeit zu schaffen, wird das Rauschen auf die Detektorfläche normiert.

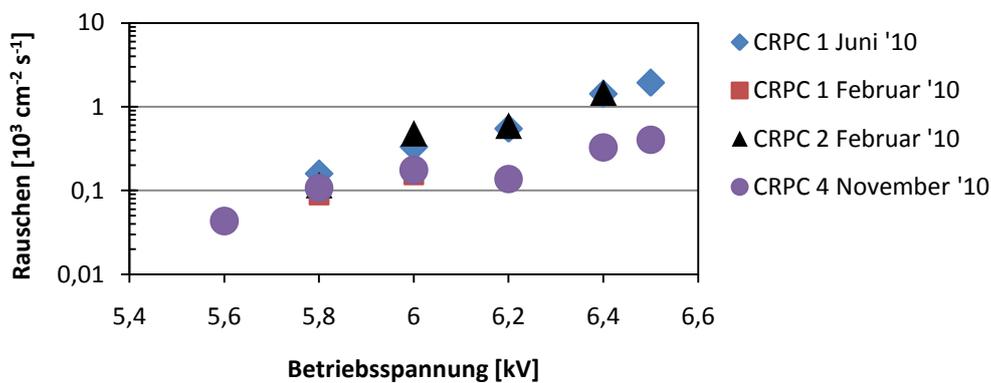


Abbildung 17: Rauschen der untersuchten Detektoren

In Abbildung 17 ist erkennen, dass das Rauschen exponentiell mit der Betriebsspannung zunimmt. Des Weiteren ist zu erkennen, dass sich CRPC1 und CRPC2 praktisch gleich verhalten. Lediglich CRPC4 zeigt deutlich weniger Rauschen. Dies wird mit dem höheren Widerstand der großen Keramikplatten erklärt.

5.3 PULSHÖHENANALYSE

Zum Verständnis dieser Methode ist es wichtig, sich zu vergegenwärtigen, dass Signale im RPC über die gesamte Dicke des Gasspalts entstehen können. Als Folge dessen haben sie abhängig von der Position, an der die Lawine, entsteht unterschiedliche Größen. Daher ist es sehr unpraktikabel, eine konstante Schwelle einzusetzen. So eine Schwelle hätte immer zur Folge, dass man Effizienz verliert und trotzdem nicht die gewünschte Wirkung erreicht. Deswegen ist es sinnvoller, die Struktur der Signale genauer zu untersuchen. In Abbildung 18 ist zu erkennen, dass die Verteilung von Signalen und Rauschen deutlich unterschiedlich ist, aber dennoch nicht genutzt werden kann, um eindeutig zwischen Signalen und Rauschen zu unterscheiden. Es bleibt folglich nur die Möglichkeit, die Signale miteinander zu vergleichen.

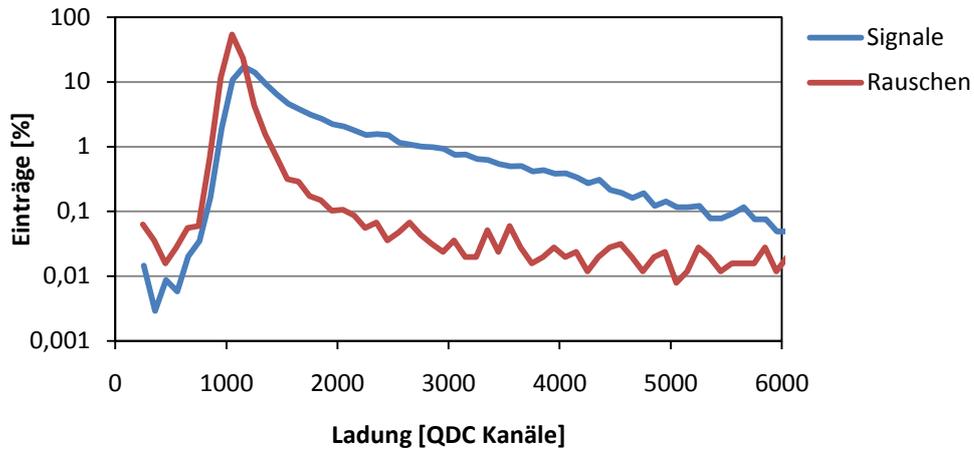


Abbildung 18: Vergleich der Ladungsinformation von Signalen und Rauschen für Streifen 3 des CRPC1 bei einer Betriebsspannung von 6,2 kV und einem Teilchenfluss von $2 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

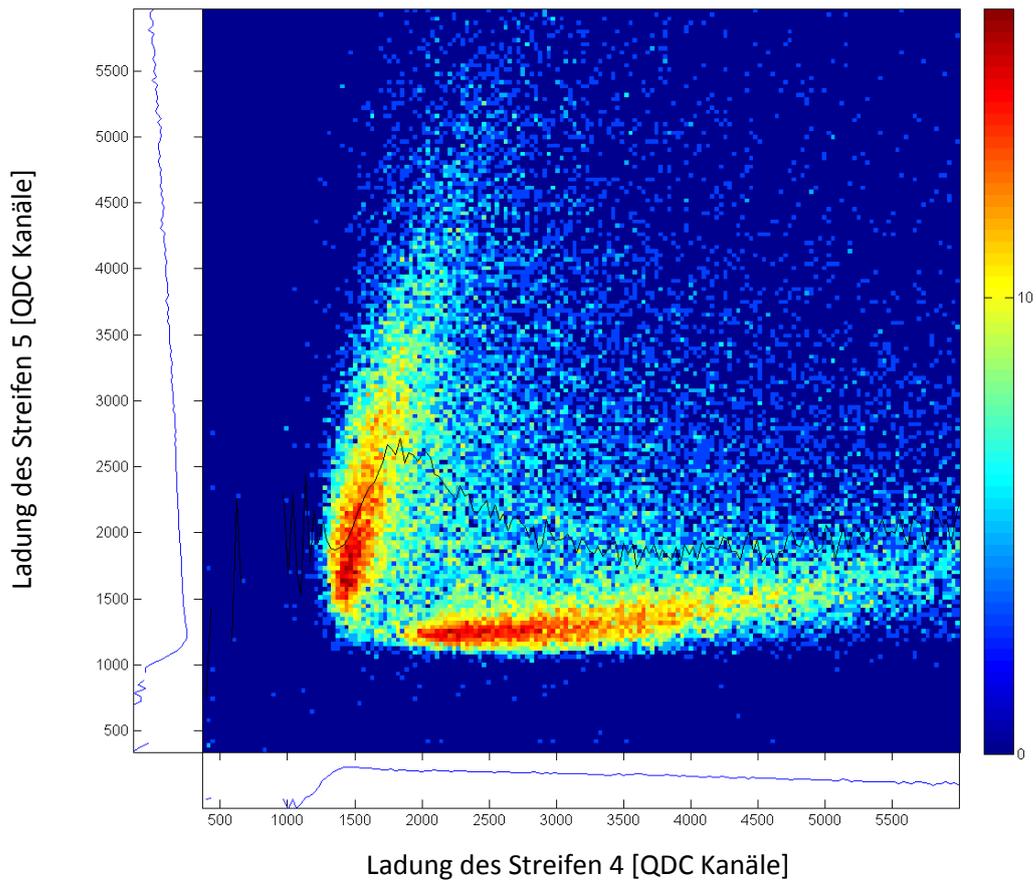


Abbildung 19: Verteilung der Ladungen zwischen zwei benachbarten Streifen des CRPC1 bei einer Betriebsspannung von 6,2 kV und einem Teilchenfluss von $2 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

In Abbildung 19 fällt auf, dass der Ladungseintrag eine klare Struktur aufweist. Die naheliegende Idee ist, die Signale einfach nach ihrer Größe aufzuteilen. Dieser Ansatz ist im Prinzip richtig, es gilt jedoch folgendes zu beachten:

1. jedes Signal besitzt einen konstanten Offset: das sogenannte "Pedestal",
2. die genaue Signalverstärkung ist nicht bekannt.

Zur Lösung dieser Probleme wurde das Rauschen als Referenzsignal verwendet. Es ist davon auszugehen, dass das Rauschen nichts mit den eigentlichen Signalen zu tun hat und somit unabhängig von der Streifenposition immer die gleiche Struktur aufweisen wird. Jede Abweichung ist lediglich ein Artefakt der Elektronik. Mit der Formel

$$Ladung_{normiert} = (Ladung - Mittelwert) \cdot \frac{400}{Standardabweichung} + 1000 \quad (3)$$

wurden alle Streifen auf eine Skala normiert. Dabei sind die Zahlen 400 und 1000 willkürlich gewählt. Es sollte lediglich verhindert werden, dass das Ladungssignal negativ wird. Für die weitere Auswertung sind die genauen Zahlenwerte unwichtig. Die so normierten Signale können nun verglichen werden. Als Ergebnis erhält man eine eindeutige Zuordnung der einzelnen Ereignisse zu jeweils einem Streifen. Da es sich dabei lediglich um eine Zuordnung handelt, geht keine Effizienz verloren. Es kann im schlimmsten Fall sein, dass ein Ereignis dem falschen Streifen zugeordnet wird. Die Vieltreffer Fähigkeit des Detektors bleibt natürlich unbeeinflusst, da es für das Verfahren wichtig ist, davon auszugehen, dass in dem jeweils untersuchten Bereich es nur ein Primäreignis gegeben hat. Die Güte dieses Verfahrens kann man gut daran erkennen, wie stark es den sensitiven Bereich auf den nominellen Wert reduziert.

5.4 EFFIZIENZANALYSE

Im folgenden Teil wird untersucht, wie die Effizienz von den weiter oben genannten Parametern abhängt.

5.4.1 DEFINITION: "ZÄHLER-EFFIZIENZ"

Die "Zähler Effizienz" gibt das Verhältnis der in den Koinzidenzdetektoren und dem RPC gemessenen Ereignissen zu den nur in den Koinzidenzdetektoren gemessenen Ereignissen an. Als Definition wird verwendet

$$\text{Effizienz} = \frac{[S1 \& S2 \& S3 \& S4] \& RPC}{[S1 \& S2 \& S3 \& S4]} = \frac{\text{Koinzidenzdetektoren} \& RPC}{\text{Koinzidenzdetektoren}} \quad (4)$$

Bei dieser Definition werden aus der Gesamtmenge an Ereignissen nur solche herausgegriffen, bei denen sichergestellt ist, dass das Elektron auch wirklich durch den Detektor gegangen ist. Dieses Vorgehen ist damit gerechtfertigt, dass es für den RPC keinen Unterschied macht, ob das Elektron bereits im Szintillationsdetektor nachgewiesen wurde oder nicht. Deswegen ist die Stichprobe repräsentativ⁷, und die Schlussfolgerung auf die Grundgesamtheit ist gerechtfertigt.

In diesem Zusammenhang ist das RPC Signal so definiert, dass es reicht, dass mindestens ein Streifen auf mindestens einer Seite ein Signal liefert. Die Definition des RPC Signals ist nicht optimal und ist hauptsächlich der Praxis geschuldet, in der nur eine begrenzte Menge Logikgatter zur Verfügung standen. Da es sowohl für die Zeitauflösung als auch für die Ortsauflösung wichtig ist, dass ein Streifen an beiden Seiten ein gültiges Signal gibt, sollte die Definition der Effizienz in zukünftigen Versuchen diesem Bedürfnissen Rechnung tragen. Im Folgenden wird noch ein weiterer Effizienz-Begriff auftauchen. Dieser wird sich auf die gültigen Signale in den Daten-Files beziehen und wird dann mit File-Effizienz bezeichnet. In dem Zusammenhang wird von der hier definierten Effizienz als Zähler-Effizienz gesprochen und bezieht sich darauf, dass diese Effizienz mit den Zählern ermittelt wurde.

5.4.2 "ZÄHLER-EFFIZIENZ" ALS FUNKTION DER BETRIEBSSPANNUNG ("ARBEITSKURVE")

In Abbildung 20 ist zu erkennen, dass die Detektoren ab einer Betriebsspannung von 5,8 kV ein Plateau erreichen. Es ist zu erkennen, dass der Anfang des Plateaus von dem Teilchenfluss abhängt. Die erreichte Effizienz bleibt aber gleich mit nahezu 100%.

⁷ Die Repräsentativitätsbedingung ist so lange erfüllt, wie es nicht möglich ist, dass Elektronen zwar durch die Koinzidenzdetektoren fliegen, nicht aber durch den RPC. Wir werden sehen, dass am Rand des RPC diese Bedingung nicht mehr erfüllt ist und deswegen die Aussagekraft dieser Definition eingeschränkt wird.

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

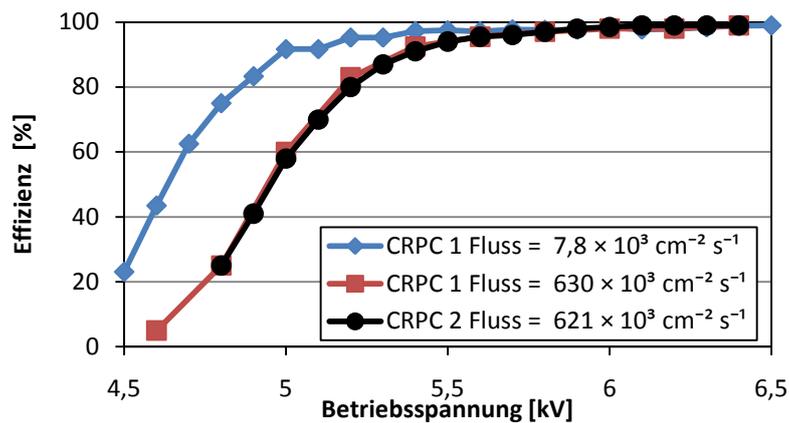


Abbildung 20: Arbeitskurven der Detektoren CRPC1 und 2

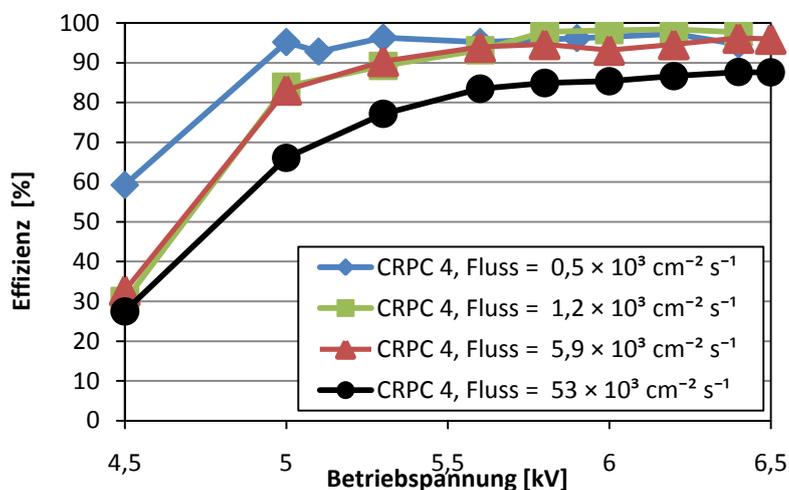


Abbildung 21: Arbeitskurve des Detektors CRPC4 für verschiedene Teilchenflüsse

In Abbildung 21 ist zu erkennen, dass auch die Effizienz von CRPC4 ab einer Betriebsspannung von 5,8 kV ein Plateau erreicht. Die Höhe dieses Plateaus ist allerdings vom Teilchenfluss abhängig.

5.4.3 GRENZEN DER "ZÄHLER-EFFIZIENZ"

Die Annahme in diesem Kapitel ist, dass jedes Elektron, welches im Sensor S1 registriert wird, auch durch den RPC fliegen sollte. Diese Annahme lässt sich mit dem Strahlprofil begründen, das eine Halbwertsbreite in x und y Richtung von je 2 cm hat. Da an der Stelle des Szintillators weder das Strahlprofil bekannt ist noch davon auszugehen ist, dass alle Teilchen durch den Szintillator fliegen, ist damit zu rechnen, dass die Zählrate im RPC größer ist als im Sensor S1. Als weitere Unsicherheit kommt das Rauschen der beiden Detektoren dazu.

Zur Modellierung des Verhaltens der Detektoren wird eine lineare Abhängigkeit angenommen. Diese hat die zwei Konstanten, die Effizienz und das Rauschen. Es wird davon ausgegangen, dass sowohl das Rauschen als auch die Effizienz nicht vom Fluss abhängen. So ergeben sich die beiden Gleichungen:

$$S1 = \varepsilon_{S1} \times \dot{T} + \text{Rauschen}_{S1}, \quad (5)$$

$$RPC = \varepsilon_{RPC} \times \dot{T} + \text{Rauschen}_{RPC} \quad (6)$$

mit den Bezeichnungen:

S1	Zählrate des Sensors S1
ε_{S1}	Effizienz des Sensors S1 (beinhaltet auch Geometriefaktoren)
Rauschen_{S1}	Rauschen des Sensors S1
RPC	Zählrate des RPCs
ε_{RPC}	Effizienz des RPCs (beinhaltet auch Geometriefaktoren)
Rauschen_{RPC}	Rauschen des RPCs
\dot{T}	Teilchen pro Sekunde

Damit ergibt sich

$$RPC = \frac{\varepsilon_{RPC}}{\varepsilon_{S1}} \times S1 + \text{Rauschen}_{RPC} - \frac{\varepsilon_{RPC}}{\varepsilon_{S1}} \times \text{Rauschen}_{S1} \quad (10)$$

$$RPC = \varepsilon \times S1 + R \quad (7)$$

mit:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{RPC}}{\varepsilon_{S1}}, \quad (8)$$

$$R = R_{RPC} - \varepsilon \cdot R_{S1}. \quad (9)$$

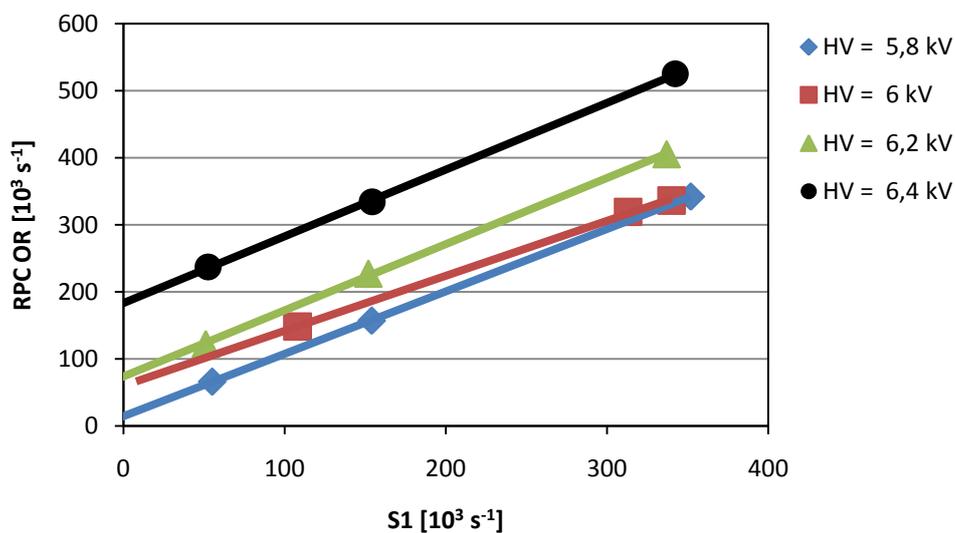


Abbildung 22: Zählrate des CRPC2 (nur eine Seite) gegen Zählrate S1

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

In Abbildung 22 ist zu erkennen, dass der Verlauf, zumindest für Flüsse $< 2 \times 10^5 / (\text{cm}^2 \text{s})$, sich durch eine lineare Abhängigkeit beschreiben lässt. In der Tabelle 5 sind, für die verschiedenen Betriebsspannungen, die Fit-Parameter angegeben. Die Abbildung für CRPC1 befindet sich im Anhang.

Tabelle 5: FIT Parameter

Betriebsspannung [kV]	CRPC1		CRPC2	
	ϵ	R [$10^3/\text{s}$]	ϵ	R [$10^3/\text{s}$]
5,8	0,92	19,7	0,87	24,1
6,0	0,91	41,1	0,81	60,5
6,2	0,91	61,2	0,91	86,5
6,4	0,86	176,8	0,91	196,6
6,5	0,92	240,5	-	-
Mittelwert	0,90	-	0,88	-

Es fällt auf, dass die Pseudoeffizienz ϵ für CRPC1 unabhängig von der Spannung immer im Bereich 91 - 92 % liegt mit einer Ausnahme bei HV = 6.4 kV. Für CRPC2 liegt der Wert etwas niedriger und scheint auch von der Betriebsspannung abzuhängen. Dieser Vergleich dient nicht der quantitativen Bestimmung von Parametern, sondern soll lediglich einen Trend aufzeigen. Wichtig an dieser Stelle ist, dass man für Teilchenflüsse $< 2 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ das Verhältnis der Zählraten mit einer Geraden approximieren kann und dass die Steigung (die Pseudoeffizienz) in der Größenordnung 1 ist. Für größere Zählraten ändert sich das Bild dramatisch

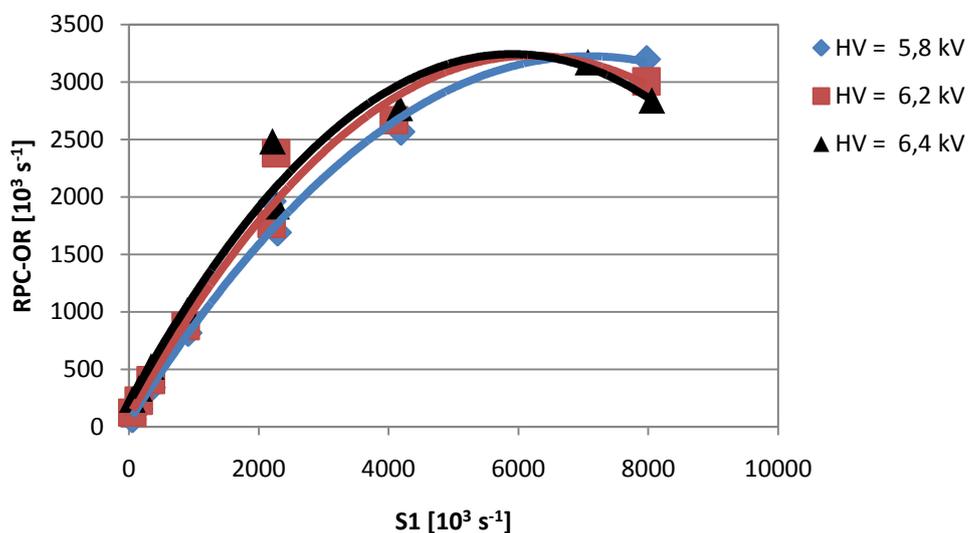


Abbildung 23: Zählrate des CRPC2 (nur eine Seite) gegen Zählrate S1

In Abbildung 23 ist zu erkennen, wie die Zählrate für den CRPC2 bei hohen Zählraten auf S1 von $3 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ in die Sättigung gerät. Dies kann mehrere Ursachen haben: zum einen die Abnahme der Effizienz, zum anderen sich überlappende Einzelimpulse. Die wahrscheinlichste Erklärung ist, mit Vorwegnahme der Ergebnisse aus den nächsten Kapiteln, eine Kombination aus beiden Ursachen, wobei das Ineinanderlaufen der Einzelimpulse den für den Verlauf von Abbildung 23 entscheidenden

Einfluss hat. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Länge des CRPC-OR Signals 200 ns ist. Damit ist die maximale Zählrate auf $5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ beschränkt. Da die Signal-Elektronen nicht kontinuierlich im Abstand von 200 ns ankommen, ist nicht davon auszugehen, dass die maximale Zählrate erreicht werden kann. Es scheint viel mehr, als würde sich eine maximale Zählrate von $3 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ einstellen.

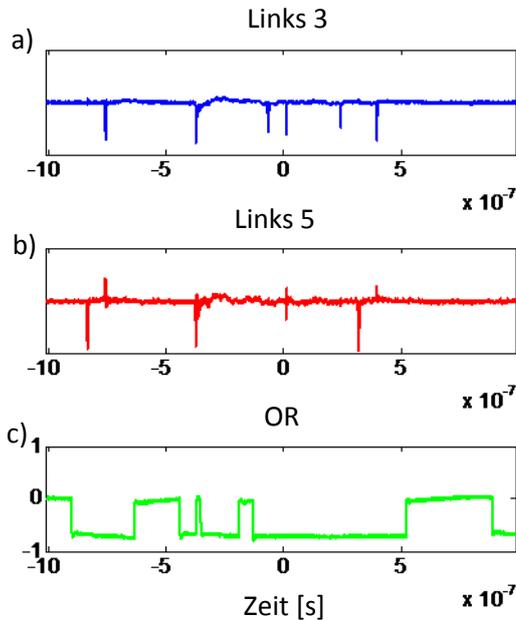


Abbildung 24: Analogsignale des CRPC1 bei einem Teilchenfluss von $4 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. a) Signal des Streifens 3 von der linken Seite des RPCs. b) Signal des Streifens 5 von der linken Seite des RPCs. c) OR Signal des RPCs (negative Logik)

Betrachtet man die analogen Signale im Oszilloskop wird dieser Effekt besonders deutlich. In Abbildung 24 ist zu erkennen, dass bei hohen Flüssen das OR Signal mehrere Ereignisse der RPCs überdeckt. Des Weiteren ist zu erkennen, dass das OR Signal sich durch weitere Signale des RPC verlängert. Im Extremfall ist das OR Signal nur noch geschaltet und hat keine Aussage mehr.

Eine weitere Möglichkeit, die Grenzen der Zählereffizienzen auszutesten, ist, die Anzahl der zufälligen Koinzidenzen zu untersuchen. Die zufällige Koinzidenz soll dazu verwendet werden, die Güte der Zähler-Effizienz zu bestimmen. Die Grundüberlegung ist: wie häufig tritt eine Koinzidenz zwischen S und einem verzögerten RPC Signal auf. Im Idealfall sollte es keine Koinzidenz geben. In der Praxis sieht es aber so aus, dass der Detektor selber rauscht, wodurch es zu zufälligen Koinzidenzen kommen kann. Desweiteren besteht die Möglichkeit, dass der Detektor von einem Elektron getroffen wurde, welches nicht durch alle Szintillationsdetektoren geflogen ist. Letztere Ereignisse sind kein Rauschen sondern wirkliche Signale. Problematisch sind diese Signale lediglich deshalb, weil die Signalbreite des RPC Signals so groß ist, dass durchaus mehrere Elektronen zu einer einzigen Koinzidenz führen können. Zur Bestimmung der zufälligen Koinzidenz wird das RPC Signal so stark verzögert, dass es nicht mehr in Zusammenhang mit dem Trigger steht. Wichtig ist zu betonen, dass es nicht egal ist, welches Signal man verzögert. Würde man das S Signal verzögern, so hätte man immer das Problem, dass jede Koinzidenz immer noch zum eigentlichen Trigger gehören kann, da der RPC durchaus Nachtrigger-Eigenschaften zeigt. Verzögert man das RPC Signal dagegen, findet die

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

Koinzidenz vor dem eigentlichen Trigger statt und kann deswegen nicht in Verbindung zum Trigger gebracht werden. Die zufällige Koinzidenz ist mit definiert als

$$\text{zufällige Koinzidenz} = \frac{S \& (\text{verzögertes RPC Signal})}{S} \quad (11)$$

In Abbildung 25 ist deutlich zu erkennen, dass für hohen Teilchenfluss es praktisch unmöglich ist, irgendeine Aussage zu machen. Es sei an dieser Stelle nochmals erwähnt, dass nicht das Rauschen des Detektors so stark zunimmt, sondern dass es immer wahrscheinlicher wird, dass vor dem untersuchten Ereignis bereits ein Elektron durch den Detektor geflogen ist. Dies ist nur deswegen ein Problem, weil die Signalbreite des RPC Signals so groß ist, dass mehrere Elektronen als ein Ereignis gewertet werden können. Damit gibt Abbildung 25 einen Anhaltspunkt der Unsicherheit der Zählereffizienz.

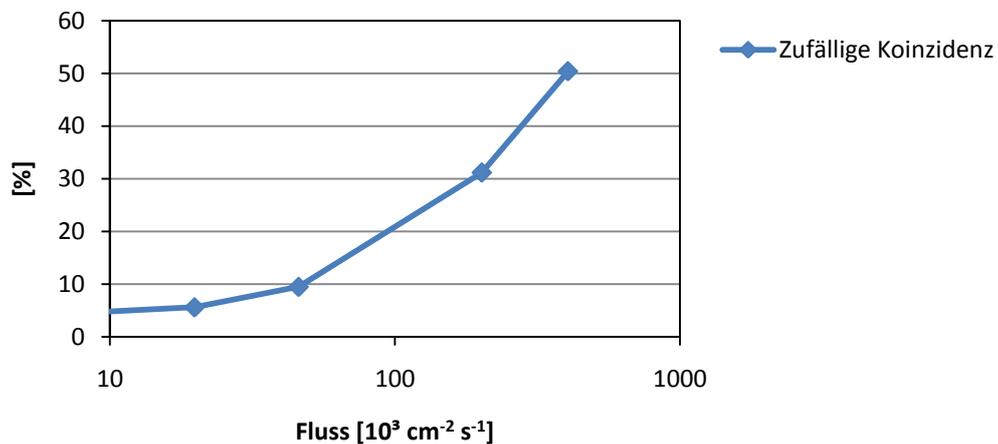


Abbildung 25: Zufällige Koinzidenz als Funktion des Flusses

Schlussfolgerung:

Für Zählraten über einer bestimmten Schwelle überlappen sich die Einzelimpulse, wodurch sie von den Zählern nicht mehr registriert werden. Da die OR Signallänge deutlich größer ist als der mögliche Abstand zweier Elektronen, können die einzelnen Ereignisse nicht mehr voneinander getrennt werden. Damit ist die Grundannahme der Zähler-Effizienz, die von einzelnen Elektronen ausgeht, nicht mehr gültig. Folgerichtig kann die Zähler-Effizienz nur für niedrige Flüsse verwendet werden.

5.4.4 QUANTIFIZIERUNG DER VERUNREINIGUNG DES ELEKTRONENSTRAHLS

Zur Erzeugung des Einzelelektronenstrahls an ELBE wird der primäre Elektronenstrahl soweit verdünnt bis nur noch ein Bruchteil der Pakete, die ausgesendet werden, auch wirklich mit Elektronen gefüllt sind. Da es problemlos möglich ist zu bestimmen, ob ein Paket gefüllt war, bietet der "Einzelelektronenmodus" theoretisch ideale Bedingungen, um die Effizienz eines Detektors zu bestimmen. In der Praxis ist das Ausdünnen des Elektronenstrahls ein statistischer Prozess, bei dem nicht hundertprozentig sichergestellt ist, dass wirklich nur ein Elektron im Paket war oder, dass die gefüllten Pakete periodisch ankommen. Diese Fehlerquellen zu quantifizieren dienen folgende Abschätzungen:

1. Mehrere Elektronen pro Paket:

Annahme: Die Verteilung von Elektronen pro Paket genügt einer Poisson-Verteilung:

$$P(x, \lambda) = \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda} \quad (12)$$

mit

x Anzahl der Elektronen pro Paket
λ mittlere Ladung pro Paket

Dann ergibt sich die Elektronenrate des Strahls mit:

$$\begin{aligned} \text{Rate} &= (1 - P(0, \lambda)) f \\ f &= 13 \text{ MHz} \quad \text{Frequenz der Paketfolge an ELBE} \end{aligned} \quad (13)$$

die Wahrscheinlichkeit für ein 1-Elektron Ereignis ist:

$$P_{\text{Einzel-Elektronen}} = \frac{P(1, \lambda)}{1 - P(0, \lambda)} \quad (14)$$

und die Wahrscheinlichkeit für Mehr-Elektronen Ereignisse ergibt sich mit:

$$P_{\text{Mehr-Elektronen}}(\lambda) = \frac{1 - P(0, \lambda) - P(1, \lambda)}{1 - P(0, \lambda)} \quad (15)$$

Damit ergeben sich die in Abbildung 26 dargestellten Verhältnisse.

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

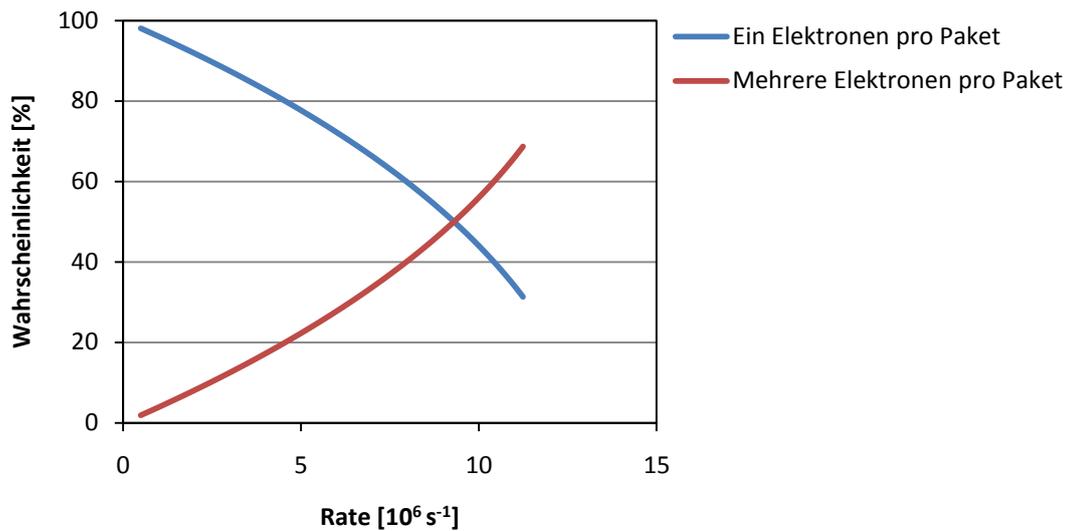


Abbildung 26: Statistische Verunreinigung durch mehre Elektronen pro Paket

2. Mehrere Elektronen im Triggerfenster:

Annahmen:

- Elektronen sind gleichverteilt.
- Koinzidenzzeitfenster ist größer als der zweifache Abstand der Pakete. Damit können bis zu 3 Elektronen zu einem Signal beitragen.

Das führt zu einer binominal Verteilung

$$f(x, n, p) = \binom{n}{x} \cdot p^x \cdot (1-p)^{n-x} \quad (16)$$

mit:

f	Wahrscheinlichkeit
x	Anzahl der erfolgreichen Versuche
n	Anzahl der Versuche insgesamt
$p \approx \text{Rate}/13\text{MHz}$	Wahrscheinlichkeit für den Einzelerfolg

Damit ergibt sich die Wahrscheinlichkeit für Ein-Elektron Ereignisse

$$P_{\text{Einzel-Elektronen}} = \frac{f(1,3,p)}{f(1,3,p) + f(2,3,p) + f(3,3,p)}, \quad (17)$$

und die Wahrscheinlichkeit für mehrere Elektronen pro Zeitfenster ist

$$P_{\text{Mehrere-Elektronen}} = \frac{f(2,3,p) + f(3,3,p)}{f(1,3,p) + f(2,3,p) + f(3,3,p)} \quad (18)$$

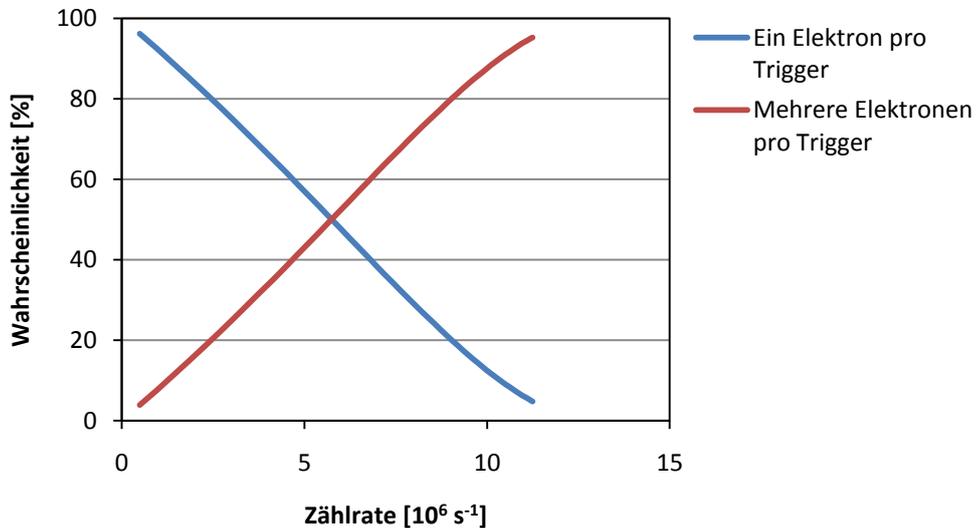


Abbildung 27: Statistische Verunreinigung durch mehrere Elektronen pro Zeitfenster.

Die entsprechenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen als Funktion der Zählrate sind in Abbildung 27 dargestellt.

Kombiniert man beide Verunreinigungen, so ergibt sich ein Verhalten, das in Abbildung 28 dargestellt ist.

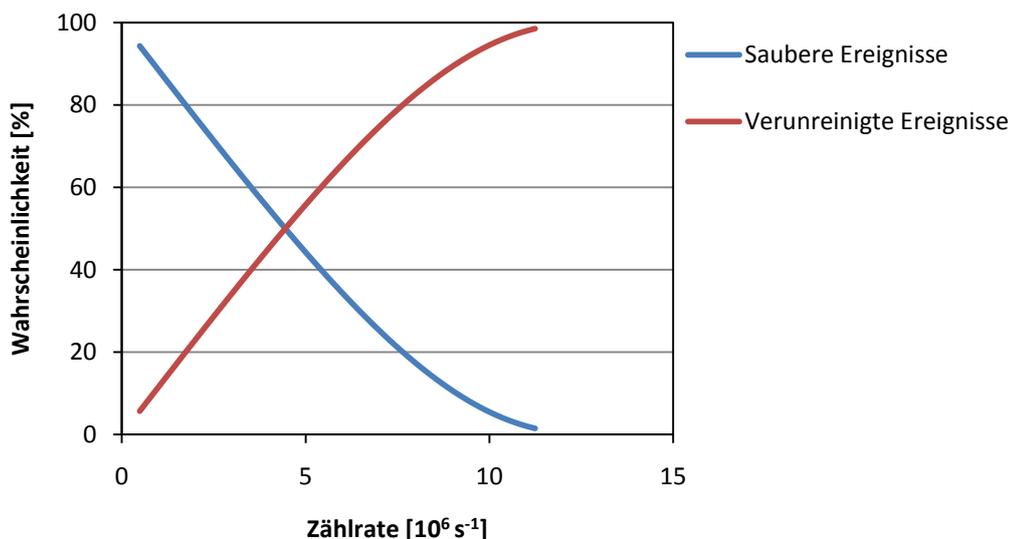


Abbildung 28: Gesamte statistische Verunreinigung

In Abbildung 28 ist zu erkennen, dass es bereits ab einer Zählrate von $4,5 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ wahrscheinlicher ist, ein verunreinigtes Ereignis zu haben als ein sauberes Ereignis. Um die Auswirkung dieser

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

Verunreinigung zu charakterisieren, dient folgendes Beispiel. Angenommen wird ein Detektor mit einer Effizienz von nur 95% und einer Ratenfestigkeit von $1,5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Abbildung 29 zeigt, dass mit beiden "Verunreinigungen", d.h. mehrere Elektronen pro Paket und/oder in der Signallaufzeit, bereits bei einer simulierten Ratenfestigkeit von $1,5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ es nicht mehr möglich ist, diese zu bestimmen. Des Weiteren erkennt man, dass es durchaus möglich ist, die Effizienz zumindest tendenziell abzuschätzen, falls nur das Problem der "verunreinigten Pakete" auftritt. Mit diesem Ziel wird im nächsten Abschnitt die sogenannte "File-Effizienz" definiert.

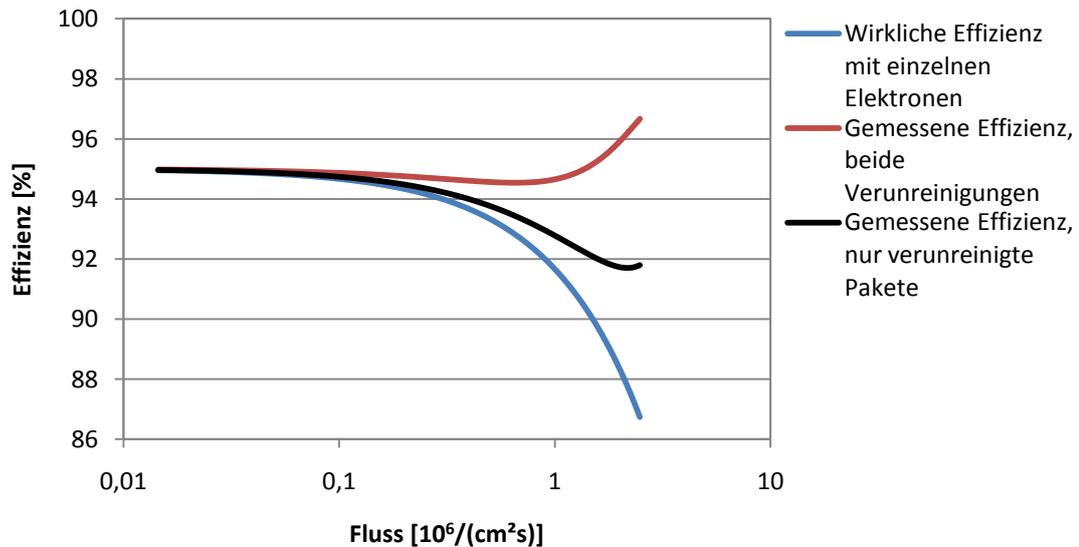


Abbildung 29: Vergleich zwischen "Wahrer Effizienz" und den "Gemessenen Effizienzen"

Um abzuschätzen, wie stark die Abweichung der mit der "File-Effizienz" "gemessenen Ratenfestigkeit" von der "wirklichen Ratenfestigkeit" ist, dient Abbildung 30. Darin ist zu erkennen, dass die "gemessene Ratenfestigkeit" (das heißt die über die "File-Effizienz" bestimmte Ratenfestigkeit) die "wirkliche Ratenfestigkeit" um bis zu einen Faktor 2,5 überschätzt.

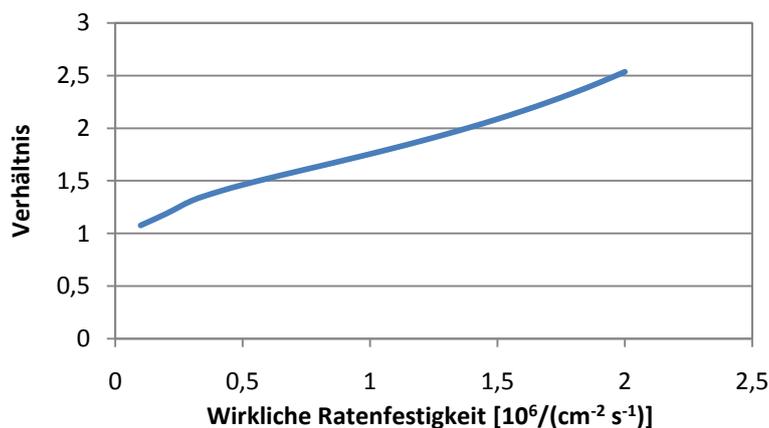


Abbildung 30: Verhältnis der "gemessenen Ratenfestigkeit" zur "wirklichen Ratenfestigkeit" als Funktion der "wirklichen Ratenfestigkeit"

Zusammengefasst kann man sagen, dass, selbst im Idealfall, die "File-Effizienz" lediglich die Größenordnung der Ratenfestigkeit wiedergibt.

5.4.5 DEFINITION: "FILE-EFFIZIENZ"

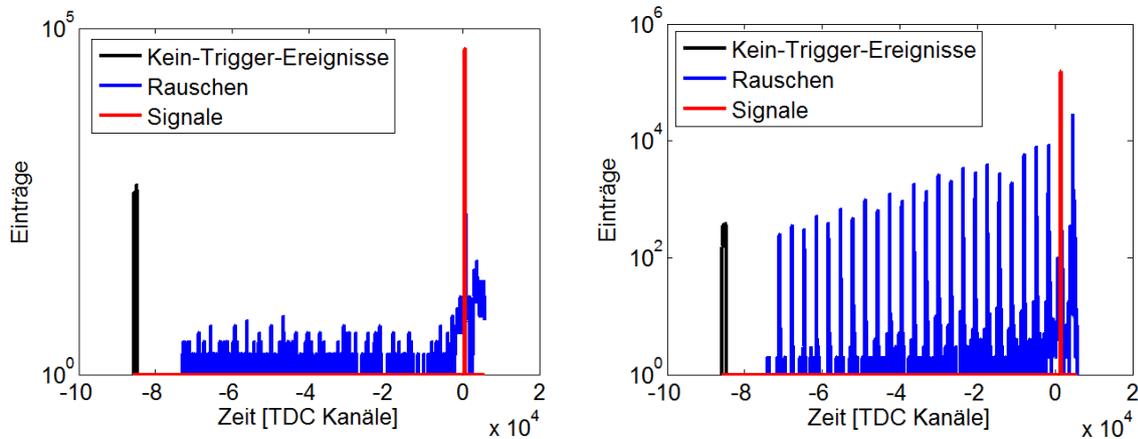


Abbildung 31: TDC-Histogramm von Streifen 5 des CRPC1. Linke Seite: Messung mit einem Teilchenfluss von $2 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Das Spektrum zeigt nur wenig Rauschen. Rechte Seite: Messung mit einem Teilchenfluss von $6 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Das Spektrum wird zu einem großen Teil von Ereignissen bestimmt, die nicht mit dem Trigger in Verbindung stehen. Es ist eine Häufung der Ereignisse bei einem Vielfachen von ~ 3000 TDC-Kanälen zu erkennen. Dies entspricht einer Zeit von 77 ns. Damit sind diese Ereignisse eindeutig als Elektronen von ELBE identifiziert.

Die Idee bei der File-Effizienz ist relativ einfach: Da der Auslöser zum Speichern eines Ereignisses das Signal der Koinzidenzdetektoren ist, liegt eine repräsentative Stichprobe der Gesamtheit aller Ereignisse, die den Detektor passieren, vor. Dies gilt genau solange wie es nicht möglich ist, dass zwei oder mehr Elektronen im untersuchten Zeitfenster eintreffen. Genau an dieser Stelle liegt das Problem. Es wurde ein Zeitfenster von mehreren Mikrosekunde untersucht. Deswegen muss immer mit einer Kontamination von zwei und mehr-Elektronen-Ereignissen gerechnet werden. Bei Analyse der Daten stellt man fest, dass es drei verschiedene Gruppen von Signalen gibt:

1. Rauschen. Dabei gibt der Detektor ein Signal. Dieses kommt aber nicht zur richtigen Zeit, um mit dem Trigger in Verbindung zu stehen.
2. Signale, die in einem sehr engen Bereich um den Hauptpeak liegen und höchstwahrscheinlich echte Ereignisse sind.
3. Ereignisse mit TDC Werten von kleiner $8 \cdot 10^4$. Solche Einträge werden erstellt, wenn der Detektor kein Signal in dem zu untersuchenden Zeitfenster gegeben hat oder wenn es zu einem Fehler gekommen ist.

Dies soll anhand des TDC-Spektrums in Abbildung 31 verdeutlicht werden. Des Weiteren ist gut zu erkennen, wie das Rauschen mit zunehmendem Fluss immer stärker vom "Rauschen" der Quelle dominiert wird. Für die Datenanalyse ist es notwendig die Rauschereignisse weiter zu unterteilen, je nachdem, ob sie vor oder nach dem erwarteten Signal registriert wurden. Damit ergeben sich 4 Kategorien:

1. Kein-Trigger-Ereignisse mit TDC-Kanäle $< -8 \times 10^4$,
2. Vor-Trigger-Ereignisse mit $-8 \times 10^4 < \text{TDC-Kanäle} < \text{Signal}$,
3. Signale,
4. Nach-Trigger-Ereignisse mit $\text{TDC} > \text{Signal}$.

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

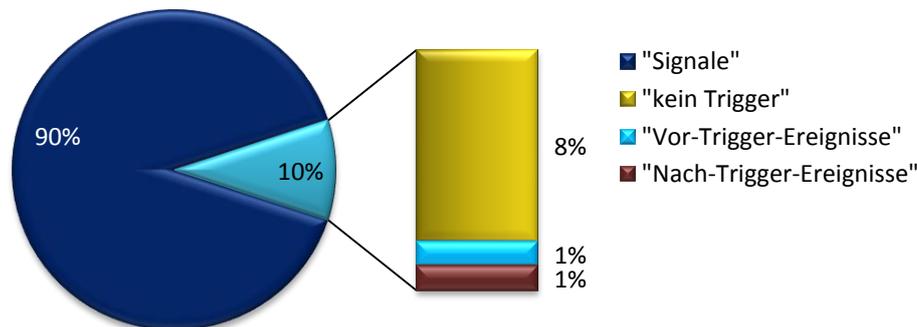


Abbildung 32: Vereinfachte Häufigkeitsverteilung der Ereignisse im TDC zu QDC Spektrum von CRPC1, Streifen 5, bei einem Fluss von $2 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

In Abbildung 32 ist zu sehen, dass für niedrige Flüsse das Spektrum von "Signalen" und "kein Treffer Ereignissen" dominiert wird. Deswegen ist es für niedrige Flüsse durchaus sinnvoll, keine "Korrekturen" an den Spektren vorzunehmen. Zum besseren Verständnis der Spektren ist es hilfreich, die Spektren unter verschiedenen Bedingungen zu vergleichen. Hier ist es insbesondere wichtig, die beiden Extremfälle gegenüber zu stellen. Zum einen: was passiert, wenn der Teilchenfluss durch den "Aktiven Bereich"⁸ gegen Null geht. Dies wurde dadurch erreicht, dass der Detektor aus dem Strahl geschoben wurde. Zum anderen: was passiert, wenn der Teilchenfluss durch den "Aktiven Bereich" zunimmt. Im linken Teil der Abbildung 33 ist zu sehen, dass mit zunehmendem Abstand vom untersuchten Streifen sich die Verteilung dahingehend verlagert und dass deutlich mehr Ereignisse bei TDC-Kanäle $< -8 \cdot 10^4$ zu finden sind. Das Verhältnis der Vor- und Nachtrigger-Ereignisse bleibt relativ konstant. Deswegen ist hier nicht mit einer signifikanten Verfälschung zu rechnen. Der rechte Teil der Abbildung 33 zeigt ein anderes Verhalten. Hier ist eine Abnahme der Ereignisse bei TDC-Kanäle $< -8 \cdot 10^4$ zu erkennen. Dies ist recht einfach über die zunehmende Wahrscheinlichkeit, dass zwei oder mehr Elektronen im untersuchten Zeitfenster den Detektor treffen zu erklären. Da sich bei hohen Flüssen die Nicht-Signal-Ereignisse hauptsächlich aus Vor- und Nach-Trigger-Events zusammensetzen, ist es zur Bestimmung der File-Effizienz wichtig zu wissen, ob in der DAQ das erste oder das letzte Ereignis weggeschrieben wird. Wird ausschließlich das erste Ereignis weggeschrieben, so ist die DAQ nach dem ersten Ereignis blind. Dann müssen alle Ereignisse herausgefiltert werden, die vor dem erwarteten Ereignis liegen. Umgekehrt wenn die DAQ nur das letzte Ereignis wegschreibt, müssen alle Ereignisse herausgefiltert werden, die nach dem erwarteten Ereignis liegen. Im konkreten Fall schreibt die DAQ das letzte Ereignis weg. Damit bleiben zwei Definitionen der DAQ übrig:

1. Mit "File-Effizienz-raw" wird die Effizienz bezeichnet, bei der keine Einträge rausgefiltert wurden.
2. Mit "File-Effizienz-korrigiert" wird die Effizienz bezeichnet, bei der alle Nachtrigger-Events herausgeschnitten werden.

⁸ Mit "Aktiver Bereich" ist der Bereich gemeint, in dem ein Streifen ein Ereignis wahrnimmt. Dieser Bereich ist wegen des Crosstalks größer als die Streifenbreite.

Zur Abschätzung des Fehlers gibt es mehrere Möglichkeiten. Zum einen kann man davon ausgehen, dass die reduzierte Gesamtheit eine repräsentative Stichprobe der Grundgesamtheit darstellt. In diesem Fall liegt der wahre Wert zu $\approx 95\%$ im 2σ Intervall um den Wert der reduzierten Gesamtheit. Zum anderen kann ein herausgefiltertes Ereignis nur entweder gültig oder ungültig sein. Damit ergeben sich die Grenzen, in denen der wirkliche Wert sich bewegen kann. Weil die Repräsentativität der Stichprobe nicht sichergestellt ist, werden, soweit es nicht ausdrücklich gesagt wird, immer die Grenzen angegeben.

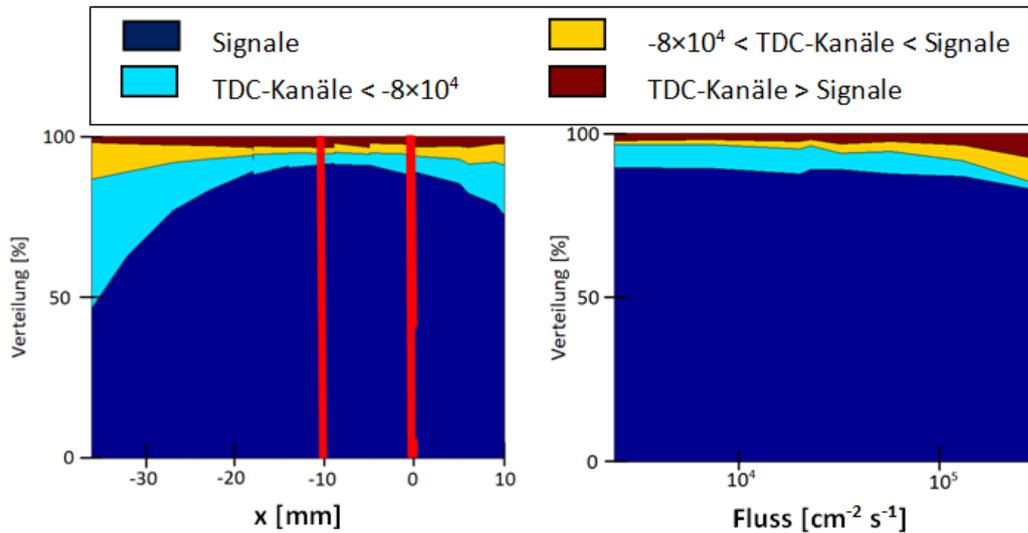


Abbildung 33: Vergleich der vereinfachten Häufigkeitsverteilung für die verschiedenen Abhängigkeiten. Links: Verschiebung des Elektronenstrahls auf dem RPC bei einem Teilchenfluss von $2 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, die roten Markierungen geben die Position des untersuchten Streifens an. Rechts: Erhöhung des Teilchenflusses

Da es von besonderer Bedeutung ist zu wissen, wie die Gesamteffizienz des Detektors ist, ist es notwendig, die Streifeneffizienzen zu kombinieren. Hierzu ist es notwendig, sich intensiver mit den vereinfachten Spektren zu befassen. In Abbildung 33 wurde bereits ein vereinfachtes Spektrum vorgestellt. Es ist eine Seite eines Streifens zu sehen. Zur weiteren Vereinfachung werden die Bereiche "TDC < $-8 \cdot 10^4$ " und " $-8 \cdot 10^4 < \text{TDC} < \text{Signal}$ " zusammengelegt. Diese werden von hier ab als "Vor-Trigger-Ereignisse" bezeichnet. Die Bezeichnung "Signal" bleibt erhalten. Allerdings ändert sich die Bezeichnung für "TDC > Signal" in "Nach-Trigger-Ereignisse". Kombiniert man beide Seiten eines Streifens, so ergeben sich fünf Kombinationen.

Tabelle 6: Kombination der Informationen von beiden Seiten des Detektors

Bezeichnung	Seite 1	Seite 2
Signal	Signal	Signal
Signal und Nach-Trigger-Ereignis	Signal	Nach-Trigger-Ereignis
Signal und Vor-Trigger-Ereignis	Signal	Vor-Trigger-Ereignis
Nach-Trigger-Ereignis	Nach-Trigger-Ereignis	Nach-Trigger-Ereignis oder Vor-Trigger-Ereignis
Vor-Trigger-Ereignis	Vor-Trigger-Ereignis	Vor-Trigger-Ereignis

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

Bei der Kombination mehrerer Streifen würde sich die Anzahl der Kombinationen drastisch erhöhen. Um dem vorzubeugen, wurde folgende Rangordnung eingeführt:

"Signal" > "Signal und Nach-Trigger-Ereignis" > "Signal und Vor-Trigger-Ereignis" > "Nach-Trigger-Ereignis" > "Vor-Trigger-Ereignis"

Es fällt sofort die Bevorzugung von Signal Ereignissen und Nach-Trigger-Ereignissen auf. Diese hat ihre Begründung in der höheren Aussagekraft dieser Ereignisse. Bei einem Signal-Ereignis hat der Detektor, unabhängig von den anderen Streifen, ein Signal gegeben. Bei Nach-Trigger-Ereignissen kann mit Sicherheit gesagt werden, dass nicht bekannt ist, wie sich der Streifen bei diesem Ereignis verhalten hat. Die Aussage "Vor-Trigger-Ereignis" dagegen sagt ohne die anderen Streifen nichts aus. Diese Definition hat leider zur Folge, dass statistisch mehr Vor-Trigger-Ereignisse verworfen werden als Signal-Ereignisse. Dadurch wird die Effizienz etwas überschätzt. Um die Überschätzung zu quantifizieren, wurde eine weitere Kategorie eingeführt: "Vor- und Nach-Trigger-Ereignisse". Hierbei handelt es sich um ein Ereignis mit "Vor-Trigger-Ereignissen" und genau einem "Nach-Trigger-Ereignis". Bei diesen Ereignissen ist davon auszugehen, dass sie eher Vor-Trigger-Ereignis sind. Trotzdem werden diese als Nach-Trigger-Ereignisse gewertet und damit für die Bestimmung der File-Effizienz herausgefiltert.

Verwendung der Szintillationsdetektoren

In diesem Teil geht es darum, wie mit den Informationen aus den Szintillationsdetektoren umzugehen ist. Dazu ist es hilfreich, sich das Zeitspektrum zu vergegenwärtigen. In Abbildung 34 rechts ist das kumulative Spektrum des Szintillationsdetektor zu sehen. Auf den ersten Blick hat es den Anschein als wäre die Effizienz beim Hauptpeak nur 90 %. Das ist falsch! Da nur Ereignisse erfasst werden, bei denen S1 ein Signal gegeben hat, ist die Effizienz um den Hauptpeak 100 %. In der Datenannahme wird aber nur das letzte Ereignis gespeichert. Deswegen ist die Aussage des rechten Teils der Abbildung 34, dass mit einer ~10 %igen Wahrscheinlichkeit ein Elektron nach dem erwarteten kommt und somit die Information über das erste Elektron überschreibt. Die Szintillationsdetektoren sind also gut geeignet zu bestimmen, wie viele Nach-Trigger-Elektronen es gegeben hat. Die Versuchung ist jetzt groß, zur Bestimmung der Effizienz einfach diese Nach-Trigger-Elektronen herauszufiltern. Das Problem ist allerdings, dass es keine neuen Erkenntnisse bringt. Es ist egal, ob man die Ereignisse herausfiltert, weil sie im RPC ein ungültiges Signal gegeben haben oder ob man sie herausfiltert weil sie im Szintillationsdetektor ein ungültiges Signal gegeben haben. Innerhalb der statistischen Schwankung werden die gleichen Ereignisse mit unterschiedlicher Begründung herausgeschnitten. Weil davon keine neuen Resultate erwartet werden, wird diese Methode nicht weiter verfolgt. Im Allgemeinen kann von der Verwendung der Szintillationsdetektoren für die Bestimmung der File-Effizienz nur abgeraten werden. Im besten Fall erhält man keine neuen Informationen, im schlechtesten Fall schneidet man zu viel oder zu wenig heraus, ohne es begründen zu können. Diese Methode wird nur zur Ermittlung vereinfachter Spektren verwendet und dient nur zur Gewinnung qualitativer Aussagen.

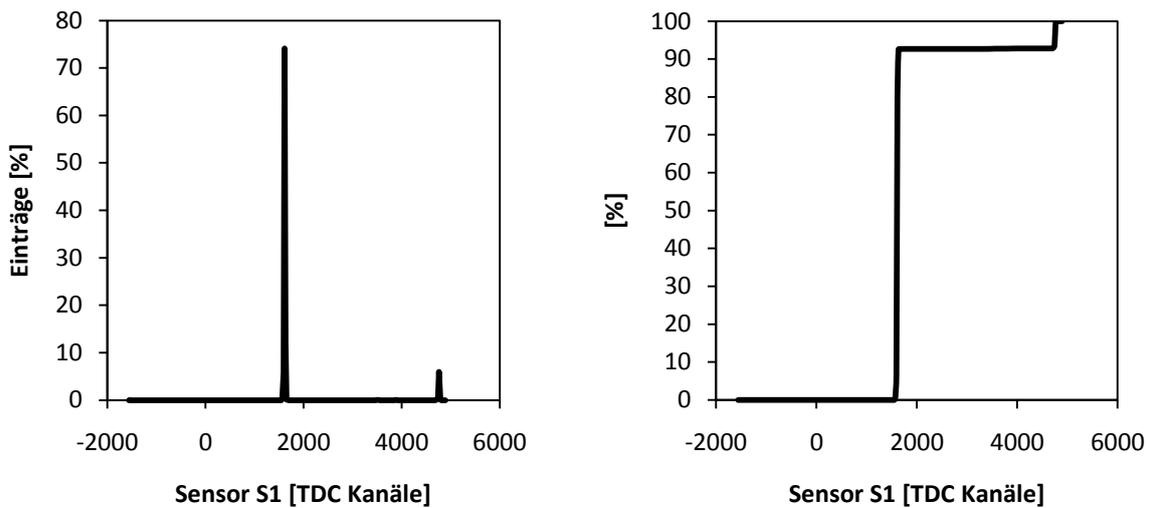


Abbildung 34: Links: Zeitspektrum von S1 Datei 779, bei einem Fluss = 3×10^5 $1/(cm^2s)$. Rechts: kumulatives Spektrum selbe Datei. Das kumulative Spektrum erhält man durch aufsummieren des Spektrums, ähnlich einer kumulativen Verteilungsfunktion.

5.4.6 EFFIZIENZ ALS FUNKTION DES FLUSSES

Für die spätere Anwendung ist es wichtig zu wissen, bis zu welchem Fluss der Detektor verwendet werden kann, ohne zu viel an Effizienz zu verlieren. Die Definition des kritischen Flusses wird von [5] übernommen. In der Arbeit werden zwei kritische Flüsse als Ratenfestigkeiten definiert: zum einen der Fluss bei dem die Effizienz um 5% abgesunken ist, zum anderen den bei dem sich die Zeitauflösung um 20 ps verschlechtert hat. Diese werden im folgenden mit "Ratenfestigkeit der Effizienz" und "Ratenfestigkeit der Zeitauflösung" bezeichnet. Betrachtet man ausschließlich die Zähler-Effizienzen so ergeben sich die in Abbildung 35 dargestellten Verhältnisse. Man erkennt, dass die Zähler-Effizienz auf dem untersuchten Bereich als nahezu konstant angesehen werden kann. Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, ist die Zähler-Effizienz in ihrer jetzigen Form für Flüsse $> 10^5$ $cm^{-2}s^{-1}$ nicht zu gebrauchen. Im Kontrast dazu ergibt die "File-Effizienz-Raw" den in Abbildung 36 dargestellten Verlauf. Es ist zu erkennen, dass die "File-Effizienz-RAW" linear mit dem Fluss abnimmt. Das entspricht dem erwarteten Verhalten. Wichtig an dieser Stelle ist, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen "Zähler-Effizienz" und "File-Effizienz-Raw" gibt. Zum Verständnis dieses Unterschiedes ist es wichtig zu verstehen, wie sich das vereinfachte Spektrum zusammensetzt. Für die aktuelle Auswertung wird das Spektrum noch weiter vereinfacht, so dass es nur noch aus "Signalen", "Vor-Trigger-Ereignissen" und "Nach-Trigger-Ereignissen" besteht.

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

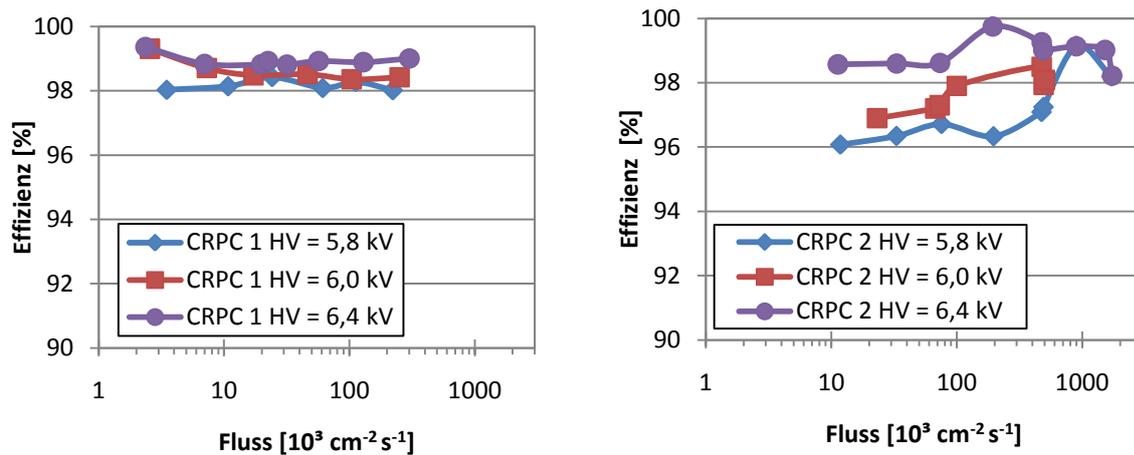


Abbildung 35: Zähler-Effizienz als Funktion des Flusses. Links: CRPC1 Juni 2010 Strahlzeit, rechts: CRPC2 Februar 2010 Strahlzeit.

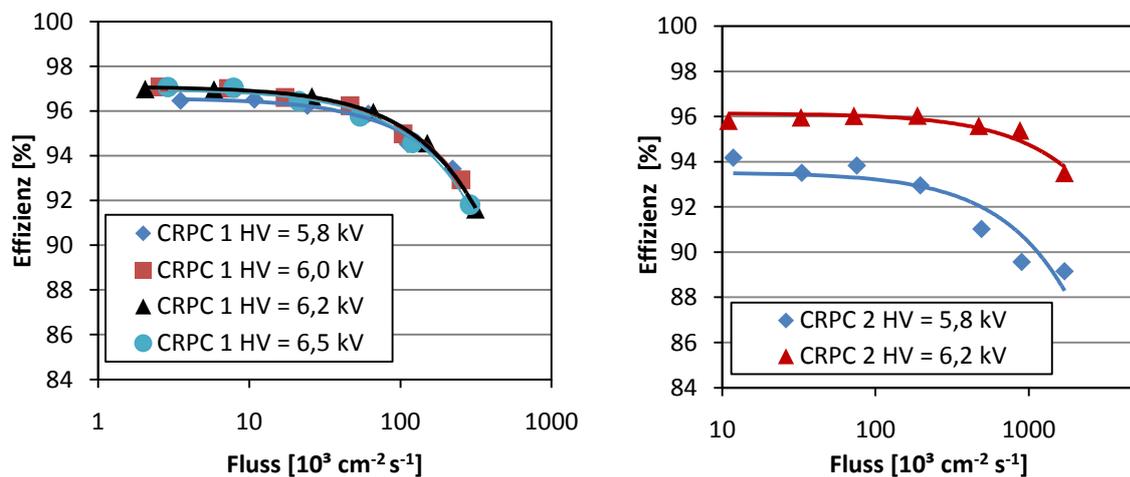


Abbildung 36: "File-Effizienz-Raw" als Funktion des Flusses. Rechts: CRPC2, Februar 2010 Strahlzeit. Links: CRPC1, Juni 2010 Strahlzeit.

Zum Vergleich ist es ratsam, zuerst ein bekanntes und verstandenes Spektrum zu analysieren. Hierzu dient das Spektrum des vorderen Szintillationsdetektors S1. Da nur Ereignisse wegeschrieben werden, bei denen S1 ein Signal gegeben hat, liefert S1 demnach ein Vergleichsspektrum mit einer Effizienz von 100 %. Die naive Überlegung wäre demnach, dass die File-Effizienz auch 100 % ist. Wie in der Abbildung 37 zu sehen ist, erreicht die "File-Effizienz" jedoch nicht 100 %. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Teilchenfluss die Anzahl der Signale deutlich abnimmt und dafür die Anzahl der Nach-Trigger-Ereignisse zunimmt. Wichtig ist, dass es keine Vor-Trigger-Ereignisse gibt. Damit ist klar, dass die Abnahme der File-Effizienz lediglich ein Artefakt der DAQ ist, in der die Einträge vom Signal durch Nach-Trigger-Ereignisse überschrieben werden. Vergleicht man das Spektrum des Szintillators mit dem eines einzelnen Streifens des RPCs, so ergeben sich die in Abbildung 38 dargestellten Verhältnisse.

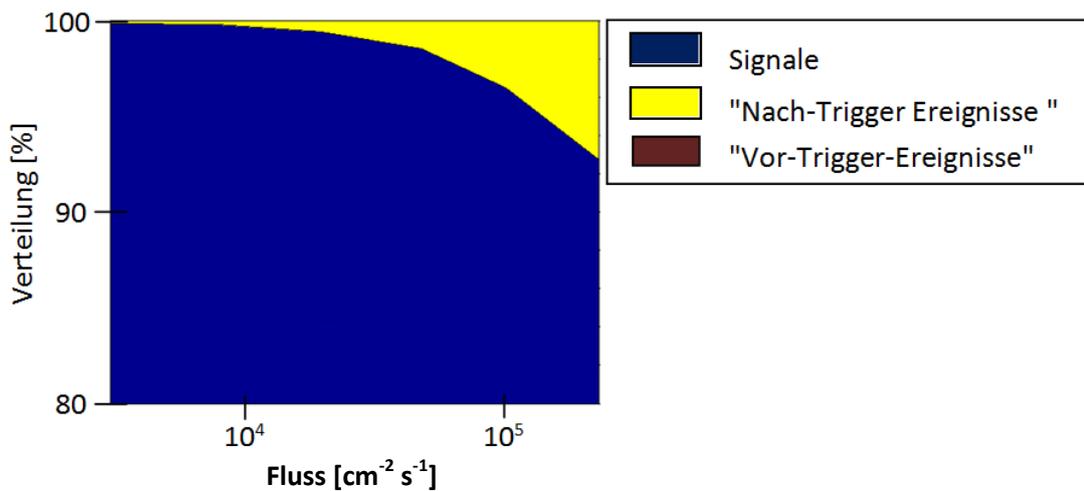


Abbildung 37: Vereinfachtes Spektrum von S1 als Funktion des Flusses

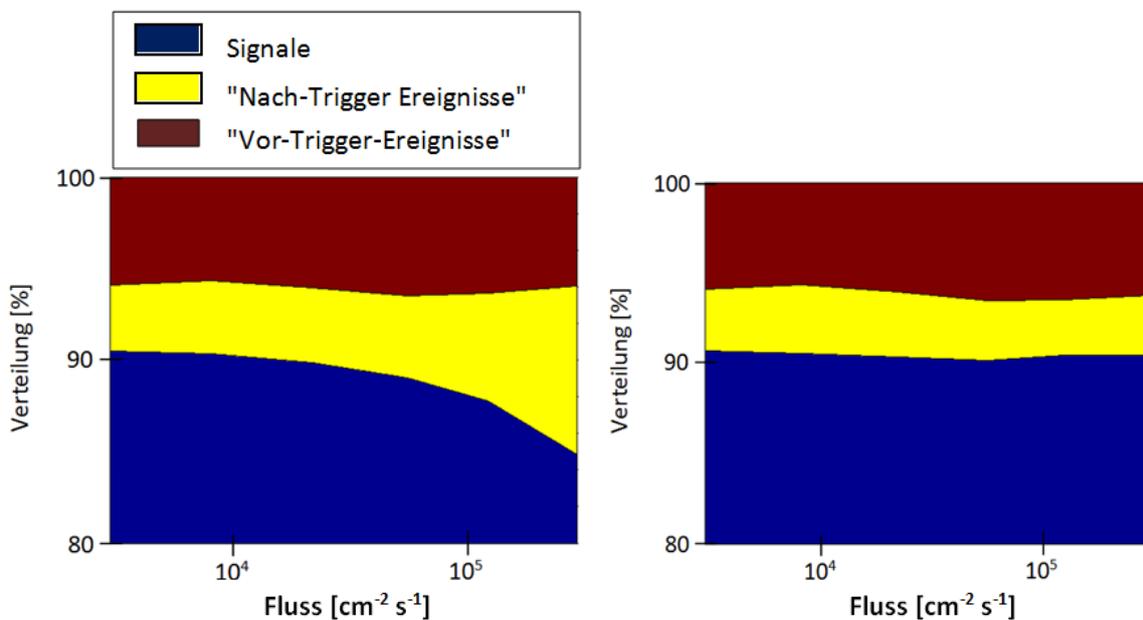


Abbildung 38: Vereinfachtes Spektrum von Streifen 4 des CRPC1 ausgelesen von einer Seite. Links ohne Korrektur durch den Szintillationsdetektor, rechts: mit Korrektur durch den Szintillationsdetektor

In dem linken Teil der Abbildung 38 ist das vereinfachte Spektrum eines Streifens des CRPC1 als Funktion des Flusses abgebildet. Im Gegensatz zu Abbildung 37 sind hier drei Bereiche zu erkennen:

- Zum einen "Signale". In diesem Bereich liegen alle Ereignisse mit gültiger Zeitinformation.
- Als weiteres "Vor-Trigger-Ereignisse". Hier liegen alle Ereignisse, die zeitlich vor dem Trigger ankamen. Dazu gehören auch die Ereignisse bei $TDC < -8 \cdot 10^4$. Auch wenn diese anderen Ursprungs sind, ist es für die Auswertung hinreichend, wenn man alle Ereignisse vor dem Trigger in eine Kategorie packt.

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

- Und schließlich "Nach-Trigger-Events", Hierzu zählen alle Ereignisse die nach dem Trigger ankommen. Es fällt deutlich auf, dass es beim CRPC1 bei kleineren Flüssen deutlich mehr "Nach-Trigger –Ereignisse" gibt als beim Szintillationsdetektor. Dies hat seine Ursache im deutlichen größeren Rauschen des CRPC im Vergleich zum Szintillationsdetektor. Wichtig an diesem Spektrum ist, dass die Abnahme der Signalereignisse zugunsten der "Nach-Trigger-Ereignisse" passiert. Das ist exakt das Verhalten, das man nach Abbildung 37 von einem Detektor erwarten würde, dessen Effizienz nicht vom Fluss abhängt. Dass die relative Anzahl der Signale nur 90% erreicht, darf nicht verwundern, da nur ein Streifen untersucht wurde.

Da von dem Szintillationsdetektor bekannt ist, bei welchen Ereignissen wirklich ein "Nach-Trigger-Elektron" durch den Detektor geflogen ist, können diese Ereignisse herausgefiltert werden. Dies ist in Abbildung 38 rechts zu sehen. Es ist deutlich zu erkennen, dass, filtert man alle Ereignisse heraus, bei denen der Szintillationsdetektor ein "Nach-Trigger-Elektron" gesehen hat, sich ein horizontaler Verlauf einstellt. Es bleibt ein Unsicherheitsbereich von 3%, über den nur schwer Vorhersagen gemacht werden können. Im Folgenden soll untersucht werden, wie sich das Spektrum des gesamten RPC verhält.

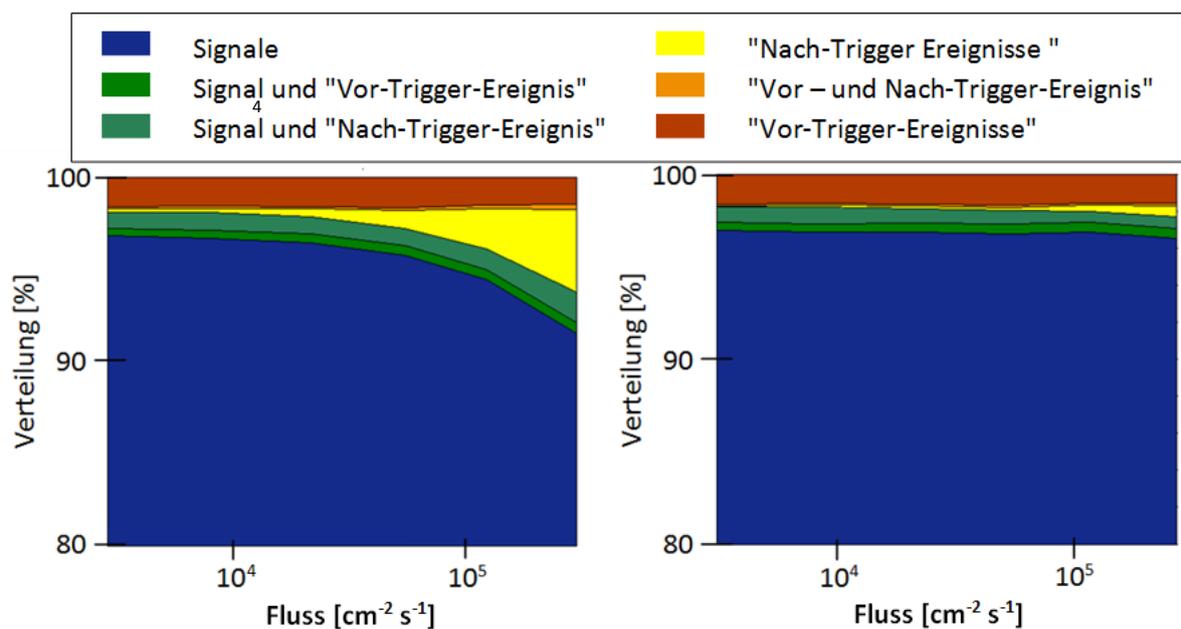


Abbildung 39: Vereinfachtes Spektrum des CRPC1. Oben: ohne Korrektur durch die Szintillationsdetektoren, unten: mit Korrektur

In Abbildung 39 ist das vereinfachte Spektrum des CRPC1 zu sehen. Das Spektrum wurde in sechs Kategorien unterteilt. Wichtig am linken Teil der Abbildung 39 ist, dass die Abnahme der Signale zugunsten der Nach-Trigger-Ereignisse stattfindet. Damit ist die Abnahme der Signale nicht mit einer Abnahme der Effizienz gleichzusetzen, sondern ist lediglich ein Artefakt der DAQ. Dies lässt sich mit der Information des Szintillationsdetektors herausfiltern, wie in Abbildung 39 rechts zu sehen ist. Deutlich muss an dieser Stelle zum Ausdruck gebracht werden, dass dieses Verfahren keine vollständige Lösung des "Nach-Trigger-Ereignisse" Problems darstellt. Als Beispiel dienen dafür alle Messungen vom November 2010 und April 2011. Dort war das Zeitfenster für die

Szintillationsdetektoren unterschiedlich und dadurch ist das Verfahren bei diesen Messdaten wirkungslos. In Abbildung 40 ist zu erkennen, dass das Verfahren in diesem Fall vollständig versagt. Dies sollte nicht weiter verwundern, da die Szintillationsdetektoren nicht über die nötigen Informationen verfügen, da deren Zeitfenster deutlich kleiner war als das des RPCs. Ein Ziel dieser Arbeit ist es, ein Verfahren zu kreieren, welches für alle Messungen verwendet werden kann und welches von möglichst wenigen Parametern abhängt. Deswegen bleibt nur, alle Nach-Trigger-Ereignisse herauszufiltern, unabhängig davon, ob die Szintillationsdetektoren ein Nach-Trigger-Ereignis haben oder nicht.

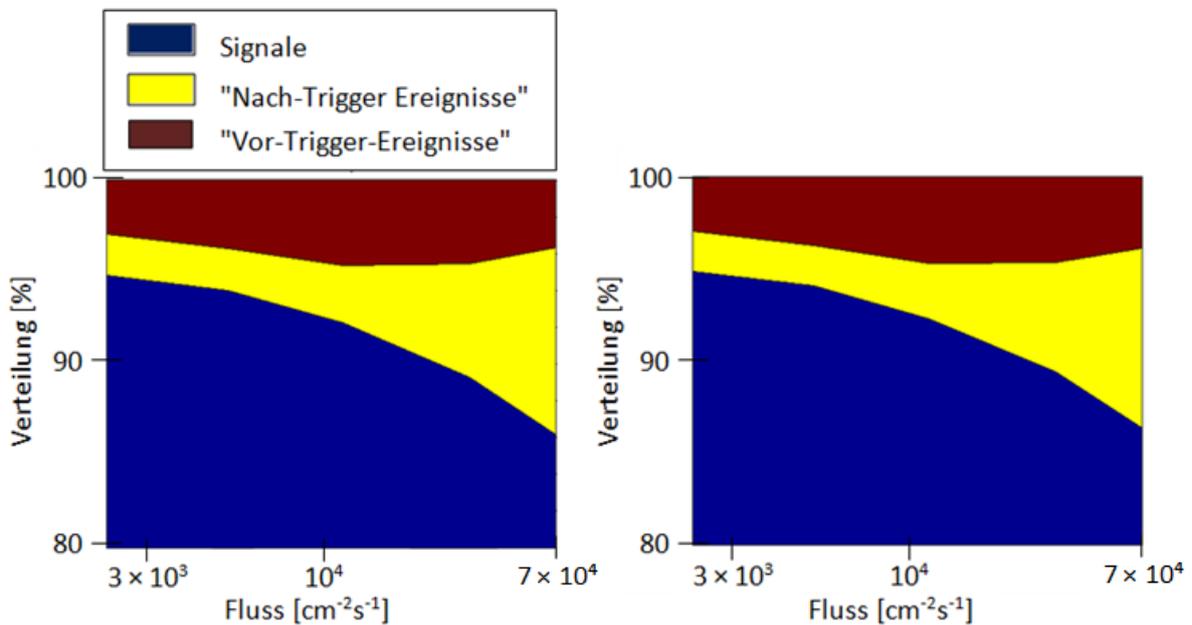


Abbildung 40: Vereinfachtes Spektrum der November Messung. Streifen 9 von einer Seite ausgelesen. Links: ohne Korrektur durch die Szintillationsdetektoren, rechts: mit Korrektur

Zum Test dieses Verfahrens eignet sich der CRPC4, da dieser eine geringere Ratenfestigkeit hat als CRPC1 und CRPC2. Aus Abbildung 25 ist ablesbar, dass die Zähler-Effizienz bis zu einem Fluss von $10^5 \times \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ brauchbare Resultate liefert. Deswegen macht es durchaus Sinn, die Güte eines Verfahrens daran zu bemessen, wie gut es in der Lage ist, die Zählereffizienz zu reproduzieren. Für die Zähler-Effizienz ist es ausreichend, dass eine der beiden Seiten ein Signal hat. Deswegen ist zu erwarten, dass die Zähler-Effizienz genau auf der Trennlinie zwischen "Signal und Vor-Trigger-Ereignisse" und "Vor- und Nach-Trigger-Ereignissen" liegt, was Abbildung 41 deutlich zeigt. Die Abweichungen liegen im Prozentbereich. Dies ist sehr beeindruckend, wenn man bedenkt, dass für den letzten Wert über 20% der Ereignisse herausgefiltert werden mussten.

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

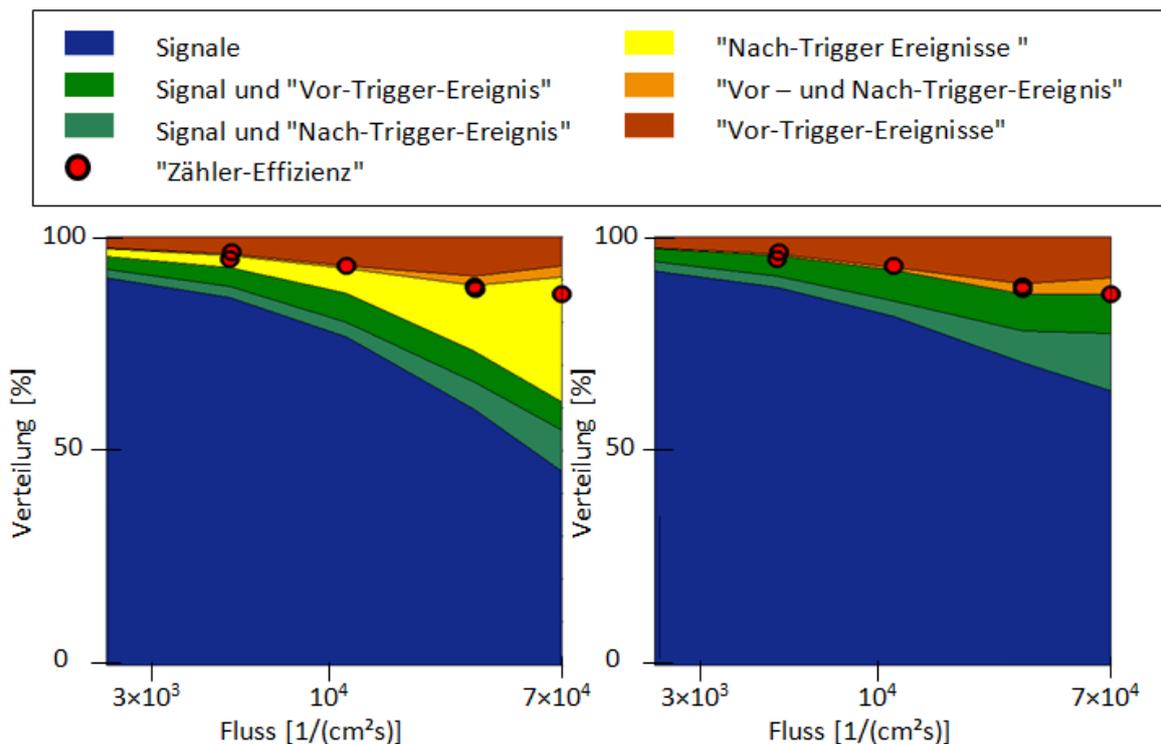


Abbildung 41: Vereinfachtes Spektrum des CRPC4

5.4.7 LADUNGSDEFINIERTE "FILE-EFFIZIENZ"

Im Zuge der Strahlzeit im April 2011 wurde, um die Spektren zu erklären, von Dr. Diego Gonzalez Diaz vermutet⁹, dass es möglich ist, dass es in der DAQ zu fehlerhafter Zuordnung von Ladungs- und Zeitinformationen kommt. Da sich das Zeitfenster, in dem die Ladungsinformation gesammelt wird, grundsätzlich nur durch den "Signal-Trigger" öffnet, nicht aber durch Vor- und Nach-Trigger-Ereignisse, zeigt der QDC grundsätzlich die Ladung an, die während des Signals eingegangen ist. Damit erklären sich zwanglos die Zeit-Amplitude-Spektren der RPC. In Abbildung 42 ist deutlich zu erkennen, dass die Ladungsinformation vor dem "Signal" deutlich kleiner ist als danach. Im Gegensatz zum ersten Eindruck dieser Abbildung wird nicht die Ladungsinformation zu dem Zeitpunkt des TDC Triggers genommen, sondern grundsätzlich nur die Information zum Zeitpunkt des erwarteten Signals. Demnach ist klar, dass bei allen "Vor-Trigger-Ereignissen" die Ladungsinformation "null" ist, da hier lediglich Rauschen wegeschrieben wurde. Hingegen kann bei den "Nach-Trigger-Ereignissen" es durchaus dazu gekommen sein, dass ein wirkliches Signal überschieben wurde. Damit liefert der QDC die Ladung zum Zeitpunkt des Signals. Unter diesem Gesichtspunkt macht es durchaus Sinn, die Ladungsinformation von sicheren Signalereignissen mit den von Rauschereignissen zu vergleichen.

⁹ Persönliche Mitteilung

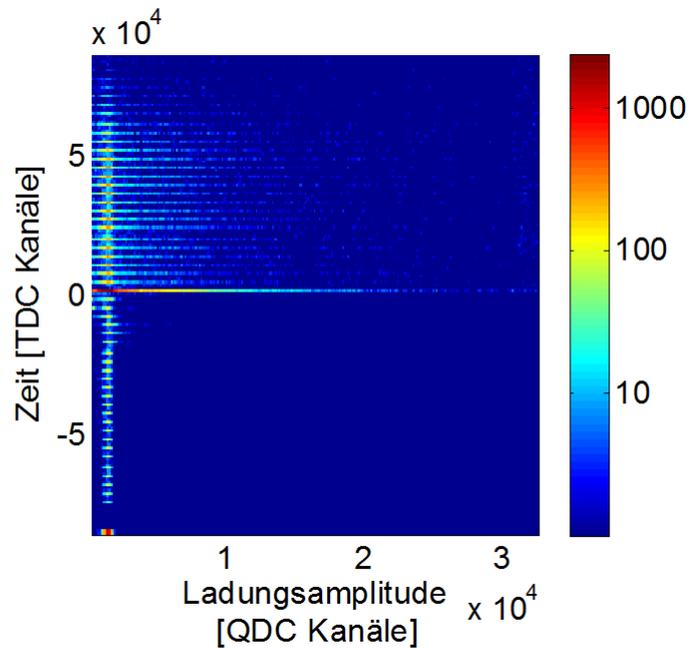


Abbildung 42: Zeit-zu-Ladungs-Spektrum von Streifen 9 des CRPC4 bei einem Teilchenfluss von $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Die Ladungsinformation stammt immer vom Zeitpunkt des erwarteten Signals, deswegen hat es den Anschein als wären "Nach-Trigger-Ereignisse" größer als "Vor-Trigger-Ereignisse". Es handelt sich in Wirklichkeit um eine fehlerhafte Zusammenführung der TDC und QDC Daten

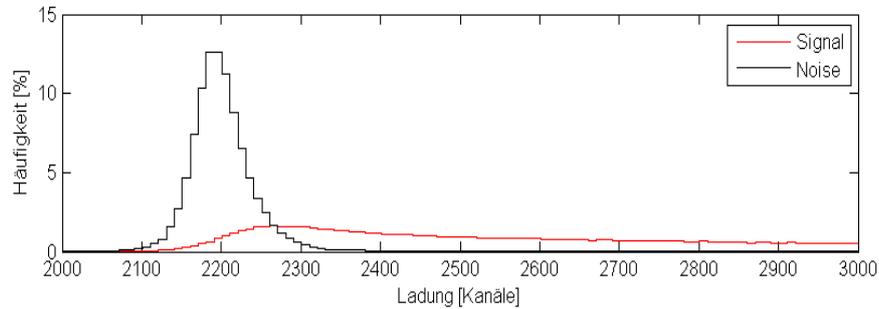


Abbildung 43: Vergleich der Ladungsspektren von Signalen und Rauschen für CRPC1 bei einem Teilchenfluss von $3,5 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und einer Betriebsspannung von 5,8 kV. Signal- und Rausch-Spektrum überlagert in großen Bereichen.

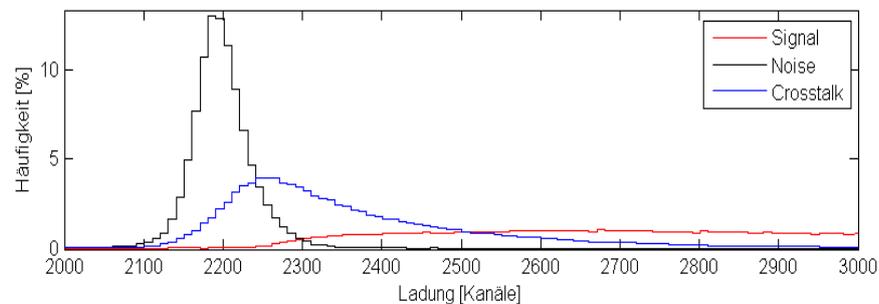


Abbildung 44: Vergleich der Ladungsspektren von Signalen und Rauschen mit Pulshöhenanalyse für CRPC1 bei einem Teilchenfluss von $3,5 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und einer Betriebsspannung von 5,8 kV. Die Überlagerung von Signal und Rausch-Spektrum hat sich zu einem großen Teil als Crosstalk herausgestellt. Ohne Crosstalk Ereignisse ist es möglich, beide Spektren zu trennen.

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

In Abbildung 43 vergleicht die Ladungsspektren von Signalen und Rauschen. Die Unterscheidung, ob es ein Signal oder Rauschen ist, erfolgt in diesem Fall über die Zeitinformation. Es ist deutlich zu erkennen, dass es nicht möglich ist, eindeutig zwischen Signal und Rauschen zu unterscheiden, da beide Spektren sich in einem weiten Bereich überlagern. Führt man allerdings zusätzlich eine Pulshöhenanalyse durch, so erkennt man, dass der Teil des Signalspektrums, der sich mit dem Rauschen überlagert, lediglich "Crosstalk-Ereignisse" sind. Damit ist es möglich viel genauer zwischen echtem Ereignis und Rauschen zu unterscheiden.

Für die "Ladungsdefinierte-File-Effizienz" ist der Punkt interessant, an dem sich die beiden Verteilungsfunktionen schneiden. Das ist der Punkt, an dem es gleich wahrscheinlich ist, dass es ein Signal oder ein Rausch-Ereignis ist. Zur Abschätzung des Fehlers dient der Punkt, an dem die Verunreinigung des Spektrums jeweils auf unter 10% bzw. auf unter die Hälfte des Wertes beim Schnittpunkt absinkt. Anhand der Spektren ist ersichtlich, dass es möglich ist, verlässliche Informationen zu extrahieren.

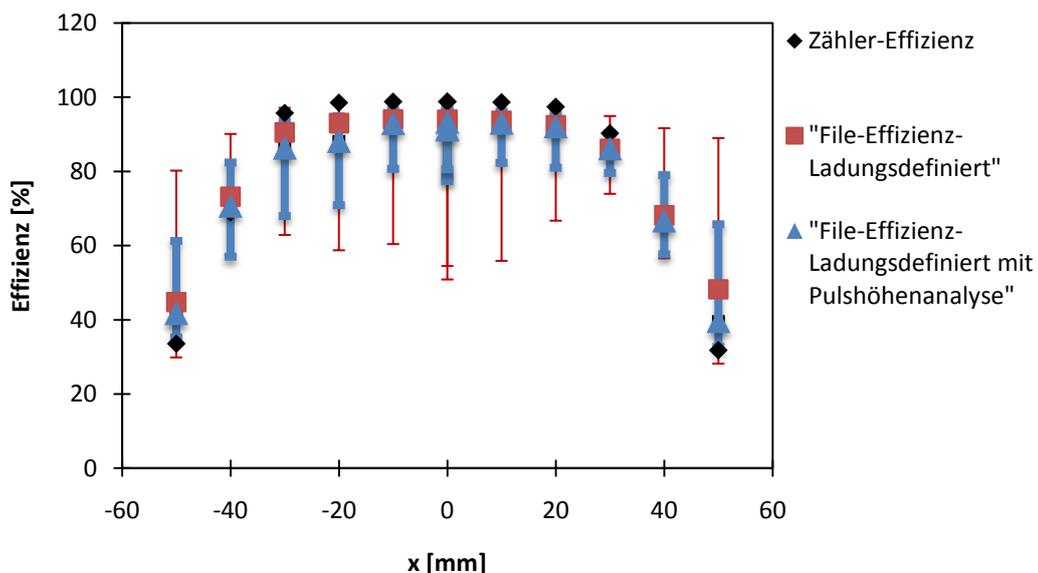


Abbildung 45: Vergleich "File-Effizienz-Ladungsdefiniert" mit Zähler-Effizienz. Mit Pulshöhenanalyse ist es möglich die Zähler-Effizienz qualitativ zu reproduzieren. Es kommt im Zentrum des Detektors zu einer systematischen Unterschätzung der Effizienz. Diese wird damit begründet, dass nur die Informationen der inneren 4 Streifen gespeichert wurde

Zuerst soll in Abbildung 45 die "File-Effizienz-Ladungsdefiniert" bei niedrigem Fluss getestet werden, um die Güte dieses Verfahrens abschätzen zu können. Es ist zu erkennen, dass sich mit der "File-Effizienz-Ladungsdefiniert" in groben Zügen die "Zähler-Effizienz" reproduzieren lässt. Es ist aber auch zu sehen, dass diese Verfahren relativ große Fehler aufweisen. Aus diesem Grund wurde "File-Effizienz-Ladungsdefiniert" nicht weiter untersucht. Stattdessen wird eine kombinierte Methode verwendet

5.4.8 FILE EFFIZIENZ-KOMBINIerte METHODE

Im ersten Schritt wird "File-Effizienz" über die TDC Spektren ermittelt. In einem zweiten Schritt werden all die Ereignisse noch einmal untersucht, bei denen das TDC Spektrum ein "Nach-Trigger-Ereignisse" festgestellt hat. Da nur Ereignisse untersucht werden, die anhand der TDC Spektren nicht eindeutig zugeordnet werden können, ist der resultierende Fehler immer kleiner als ohne diese Methode. Zur Bestimmung der Güte dieses Verfahren soll sie mit der "File-Effizienz-Korrigiert" verglichen werden. Zum Vergleich dient die Messreihe mit CRPC4. Das hat zwei Vorteile: Zum einen kann bei so niedrigen Flüssen davon ausgegangen werden, dass die "Zähler-Effizienz" brauchbare Resultate liefert. Zum anderen wurde bei dieser Messung das Zeitfenster des TDC so gelegt, dass 25 "Nach-Trigger-Pakete" auf den Detektor treffen. Dies führt zu einer besonders starken Verunreinigung des Spektrums. Durch diese besonderen Eigenschaften dieser Messreihen eignen sie sich gut als Vergleichsmessung. In Abbildung 46 ist zu erkennen, dass durch die Verwendung der "File Effizienz Kombiniert" sich die Fehler dramatisch reduzieren. Im Vergleich mit der "File-Effizienz-Korrigiert" fällt auf, dass es nicht zu einer systematischen Überschätzung der Effizienz kommt. Diese Überschätzung ist charakteristisch für die "File-Effizienz-Korrigiert". Da die Relaxationszeit, für alle untersuchten Detektoren größer ist als der minimale Abstand von 77 ns den zwei Elektronen zueinander haben können, wird die Statistik verfälscht.

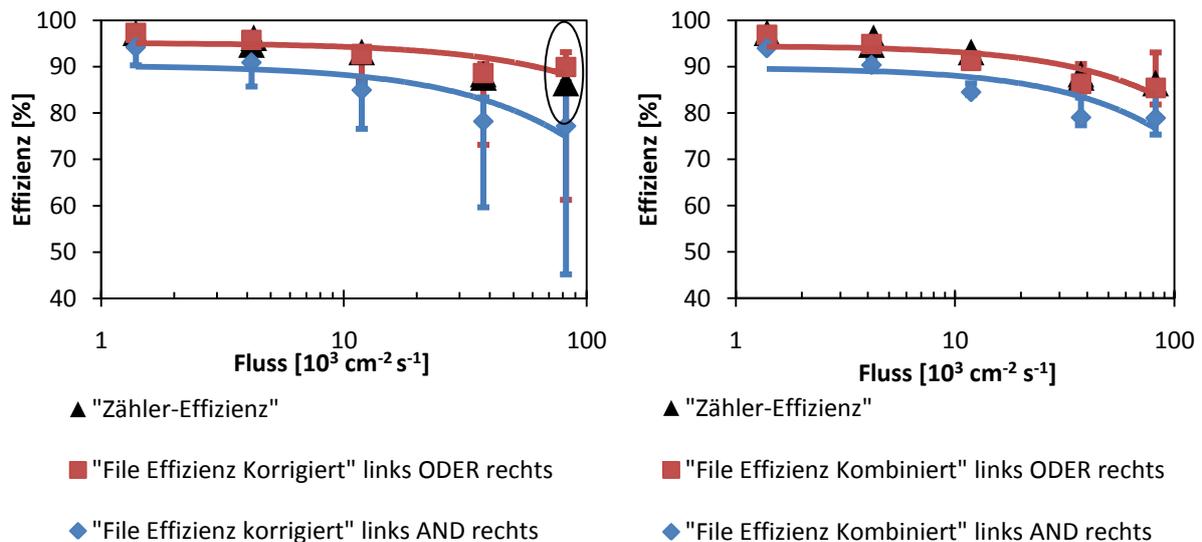


Abbildung 46: Vergleich der verschiedenen Effizienz-Definitionen. Für CRPC4 bei einer Betriebsspannung von 6,4kV. Links: "File Effizienz Korrigiert". Der markierte Bereich zeigt die Systematische Überschätzung des Systems. Rechts: "File Effizienz Kombiniert"

Aufgrund der Ratenfestigkeit, die für alle untersuchten Detektoren unter 13 MHz liegt, wird es wahrscheinlicher, dass der Detektor ein Elektron nicht registriert, wenn er bereits ein vorangegangenes Elektron registriert hat. Dies führt zwangsläufig zu einer Überschätzung der Effizienz. Unter Zuhilfenahme der Ladungsinformation kann dieser Effekt vermieden werden.

5.4.9 QUANTITATIVE BESTIMMUNG DER RATENFESTIGKEIT

Nachdem in vorangegangenen Abschnitten die genaue Struktur der Ereignisse untersucht wurde und ein eher qualitatives Bild der Möglichkeiten und auch der Reglementierungen der Offline Daten gemacht wurde, soll in diesem Abschnitt mit den gewonnenen Erkenntnissen die Ratenfestigkeit bestimmt werden. Hierzu muss noch einmal betont werden, dass es für die Verwendung des RPC als Timing Detektor von großer Wichtigkeit ist, dass beide Seiten des RPCs ein gültiges Signal haben. Deswegen kann die Zähler-Effizienz grundsätzlich nicht zur Bestimmung der Ratenfestigkeit genommen werden, da es für sie ausreicht, dass eine der beiden Seiten ein "Signal" hat.

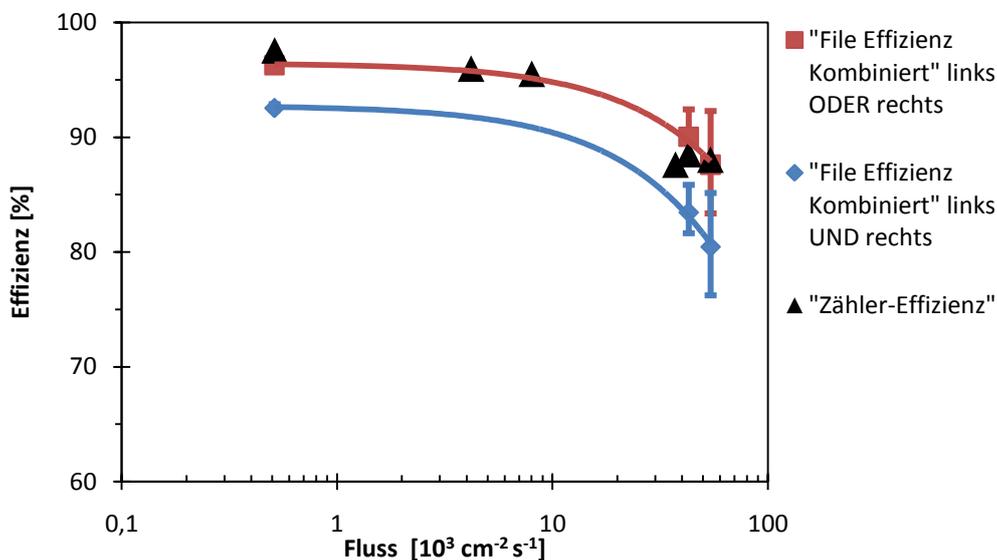


Abbildung 47: Effizienz des CRPC4 als Funktion des Flusses bei einer Betriebsspannung von 6,5 kV (Strahlzeit: November 2010)

Zur besseren Vergleichbarkeit werden nur Datenreihen verwendet, die zeitlich direkt nacheinander genommen wurden, da es durchaus möglich ist, dass sich Parameter insbesondere vom Beschleuniger zeitlich ändern. Zur besseren Übersichtlichkeit wird an dieser Stelle nur jeweils eine Abbildung pro Detektor gezeigt. Die restlichen Abbildungen befinden sich im Anhang. In Abbildung 47 ist zu erkennen, dass durch die Verwendung der Ladungsinformation sich die Werte der "Zähler Effizienz" gut reproduzieren lassen. Wie bereits in der Vorbetrachtung zu diesem Kapitel beschrieben, ist davon auszugehen, dass für niedrige Flüsse die Zähler-Effizienz kaum Fehler hat. Deswegen kann die "Zähler Effizienz" in diesem Bereich als Vergleichswert dienen. Zur Bestimmung der Ratenfestigkeit diente eine lineare Approximation durch die "File-Effizienz korrigiert 'links UND rechts'" Werte. Die Werte für minimale und maximale Ratenfestigkeiten ergeben sich aus den Fehlern der linearen Approximation. Die Fehler der Datenpunkte gehen nicht in die lineare Approximation ein. Des Weiteren fällt auf, dass die "File Effizienz korrigiert 'links UND rechts'" in für alle untersuchten Betriebsspannungen selbst für niedrige Flüsse unter 95 % liegt. Um den Anforderungen des CBM Projekts gerecht zu werden kann die Anzahl der Gasspalte erhöht werden wodurch sich die Effizienz verbessert.

Tabelle 7: Ratenfestigkeit des CRPC4

Betriebsspannung [kV]	Ratenfestigkeit der Effizienz [$10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	Fehler (-) [$10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	Fehler (+) [$10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
6,0	27	22	33
6,4	31	17	136
6,5	22	8	23

In Tabelle 7 sind die Ratenfestigkeiten für CRPC4 angegeben. Auffallend ist der weite Bereich, in dem sich die Ratenfestigkeit bewegt. Das darf nicht weiter verwundern, da nur sehr wenige Datenpunkte für die lineare Approximation zur Verfügung standen. Zusammenfassend kann gesagt werden das, der ermittelte Wert der Ratenfestigkeit bei $(3 \pm 2) \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ liegt. Bei der Bestimmung der Ratenfestigkeit hat sich allerdings herausgestellt, der Verlauf von CRPC4 zum Teil erheblich vom erwarteten linearen Verlauf abweichen. Dieser Effekt bleibt in der Arbeit unbehandelt.

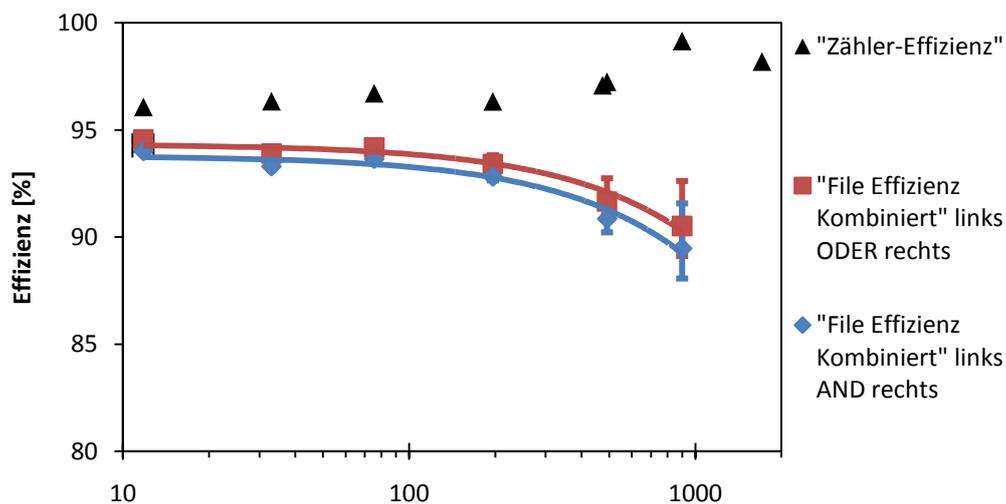


Abbildung 48: Effizienz des CRPC2 als Funktion des Flusses bei einer Betriebsspannung von 5,8 kV (Strahlzeit: Februar 2010)

In der Vorbetrachtung zur "Zähler-Effizienz" wurde beschrieben, dass bei der "Zähler-Effizienz" bis zu drei Elektronen den Detektor, im untersuchten Zeitfenster, treffen können. In Abbildung 48 ist dieser Effekt gut zu erkennen. So nimmt die "Zähler-Effizienz" nicht ab sondern zu. Dies lässt sich über die Zunahme an Elektronen pro Zeitfenster erklären. Aus Tabelle 8 ist zu entnehmen, dass die Ratenfestigkeit des CRPC2 in der Größenordnung $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ liegt. Dies sind zwei Größenordnungen mehr als bei CRPC4.

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

Tabelle 8: Ratenfestigkeit des CRPC2

Betriebsspannung [kV]	Ratenfestigkeit der Effizienz [$10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	Fehler (-) [$10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	Fehler (+) [$10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
5,8	1,0	0,8	2
6,0	---	---	---
6,2	1,3	0,7	4,3
6,4	0,8	0,2	0,3

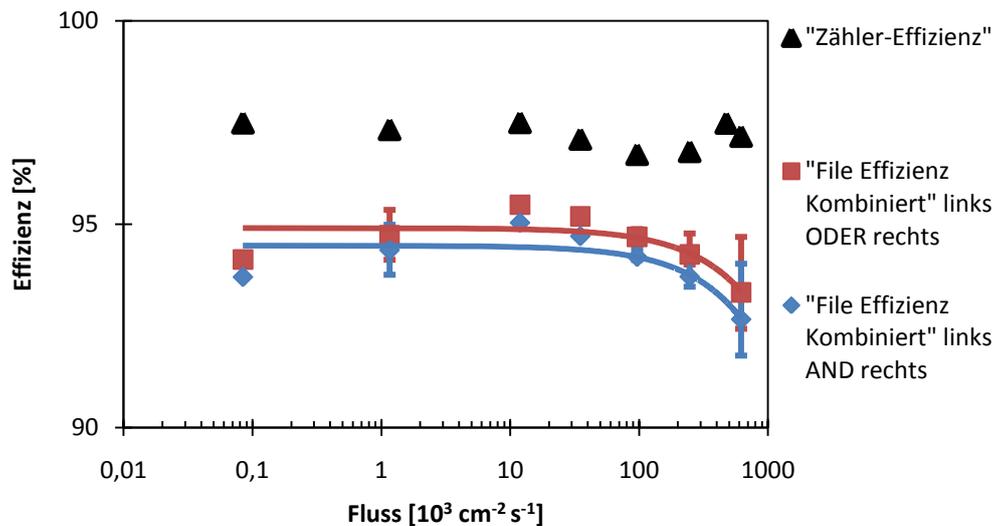


Abbildung 49: Effizienz des CRPC1 als Funktion des Flusses bei einer Betriebsspannung von 5,8 kV (Strahlzeit: Februar 2010)

Tabelle 9: Ratenfestigkeit des CRPC1 (Strahlzeit: Februar 2010)

Betriebsspannung [kV]	Ratenfestigkeit der Effizienz [$10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	Fehler (-) [$10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	Fehler (+) [$10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
5,8 kV	1,5	0,5	1,2
6,0 kV	2,6	1,0	4,6

Tabelle 10: Ratenfestigkeit des CRPC1 (Strahlzeit: Juni 2010)

Betriebsspannung [kV]	Ratenfestigkeit der Effizienz [$10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	Fehler (-) [$10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	Fehler (+) [$10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
5,8	1,8	0,7	3,9
6,0	1,9	0,8	6,7
6,2	2,5	0,6	1,1
6,4	2,4	0,8	2,5
6,5	1,9	0,5	1,0

Für CRPC1 existieren kaum Messpunkte bei ausreichend hohen Flüssen, deswegen ist es sehr schwer die Ratenfestigkeit zu extrapolieren. Es kann lediglich gesagt werden, dass sich, im Rahmen der Unsicherheiten, CRPC1 und CRPC2 gleich verhalten. In Abbildung 50 ist zu sehen, dass die Ratenfestigkeit für CRPC1 CRPC2 für alle Betriebsspannungen im Rahmen der Fehler konstant ist. Es muss darauf hingewiesen werden, dass alle Punkte von der Juni 2010-Messung bei deutlich niedrigerem Fluss gemessen wurden und es sich hierbei um eine sehr weite Extrapolation handelt. Auffallend ist dennoch, dass die extrapolierten Werte recht gut zu den gemessenen Werten der Februar 2010 -Strahlzeit passen. Es kann gezeigt werden, dass die Ratenfestigkeit für CRPC1 und CRPC2 in der Größenordnung um $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ liegt.

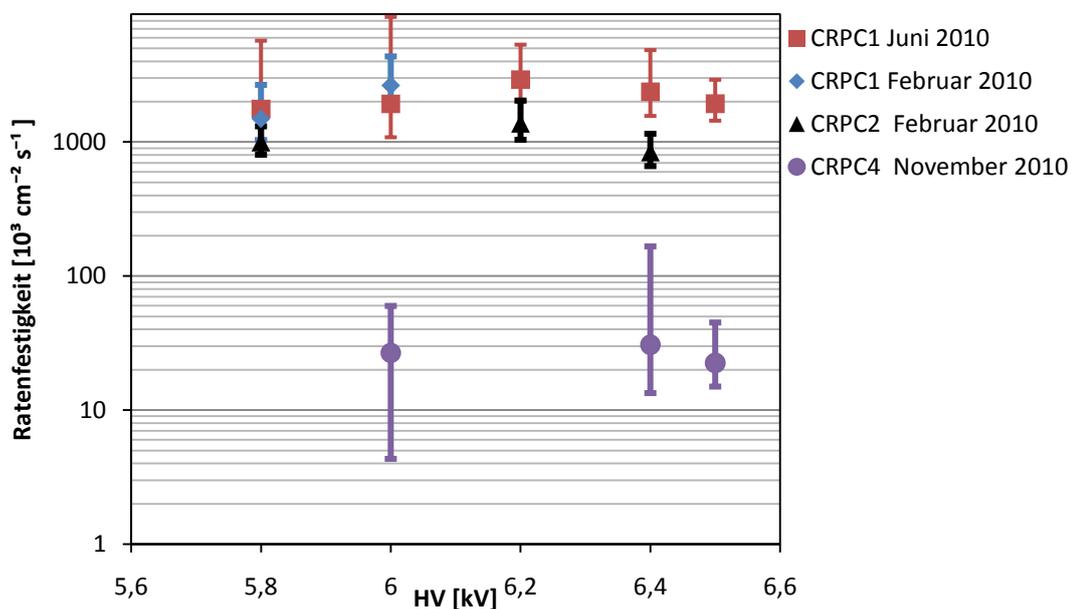


Abbildung 50: Ratenfestigkeit der Effizienz für alle betrachteten CRPC als Funktion der Betriebsspannung. Ratenfestigkeit der Effizienz bezeichnet den Teilchenfluss, bei dem die Effizienz um 5% abgesunken ist [5]

5.4.10 EXEMPLARISCHE VERBESSERUNG DER "FILE-EFFIZIENZ" DURCH VERWENDUNG DER SZINTILLATIONSDETEKTOREN

In Abschnitt 5.4.4 wurde bereits festgestellt, dass die "File-Effizienz" nicht die Verunreinigung durch mehrere Elektronen pro Paket korrigiert. Hierzu können theoretisch die Szintillationsdetektoren verwendet werden, da diese ladungssensitiv sind. In der Praxis kommt es allerdings bei hohen Flüssen zu Fehlern bei der Ermittlung der Signalhöhe der Szintillationsdetektoren. In Abbildung 51 ist zu erkennen, dass sich die Spektren stark mit dem Teilchenfluss ändern. Zum einen ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Fluss der 2 Elektronen Peak deutlich zunimmt. Zur weiteren Verbesserung der "File-Effizienz" besteht nun die Möglichkeit, nur Ereignisse zu verwenden, die unterhalb einer gewissen Ladungsschwelle liegen. Des Weiteren ist zu erkennen, dass bei einem Teilchenfluss von

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

$\sim 9 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ praktisch alle Ereignisse im Pedestal liegen. Dies ist eine Grenze der Anwendung dieser Szintillationsdetektoren und kann nicht in der Datenanalyse korrigiert werden. Aus diesem Grund bleibt für diesen Teil der Auswertung nur übrig, die Messpunkte bei hohen Raten zu ignorieren.

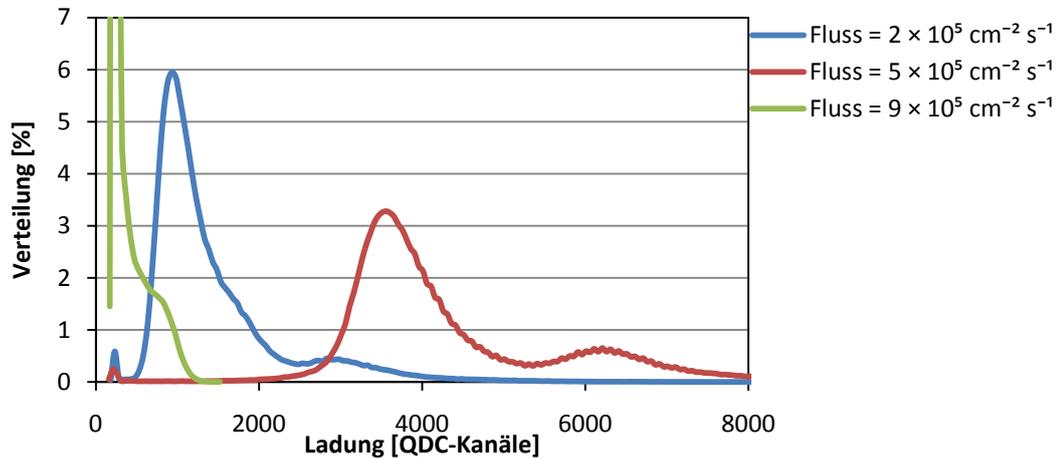


Abbildung 51: Vergleich der Ladungsspektren des Szintillationsdetektors S1 für verschiedenen Teilchenflüsse

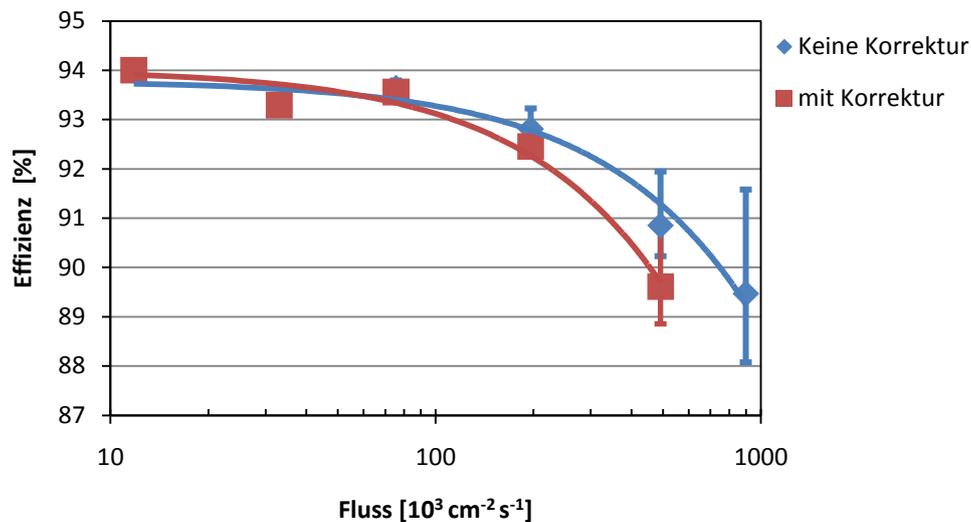


Abbildung 52: Vergleich der "File-Effizienz" mit und ohne Korrektur durch den Szintillationsdetektor für CRPC2 bei einer Betriebsspannung von 5,8 kV. Ratenfestigkeit der Effizienz bezeichnet den Teilchenfluss bei dem die Effizienz um 5% abgesunken ist [5]

In Abbildung 52 ist zu erkennen, dass mit Berücksichtigung der Information aus den Szintillationsdetektoren sich die "File-Effizienz" weiter reduziert. Leider ist diese Auswertung nicht für alle Messreihen möglich, da es Probleme mit den Informationen aus den Szintillationsdetektoren gab. Aus diesem Grund soll an dieser Stelle nur qualitativ verglichen werden, wie sich die korrigierte Ratenfestigkeit zur unkorrigierten verhält. Abbildung 53 stellt den Vergleich der verschiedenen Ratenfestigkeiten für ausgewählte Messreihen dar. Es ist zu erkennen, dass die ermittelten Werte der Ratenfestigkeiten gut mit den in Abschnitt 5.4.4 ermittelten Werten übereinstimmen. Demnach

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

sollte es umgekehrt auch möglich sein, die korrigierte Ratenfestigkeit mit der Funktion in Abbildung 53 zu ermitteln. Dies ist in Abbildung 54 dargestellt, man erkennt, dass sich durch die Korrektur die Ratenfestigkeit etwa halbiert hat. Es ergibt sich aber qualitativ keine neue Aussage, da die Ratenfestigkeit nur größenordnungsmäßig bestimmt werden kann. Die Fehlerbalken in Abbildung 54 beziehen sich lediglich auf den Fehler der linearen Approximation.

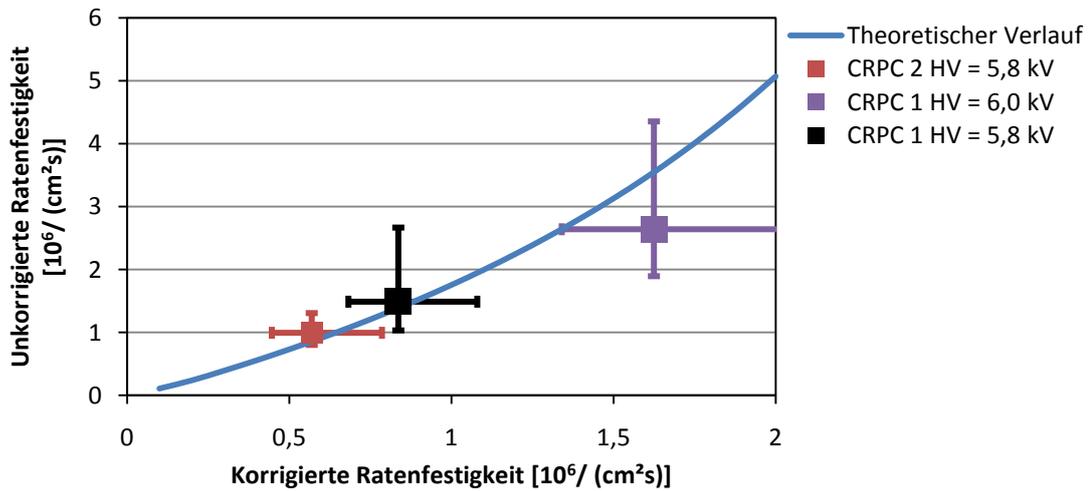


Abbildung 53: Vergleich der Ratenfestigkeiten der Effizienz mit und ohne Korrektur durch die Daten aus den Szintillationsdetektoren für ausgewählte Messreihen. Der theoretische Verlauf ergibt sich aus den Abschätzungen in Kapitel 5.4.4. Ratenfestigkeit der Effizienz bezeichnet den Teilchenfluss bei dem die Effizienz um 5% abgesunken ist [5]

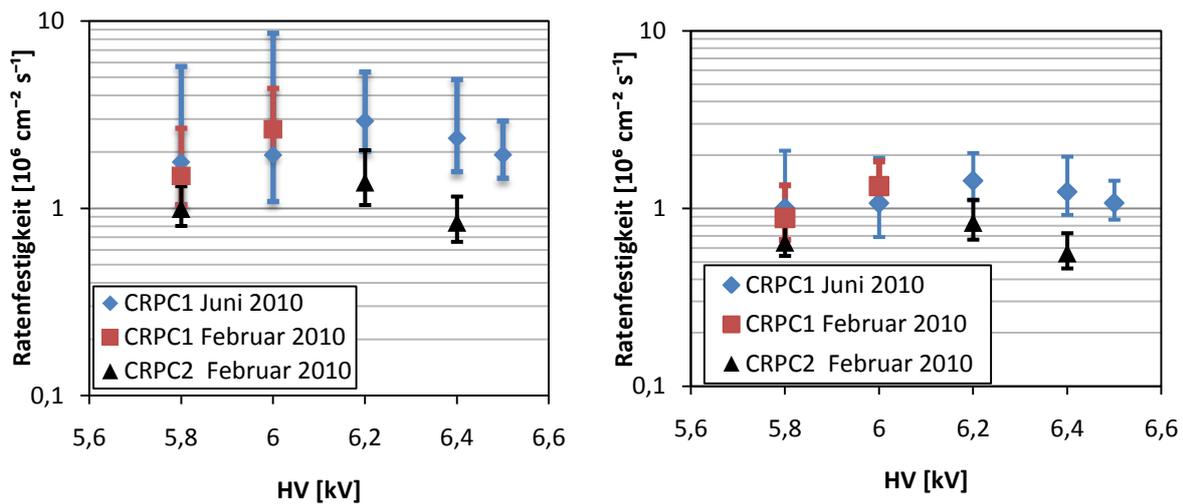


Abbildung 54: Ratenfestigkeit der Effizienz für die kleinen RPC Detektoren. Links: ohne Korrektur durch die Szintillationsdetektoren, rechts: mit Korrektur. Ratenfestigkeit der Effizienz bezeichnet den Teilchenfluss bei dem die Effizienz um 5% abgesunken ist [5]

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

5.4.11 EFFIZIENZ ALS FUNKTION DER POSITION

Im Folgenden soll nun untersucht werden, wie sich die Effizienz mit der Position verändert.

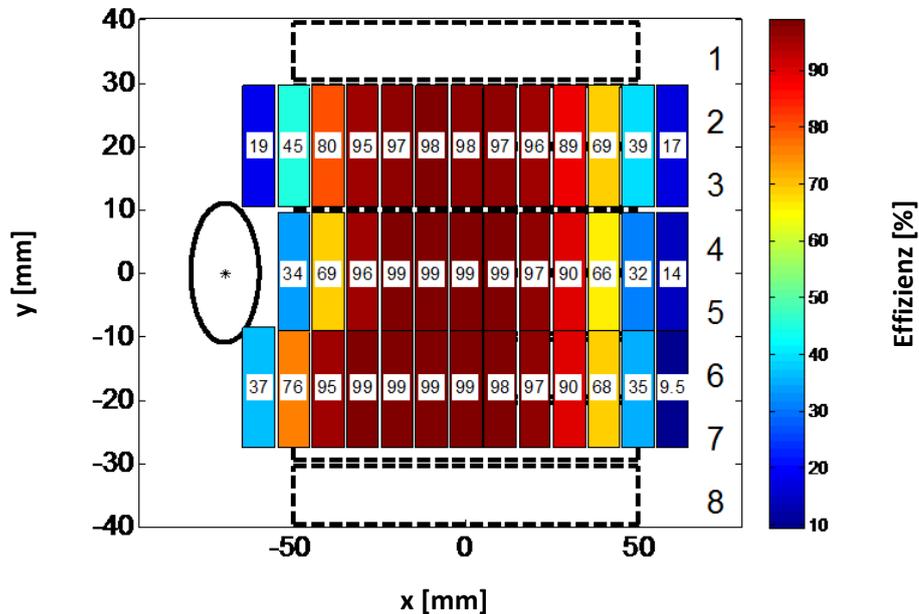


Abbildung 55: Effizienz als Funktion der x- und y-Position für CRPC1. Die Zahlen in den farblichen Bereichen geben die Effizienzen in Prozent an den jeweiligen Punkten an. Die schwarzen gestrichelten Linien repräsentieren die einzelnen Streifen des RPCs. Die Zahlen am rechten Rand geben die Nummer des dazugehörigen Streifens an. Die Elipse an der linken Seite gibt das Strahlprofil wieder

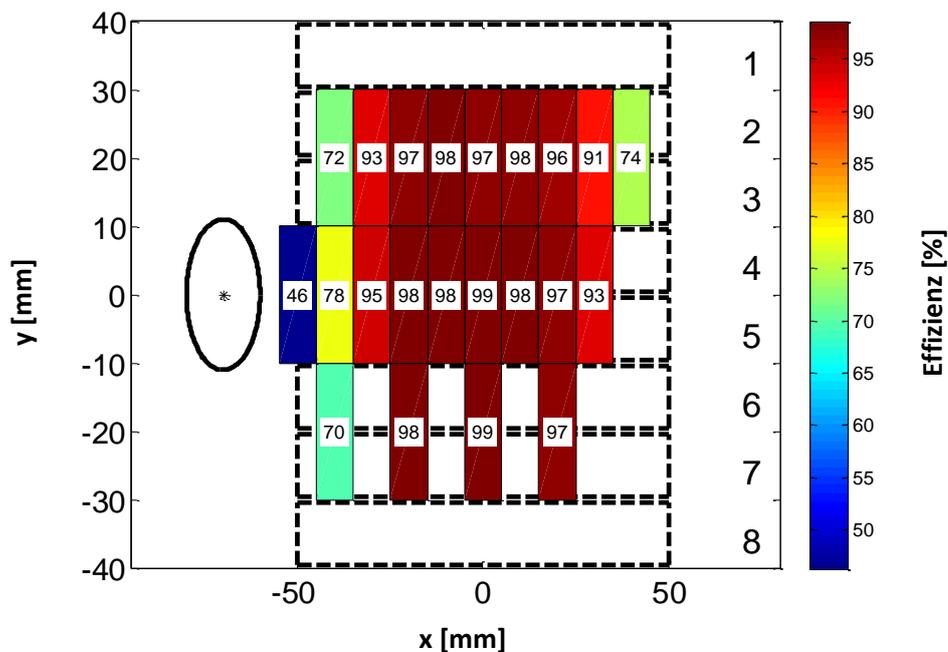


Abbildung 56: Effizienz als Funktion der x- und y-Position für CRPC2. Die Zahlen in den farblichen Bereichen geben die Effizienzen in Prozent an den jeweiligen Punkten an. Die schwarzen gestrichelten Linien repräsentieren die einzelnen Streifen des RPCs. Die Zahlen am rechten Rand geben die Nummer des dazugehörigen Streifens an. Die Elipse an der linken Seite gibt das Strahlprofil wieder

In den Abbildung 55 und Abbildung 56 ist die "Effizienz" als Funktion der x- und y-Position gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Effizienz bei beiden Detektoren zu den Rändern hin abnimmt. Dies ist damit zu erklären, dass am Rand nicht sichergestellt ist, dass der RPC wirklich getroffen wurde. Deswegen handelt es sich bei diesen Strahlagen nicht mehr um eine repräsentative Stichprobe, wodurch der Rückschluss auf die Gesamtheit nicht mehr sinnvoll ist. Es ist davon auszugehen, dass die Effizienz auch am Rand deutlich höher ist als in Abbildung 55 und Abbildung 56 gezeigt ist.

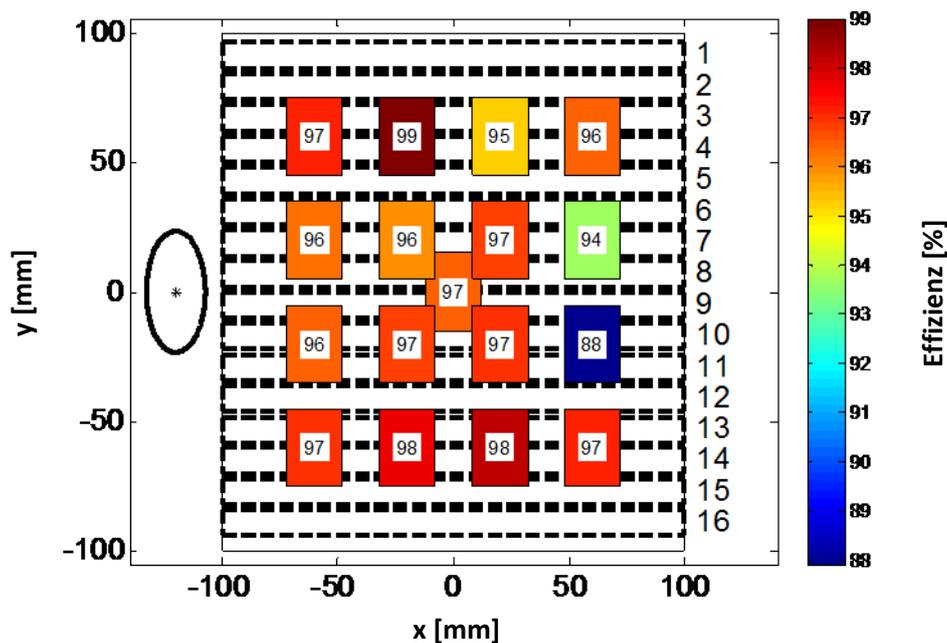


Abbildung 57: Effizienz als Funktion von x- und y-Position. Teilchenfluss = $2,4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ für CRPC4

Der Detektor CRPC4 wird gesondert betrachtet, da er ein anderes Verhalten zeigt als CRPC1 und CRPC2. In Abbildung 57 ist zu erkennen, dass für niedrige Flüsse die Effizienz relativ¹⁰ homogen und relativ hoch ist. Mit zunehmendem Fluss verschlechtert sich die Effizienz deutlich. Zusätzlich nimmt auch die Homogenität deutlich ab. In Abbildung 58 ist zu erkennen, dass die unteren Streifen eine signifikant höhere Effizienz haben als die oberen.

¹⁰ "Relativ hoch" und "relativ homogen" bezieht sich auf die später deutlich schlechteren Werte und ist somit kein absoluter Maßstab.

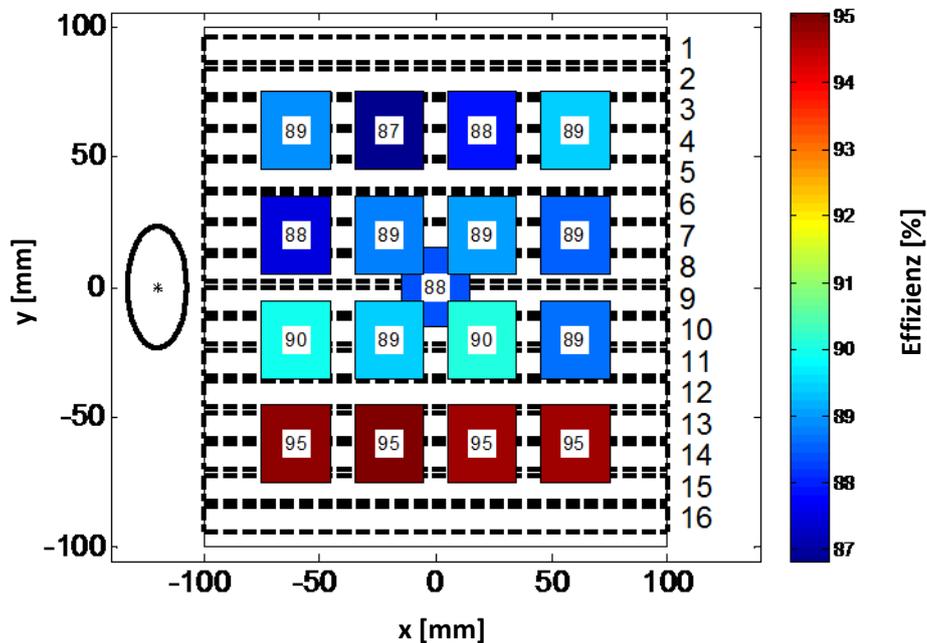


Abbildung 58: Effizienz als Funktion von x- und y-Position. Teilchenfluss $=42 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ für CRPC4

5.4.12 AKTIVE BEREICHE

Für die spätere Auswertung wird es wichtig sein zu bestimmen, in welchen Bereichen der Detektor ein Signal auflösen kann. Hierzu ist es von Bedeutung zu wissen, dass der Elektronenstrahl ein Gaußprofil mit einem FWHM von mehreren Zentimetern hat und die Triggerszintillatoren querschnitte von $2 \times 2 \text{ cm}^2$ haben. Damit ist ein Abfallen der Effizienz an den Seiten nicht unbedingt mit einer niedrigen Effizienz in diesem Bereich gleichzusetzen. Vielmehr ist es ein erwartetes Verhalten, da der Elektronenstrahl nicht mehr voll den Detektor trifft.

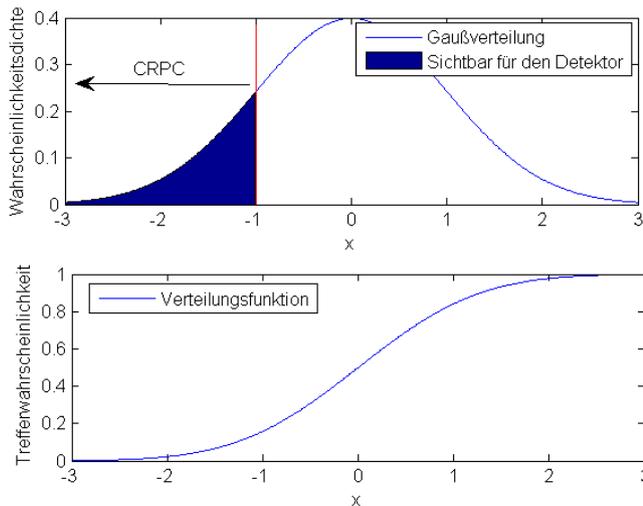


Abbildung 59: Oben: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion einer Gaußverteilung mit $\mu=0$ und $\sigma=1$.
Unten: Verteilungsfunktion einer Gaußverteilung mit $\mu=0$ und $\sigma=1$.

Abbildung 59 soll verdeutlichen, dass am Rand des RPCs die mit den verschiedenen Methoden erhaltene Effizienz nicht von der Effizienz des RPCs bestimmt wird, sondern von der Wahrscheinlichkeit, dass der RPC getroffen wird. Mit diesem Wissen kann eine Fit Funktion definiert werden:

$$f(x, a, b, \sigma, \varepsilon) = \varepsilon \times (\Phi(x, a, \sigma) - \Phi(x, b, \sigma)) \quad (19)$$

mit:

$$\Phi(x, \mu, \sigma) = \int_{-\infty}^x \frac{dt}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (20)$$

mit

- x Strahlposition
- a Anfang des aktiven Bereiches
- b Ende des aktiven Bereiches
- σ Standardabweichung des Elektronenstrahls
- ε Effizienz des Detektors

Wichtig an dieser Stelle ist, dass bei der Fit Funktion die Standardabweichung als ortsunabhängig angenommen wird, sie aber nicht auf den nominellen Wert der Standardabweichung fixiert wird. Da für die Effizienzbestimmung auch die Detektoren hinter dem RPC verwendet werden und somit nur ein kleiner Teil des Strahls verwendet wird, kann nicht davon ausgegangen werden, dass der untersuchte Ausschnitt an Elektronen die gleiche Verteilung hat, wie das Strahlprofil.

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

Wie in der Vorbetrachtung beschrieben, kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Effizienz am Rand mit der verwendeten Methode richtig wiedergegeben wird. Deswegen ist zur Bestimmung der aktiven Detektorfläche ein Vergleich mit dem erwarteten Verhalten nötig.

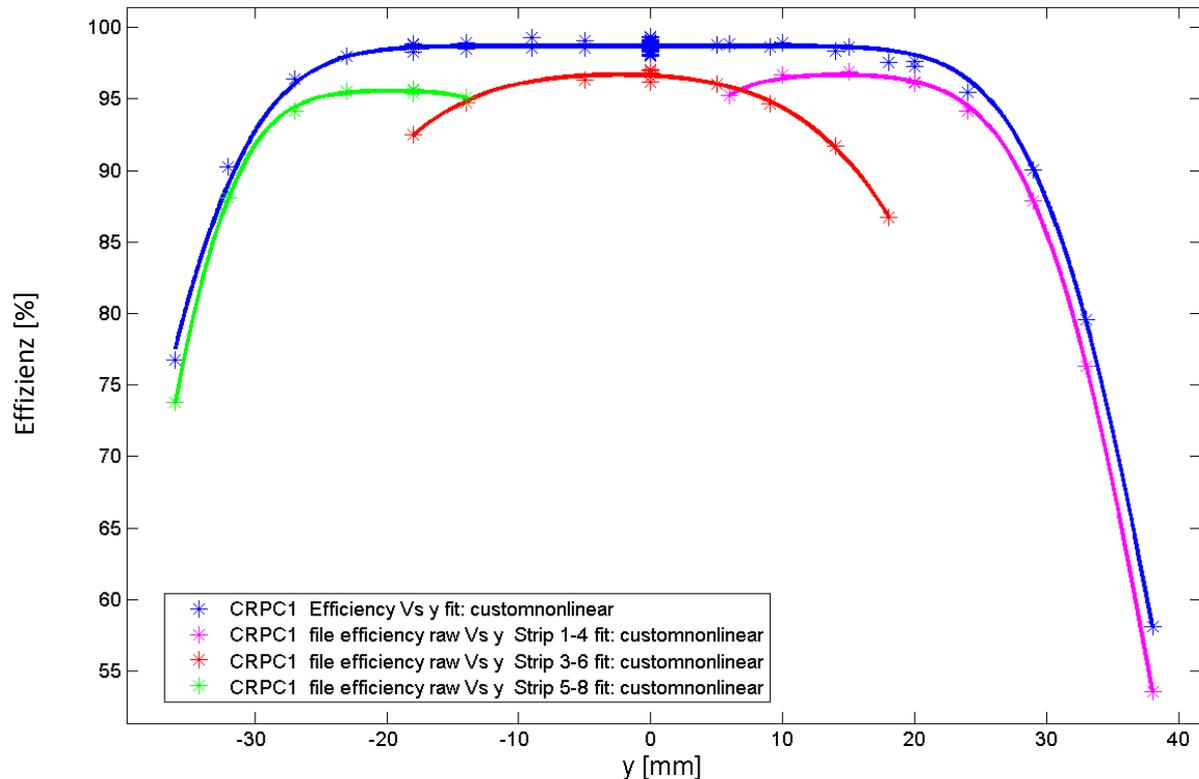


Abbildung 60: Effizienz als Funktion der y-Position für $x = 0$ und Teilchenfluss $2 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Abbildung 60 zeigt, dass die getroffenen Annahmen die Wirklichkeit ziemlich gut widerspiegeln. Desweiteren ist zu sehen, dass die Zähler-Effizienz und die File-Effizienz sehr ähnliches Verhalten zeigen. Es sind leichte Unterschiede zu erkennen. So ist die File Effizienz etwas kleiner als die Zähler Effizienz. Dies wird damit erklärt, dass nur jeweils 4 Streifen angeschlossen waren und der Rest für die File Effizienz blind ist.

Tabelle 11: Ergebnisse des Fits

	Zähler-Effizienz	File-Effizienz
Start des aktiven Bereichs	-42,3 mm	-40,5 mm
Ende des aktiven Bereichs	39,8 mm	39,0 mm
Länge des aktiven Bereichs	82,1 mm	79,5 mm
Effizienz	98,7 %	96,7 %
Strahlgröße 1σ	7,9 mm	8,4 mm

In Tabelle 11 ist zu erkennen, dass der Detektor praktisch über die gesamte Fläche aktiv ist. Wichtig ist zu erwähnen, dass die Strahlgröße deutlich kleiner geschätzt wird als das gemessene Strahlprofil vermuten lässt. Wie in der Vorbetrachtung erklärt, ist dies darauf zurückzuführen, dass nur ein kleiner Ausschnitt der Elektronen für diese Art der Messung verwendet wird.

In y-Richtung ist diese Form der Auswertung leider nur für CRPC1 möglich, da wie in Abbildung 56 zu sehen ist, bei CRPC2 lediglich drei verschiedene y-Positionen gemessen wurden. In x-Richtung sehen die Fits wie in der Abbildung 61 dargestellt aus:

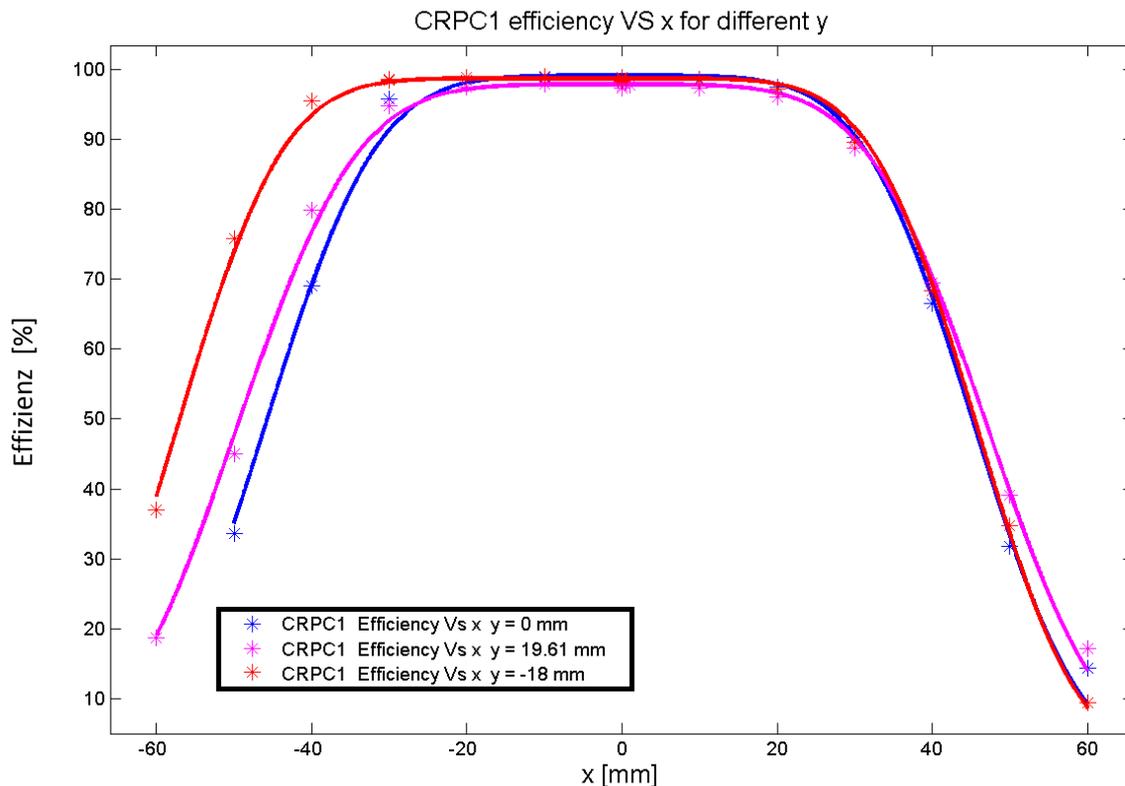


Abbildung 61: Effizienz als Funktion der x-Position für CRPC1 bei einer Betriebsspannung von 6,4 kV

Es fällt sofort der große Unterschied zwischen den Messungen bei $y = 0$ mm bzw. $y = +20$ mm und der Messung bei $y = -18$ mm auf. Hierbei ist nicht endgültig geklärt, wo dieser signifikante Unterschied herkommt. Eine Überlegung ist, dass sich die Strahleigenschaften geändert haben, da ELBE vor den letzten drei Messungen am linken Rand des CRPC für mehrere Stunden ausgefallen ist.

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

Tabelle 12: Fit Parameter

	y = 0 mm	y = ca.19 mm	y = -18 mm
Start des aktiven Bereichs	-45,8 mm	-49,6 mm	-57,2 mm
Ende des aktiven Bereichs	45,2 mm	47,1 mm	45,6 mm
Länge des aktiven Bereichs	91,0 mm	96,7 mm	102,8 mm
Effizienz	99,1 %	97,9 %	98,7 %
Strahlgröße 1σ	11,2 mm	12,1 mm	10,7 mm

Wie in Tabelle 12 zu erkennen ist, scheint der Detektor nicht ganz bis zum Rand aktiv zu sein. Es ist durchaus möglich, dass dieser Effekt lediglich in der Anodenstruktur am Rand (siehe Abbildung 62) begründet ist.

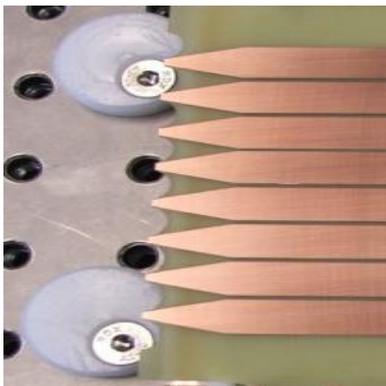


Abbildung 62: Anodenstruktur am Rande des Detektors

Abschließend kann gesagt werden, dass der Detektor, abgesehen von kleinen Bereichen am Rand, ein homogenes Verhalten zeigt. Besonders interessant ist dabei, dass der aktive Bereich in y-Richtung nur wenige Millimeter größer ist als der von den Streifen bedeckte Bereich. Dies legt die Vermutung nahe, dass es sich bei dem "Crosstalk" tatsächlich um elektromagnetisches Übersprechen der einzelnen Streifen handelt. Dies soll im nächsten Abschnitt genauer untersucht werden.

5.4.13 CROSSTALK, FOOTPRINT UND VIELTREFFER EREIGNISSE

1. Crosstalk

Mit Crosstalk ist in diesem Zusammenhang jedes Signal gemeint, welches nicht von einem Ereignis direkt unter dem Streifen herrührt. Grundsätzlich muss man verschiedene Arten des Crosstalks unterscheiden. Zum einen gibt es elektromagnetisches Übersprechen der einzelnen Streifen, zum anderen besteht die Möglichkeit, dass ein Nachbarstreifen die Ladungslawine unter einem anderen Streifen "spürt". Theoretisch besteht noch die Möglichkeit, dass das Übersprechen erst in der Ausleseelektronik geschieht, (dies soll aber nicht Teil der Analyse sein). Im ersten Fall handelt es sich um eine fehlerhafte Anpassung der kapazitiven bzw. induktiven Kopplung. Wichtig ist hierbei, dass es sich um eine sekundäre Reaktion der einzelnen Streifen handelt. Um die Begrifflichkeit festzulegen, wird diese Form des Crosstalks in dieser Arbeit als "Sekundärer Crosstalk" bezeichnet. Im Gegensatz dazu stellt das "Spüren" der Ladungslawine unter dem Nachbarstreifen eine primäre Reaktion da. Deswegen wird dieser Crosstalk im Weiteren als "Primärer Crosstalk" bezeichnet. Wegen dieser grundsätzlichen Unterschiede haben diese zwei Formen des Crosstalks sehr unterschiedliche Eigenschaften. So ist es beim "Sekundären Crosstalk" durchaus möglich, dass der Crosstalk von einem Streifen zum nächsten in abgeschwächter Form weiter gegeben wird. Damit ist die maximale Ausdehnung theoretisch nicht begrenzt, da das Signal ja immer von einem Streifen zum nächsten übermittelt werden kann. Ganz anders sieht es mit dem Primären Crosstalk aus. Dort ist es praktisch ausgeschlossen, dass das Signal über mehr als ein Streifen transportiert wird. Besonders deutlich wird dieser qualitative Unterschied in der Abbildung 63.

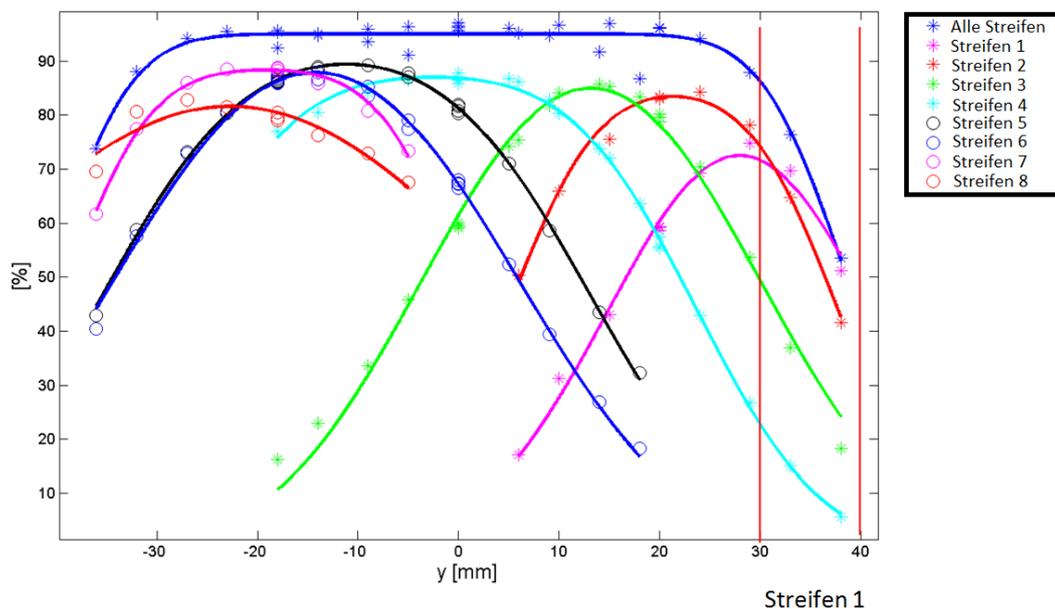


Abbildung 63: File Effizienz der Einzelnen Streifen als Funktion der Strahlage für den kleinen CRPC1 bei einer Betriebsspannung von 6,4 kV. Der rot markierte Bereich gibt die Position des Streifen 1 an. Es ist zu erkennen, dass der Streifen 1 seine maximale Effizienz über Streifen 2 erreicht

Abbildung 63 zeigt die File-Effizienz der einzelnen Streifen über die y-Position. Bei den Fit-Funktionen handelt es sich um Funktionen des Typs (19). Es fällt auf, dass die Verteilungen nach (19) deutlich breiter ist als die eigentliche Streifengröße. Besonders interessant ist Streifen 1, da er nur einen

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

Nachbarn hat. Die Keramikplatte würde auf dieser Abbildung bis $y = 50$ mm reichen. In diesen Bereichen kann es genauso zur Ionisation kommen. Der einzige Unterschied besteht darin, dass über diesem Bereich kein Auslestreifen ist. Somit ist "Sekundärer Crosstalk" ausgeschlossen. Dies erklärt das rasche Abfallen der Effizienz zum Rand des Detektors. Hingegen sind zur anderen Seite weitere Streifen. Deshalb nimmt die Effizienz in dieser Richtung auch nicht so stark ab. Infolgedessen erreicht die Effizienz des Streifens 1 das Maximum auch über Streifen 2. Durch diese klaren Unterschiede kann eindeutig gesagt werden, dass es sich bei dem Crosstalk hier hauptsächlich um "Sekundären-Crosstalk" handelt. Die Analyse von Abbildung 63 ergibt in Tabelle 13 aufgelisteten Werte.

Tabelle 13: Auswertung zur Abbildung

Streifen	Start des Sensitiven Bereiches [mm]	Ende des sensitiven Bereiches [mm]	Größe des sensitiven Bereiches [mm]	Strahlgröße [mm]	Effizienz [%]
1	16,3	39,7	23,4	10,7	100
2	4,6	38,4	33,8	7,1	85
3	-3,5	29,9	33,4	11,6	100
4	-28,7	23,7	52,4	9,1	88
5	-35,6	13,3	48,9	11,1	92
6	-34,4	6,0	40,4	12,6	98
7	-39,9	1,4	41,3	7,1	88
8	-50,0	4,6	54,6	20,6	100,00
Mittelwert			41,0	11,2	93,9

Es ist zu sehen, dass sich die Streifen, die eigentlich nur ca. 10 mm breit sind, wegen des Crosstalks so verhalten als ob sie im Durchschnitt 41 mm breit wären. Dadurch ist die Ortsauflösung praktisch komplett zerstört. Auch die Vieltreffer Fähigkeit ist dadurch stark eingeschränkt, da zwei Ereignisse mindestens 41mm auseinander liegen müssen, damit sie getrennt aufgelöst werden können. Wichtig an dieser Stelle ist, dass man diesen Crosstalk nicht überbewertet. Da es sich hierbei um einen experimentellen Prototypen handelt, wurde keinerlei Impedanzanpassung vorgenommen. Desweiteren besteht in der Methode der "Pulshöhenanalyse" ein Weg, um per Offline-Analyse zu bestimmen, welches Ereignis zu welchen Streifen gehört. Dies soll im Folgenden geschehen.

2. Footprint nach Pulshöhenanalyse

Es soll nun untersucht werden, wie sich durch die Pulshöhenanalyse der sensitive Bereich verändert. Dazu ist es gut, sich zu überlegen, wie ein ideales Ergebnis aussehen würde. Als Werte für das Rechenbeispiel wurde eine Effizienz von 98 % und eine Strahlgröße von $\sigma = 11$ mm angenommen. Diese Werte liegen in dem Bereich, den die beiden vorangegangenen Untersuchungen nahe legen. Untersucht werden aktive Bereiche von 1 mm bis 30 mm.

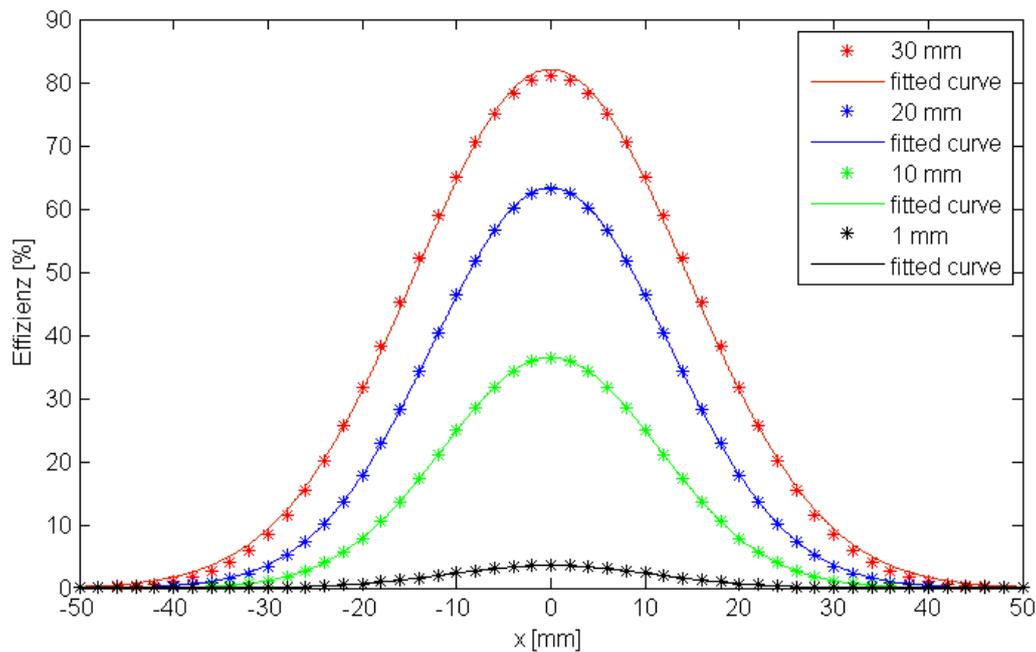


Abbildung 64: Ideales Verhalten eines einzelnen Streifens bei Erregung mit gaußförmigen Elektronenstrahlprofil

Tabelle 14: Auswertung zu Abbildung 64

Sensitiver Bereich	Peakhöhe	Standardabweichung
1 mm	3,5 %	11,0
10 mm	36 %	11,4
20 mm	63%	12,6
30 mm	82%	14,4

Die Werte in Tabelle 14 entstammen einem Gauß-Fit der Verteilung in Abbildung 64. Wie man sehen kann, geht die Fehlerfunktion für kleine sensitive Bereiche in eine Gaußfunktion über. Viel entscheidender ist, dass die Standardabweichung nur ganz gering ansteigt, wohingegen die Peakhöhe sich ganz beträchtlich ändert. Zu erwarten sind also gaußförmige Peaks mit einer Standardabweichung zwischen 11 und 12 mm und einer Höhe in der Größenordnung 40%. In Abbildung 65 ist zu sehen, dass die Überlappung deutlich zurück gegangen ist und die Peakhöhe nur knapp über den erwarteten 40% liegt. In Abbildung 65 sind 4 Punkte zu sehen, die deutlich aus dem Rest herausstechen. Eine Interpretation dieser Punkte ist, dass sie lediglich ein Artefakt der Verkabelung sind. Da zu der Messung nur vier Streifen jeweils ausgelesen wurden, ist klar, dass ein Verfahren, welches die Streifen mit ihren Nachbarn vergleicht, immer dann in Schwierigkeiten gerät, wenn die Information über die Nachbarn fehlt, was bei diesen Punkten der Fall ist. Diese Messpunkte wurden in der Auswertung gelassen, da es nicht Ziel der Auswertung ist, die besten Resultate zu erzielen, sondern ein Verfahren mit seinen Stärken und Schwächen vorzustellen.

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

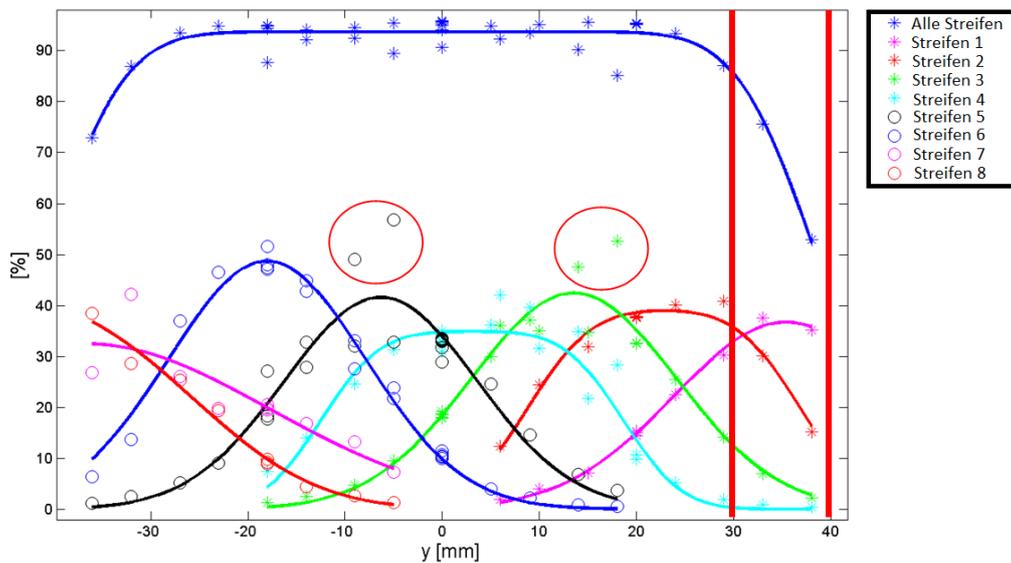


Abbildung 65: File Effizienz mit Pulshöhenanalyse der einzelnen Streifen als Funktion der Strahlgröße für den kleinen CRPC1 bei einer Betriebsspannung von 6,4 kV. Der rot markierte Bereich gibt die Position des Streifen 1 an.

Tabelle 15: Auswertung zur Abbildung. Streifen 8 wurde aus der Mittelwertbildung herausgenommen.

Streifen	Start des sensitiven Bereiches [mm]	Ende des sensitiven Bereiches [mm]	Größe des sensitiven Bereiches [mm]	Strahlgröße [mm]	Effizienz [%]
1	30,1	40,7	10,6	11,0	100
2	8,7	36,9	28,2	5,2	100
3	8,0	19,1	11,2	10,0	100
4	-12,5	18,6	31,1	4,8	35
5	-11,5	-1,2	10,3	9,4	100
6	-24,2	-11,9	12,3	9,4	100
7	-44,4	-29,0	15,4	18,4	100
8	(-112,7)	-25,6	(87,1)	10,1	43
Mittelwerte			17,0	9,9	84,8

Vergleicht man die Werte aus Tabelle 15 mit denen aus Tabelle 13 so fällt sofort die signifikante Verringerung der Größe des sensitiven Bereiches auf. Ohne Pulshöhenanalyse war der Mittelwert des sensitiven Bereiches ~ 41 mm. Mit Pulshöhenanalyse ist der Mittelwert auf ~ 17 mm gesunken, dies entspricht mehr als einer Verdoppelung der Ortsauflösung. Dass der Streifen 8 ein so sonderbares Resultat liefert, ist lediglich der geringen Anzahl an Messpunkten geschuldet. In Abbildung 66 ist deutlich die Güte dieses Verfahren zu sehen. Wichtig ist zu betonen, dass die Bedingungen für die Pulshöhenanalyse nicht optimal waren und trotzdem solche Ergebnisse erzielt werden konnten.

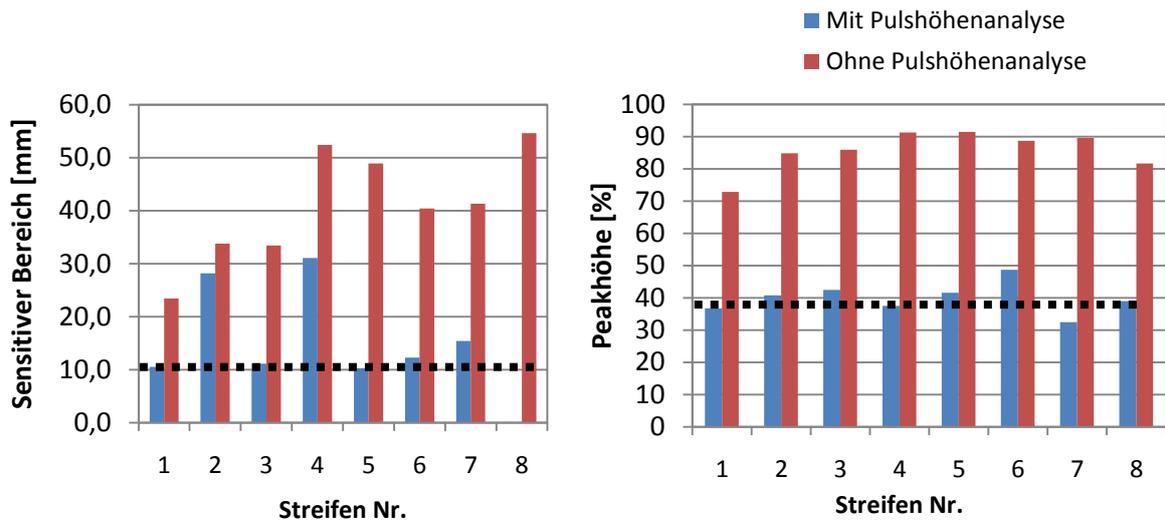


Abbildung 66: Vergleich des sensitiven Bereichs und der Peakhöhe des CRPC1 mit und ohne Pulshöhenanalyse. Die gestrichelte schwarze Linie entspricht Idealwert

3. Streifenmultiplizität "Clustergröße"

Mit Streifenmultiplizität ist gemeint, wie viele Streifen bei einem Treffer gleichzeitig ein Signal geben.

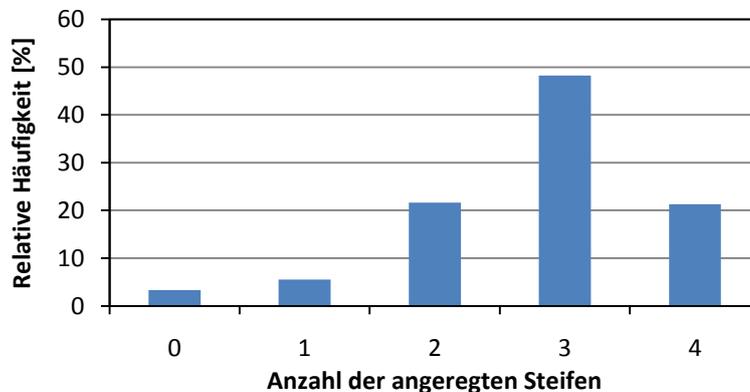


Abbildung 67: Streifenmultiplizität von CRPC1, bei einer Betriebsspannung von 6,2 kV und einem Teilchenfluss von $2 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

In Abbildung 67 ist zu erkennen, dass für die meisten Ereignisse drei oder mehr Streifen aktiv sind. Des Weiteren ist zu erkennen, dass, würde man alle Streifen auslesen, sich das Maximum zu höheren Multiplizitäten verschieben würde. Für die Ortsabhängigkeit der Multiplizität ist es wichtig, gleichartige Positionen zu verwenden. Das heißt im konkreten Fall, dass nur solche Ereignisse verwendet werden können, bei denen der Beamspot auf das Zentrum der untersuchten Streifen zentriert ist. Dies war bei den folgenden Messreihen der Fall. In Abbildung 68 ist zu erkennen, dass die Clustergröße zum Rand hin abnimmt. Die Abnahme der Clustergröße ist antikorreliert zur Entfernung, die das Signal zurücklegen muss.

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

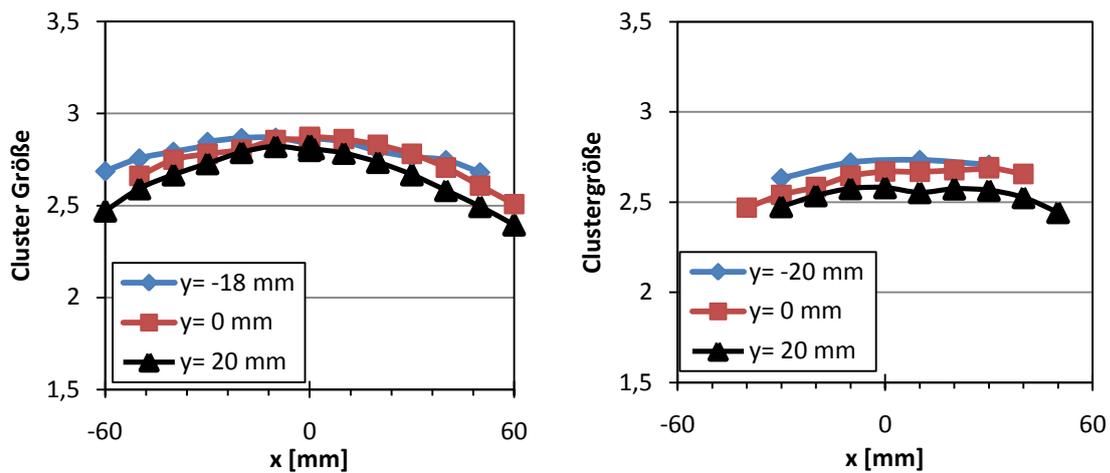


Abbildung 68: Clustergröße vs. x-Position. Links: CRPC1 bei einer Betriebsspannung von 6,4 kV und einem Teilchenfluss von $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Rechts: CRPC2 unter gleichen Bedingungen.

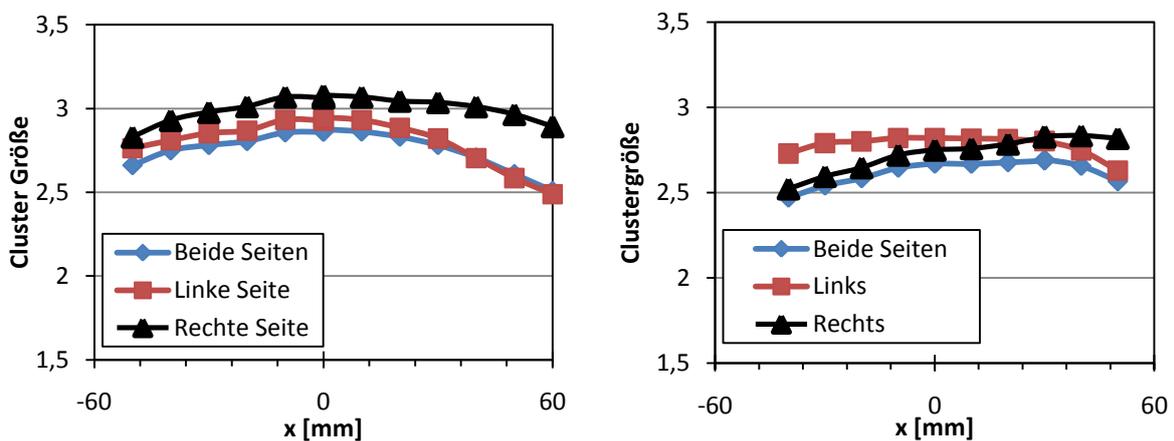


Abbildung 69: Vergleich der Clustergröße unter Verwendung nur einer bzw. beider Seiten des RPCs. Links: CRPC1. Rechts: CRPC2

In Abbildung 69 ist zu sehen, dass, sieht man von den äußersten Punkten ab, es eine klare Korrelation zwischen der Abnahme der Clustergröße und der Position auf dem Detektor gibt. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Signalhöhe mit zunehmender Strecke abnimmt. Es könnte mit zur schlechteren Effizienz des CRPC4 beitragen.

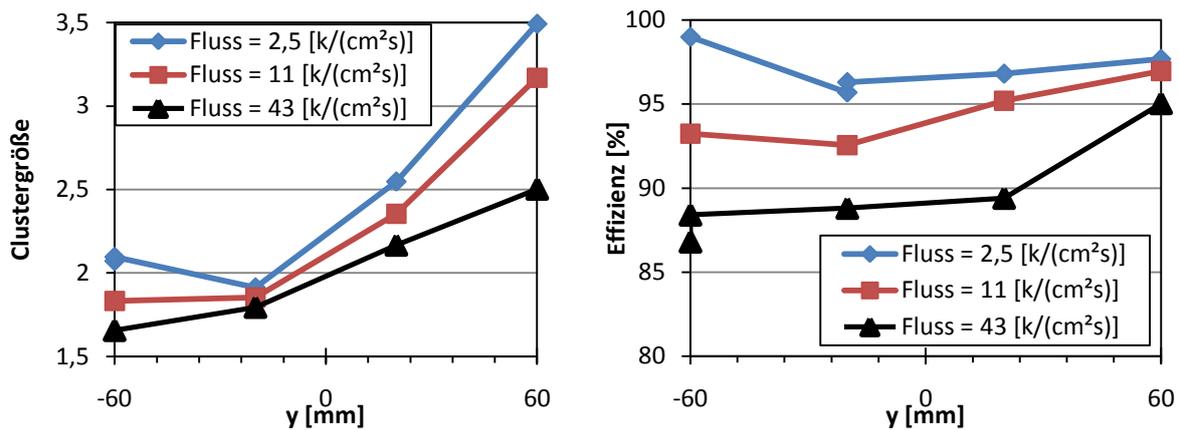


Abbildung 70: Links: Clustergröße als Funktion der y-Position. Rechts Effizienz als Funktion der y-Position.

In Abbildung 70 ist zu erkennen, dass sowohl die Clustergröße als auch die Effizienz deutlich von der y-Position abhängen. Hierfür gibt es zwei mögliche Erklärungen: der Detektor liefert im unteren Bereich größere Signale, die auch größere Crosstalk-Signale zur Folge hätten oder die Vorverstärker sind unten deutlich empfindlicher als oben. In der Offline Analyse ist es allerdings nicht möglich, die beiden möglichen Ursachen sicher zu unterscheiden. Deswegen ist für kommende Strahlzeiten eine veränderte Auslesemethode geplant. Dabei sollen die Vorverstärker so geschaltet werden, dass benachbarte Streifen von unterschiedlichen Vorverstärkern ausgelesen werden. Jede verbleibende y-Abhängigkeit stammt dann vom Detektor und nicht von den Vorverstärkern. Darüber hinaus sieht man, dass die Clustergröße für CRPC4 (Abbildung 70 links) kleiner ist als für CRPC1 und CRPC2 (Abbildung 68). Dies verwundert nicht, da bereits bei den kleinen Detektoren zu sehen war, dass die Clustergröße von der Entfernung zur Ausleseelektronik abhängt, die in diesem Fall größer ist als bei den kleinen RPCs.

5.4.14 ZUSAMMENFASSUNG

Der Abschnitt 5.4.2 widmete sich ausführlich der Quantität der Signale. Es konnte gezeigt werden, dass alle untersuchten Detektoren ein Plateau der Effizienz bei einer Betriebsspannung von 5,8 kV erreichen. Bei diesen Betriebsspannungen erreichte die "Zähler-Effizienz" für moderate Flüsse Werte deutlich über 95%. Bereits hierbei ist aufgefallen, dass CRPC4 bei höheren Flüssen nicht mehr die geforderte Effizienz von 95% erreicht. Aus diesem Grund sind zukünftige Detektoren dieses Typs mit 6-8 Gasspalten geplant.

Der Abschnitt 5.4.3 befassten sich intensiv mit der Bestimmung der Ratenfestigkeit. Hierzu war es zuerst wichtig zu erkennen, dass die bisher verwendete "Zähler-Effizienz" aus verschiedenen Gründen fehlerhaft ist. Hierzu wurde zuerst eine indirekte Methode verwendet, bei der lediglich die Zählraten der Szintillationsdetektoren mit der des RPC verglichen wurden. Hierbei konnte eine Sättigung der Zählrate des RPC beobachtet werden. Dies legte die Vermutung nahe, dass etwas mit der von uns definierten "Zähler-Effizienz" nicht stimmt. Diese Sättigung der Zählrate ließ sich, im Nachhinein, auf die Breite des RPC-Signals zurückführen. Diese betrug 200 ns, damit ist die Zählrate rechnerisch auf $5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ beschränkt. In der Praxis trat die Sättigung der Zählrate bereits bei $3 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ ein. Es ist klar, dass es keinen Sinn macht, Erkenntnisse über die Effizienz in einem Bereich

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

zu suchen, in dem sich die einzelnen Impulse bereits überlappen. Um die Unsicherheit etwas mehr zu quantifizieren, wurde während der April 2011 Strahlzeit ein verzögertes RPC Signal benutzt, um die Anzahl der zufälligen Koinzidenzen abschätzen zu können. Es stellte sich heraus, dass bei einem Fluss von $5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ es in 50% der Fälle zu zufälligen Koinzidenzen kommt. Dies allein wäre noch nicht gravierend, problematisch wird es dadurch, dass es bei einem Zeitfenster von 200 ns durchaus möglich ist, dass mehrere Elektronen in diesem Bereich ankommen können. Mit den 50 % zufälligen Koinzidenzen lässt sich lediglich die Größenordnung abschätzen, mit der dieser Fehler auftritt. Quintessenz dieses Kapitels ist, dass Alternativen zur bisherigen verwendeten "Zähler-Effizienz" gefunden werden mussten.

Als Alternative wurde in Abschnitt 5.4.5 die "File-Effizienz" eingeführt. Es stellte sich schnell heraus, dass es viel Verständnis bedarf, um aus den "Daten-Files" die Effizienz zu extrahieren. Es wurden drei Definitionen gefunden. Erstens "File-Effizienz-RAW" hierbei handelte es sich, um die "File-Effizienz", die man aus dem Zeitspektrum erhält ohne es zu verändern. Für niedrige Flüsse liefert diese Methode durchaus brauchbare Daten. Allerdings zeigt sich bei hohen Flüssen, dass diese Definition fehlerhaft ist und es zu einer systematischen Unterschätzung der Effizienz kommt. Um dies zu korrigieren wurde eine zweite Definition eingeführt, die "File-Effizienz-Korrigiert". Bei dieser wird das TDC-Spektrum nicht nur in "Signal" und "Rausch" Ereignisse unterteilt, sondern in "Vor-Trigger-Ereignisse", "Signal" Ereignisse und "Nach-Trigger-Ereignisse". Letztere wurden als statistische Verunreinigung erkannt und herausgefiltert. Durch das Herausfiltern der "Nach-Trigger-Ereignissen" konnte die Effizienz in weiten Bereichen gut bestimmt werden. Es stellte sich aber heraus, dass diese Definition bei hohen Flüssen dazu neigt, die Effizienz zu überschätzen. Für die dritte Methode wurde zusätzlich zu den TDC Signalen auch die Information der QDC verwendet. Mit der so erhaltenen "File-Effizienz-Kombiniert" war es möglich, die Effizienz hinreichend genau zu bestimmen.

In Abschnitt 5.4.9 wurde die Ratenfestigkeit quantitativ bestimmt. Die erste Überlegung dieses Kapitels war: wie gut ist die "File-Effizienz" in der Lage, bekannte Werte zu reproduzieren. Dabei waren vor allem die Werte des CRPC4 interessant, da dessen Ratenfestigkeit in einem Bereich liegt, in dem davon auszugehen ist, dass die "Zähler-Effizienz" brauchbare Werte liefert. Bei diesem Vergleich konnte festgestellt werden, dass für niedrige Flüsse die Übereinstimmung sehr gut ist. Für den CRPC 4 konnte eine Ratenfestigkeit von $(3 \pm 2) \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ermittelt werden. Für CRPC1 und CRPC2 konnte jeweils eine Ratenfestigkeit in der Größenordnung $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ermittelt werden.

In Abschnitt 5.4.11 wurde der Frage nachgegangen, ob die Effizienz homogen über den gesamten Detektor ist. Dies konnte, zumindest für die kleinen RPCs, positiv beantwortet werden. Innerhalb des Bereiches, in dem davon auszugehen ist, dass der Elektronenstrahl den Detektor vollständig trifft, kann, für die kleinen RPC, keine signifikante Abweichung festgestellt werden. Für den großen CRPC4 ergibt sich ein vollständig anderes Bild. Hier ist die Effizienz lediglich für geringe Flüsse homogen. Bereits ab einem Fluss von $4 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kann eine Abweichung von über 5% festgestellt werden. Es bestehen zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze, dieses Verhalten zu erklären. Zum einen kann es sich dabei um einen Effekt des Detektors selber handeln. Es besteht die Annahme, dass sie mit dem Gassystem in Verbindung steht. Der Detektor hat den Zulauf des frischen Gases genau an der Seite, an der die Effizienz besonders hoch ist und den Ablauf dort, wo sie besonders niedrig ist. Es besteht zum anderen die Annahme, dass es sich nicht um einen Effekt des Detektors selber handelt, sondern, dass die Vorverstärker im unteren Bereich besser sind als im oberen und es deswegen zu

der Inhomogenität kommt. Diese Annahme hat den Vorteil, dass sie zwanglos erklärt, warum es genau eine Reihe ist, die ein so viel besseres Verhalten zeigt. Da es in der Offline Datenanalyse nicht möglich war zu bestimmen, welche der beiden Annahmen zutreffend ist, wurde eine Methode überlegt, mit der, in einer zukünftigen Messung, eindeutig festgestellt werden kann, welche der beiden Annahmen zutreffend ist.

Die Untersuchung der Randbereiche, die im vorangegangenen Abschnitt nicht weiter beachtet wurden erfolgte im Abschnitt 5.4.12. Es konnte gezeigt werden, dass, bei Annahme eines gaußverteilten Strahlprofils, der Detektor praktisch über die volle Fläche aktiv ist. So konnte die Größe des aktiven Bereiches in y-Richtung bis auf wenige Millimeter aus der Effizienz ermittelt werden. In X-Richtung scheint der aktive Bereich etwas kleiner zu sein als die Streifenlänge. Bei dieser Abweichung handelt es sich lediglich um ein paar Millimeter. Es besteht die Möglichkeit, dass es auf die Form der Anodenstreifen zurückzuführen ist. Die Anodenstreifen laufen gegen Ende spitz zu, wodurch sie nicht mehr den vollen Bereich abdecken. Es kann aber auch nicht ausgeschlossen werden, dass es sich dabei um einen Fehler der Fit-Funktion handelt. Es konnte gezeigt werden, dass mehr als 99% des Detektors aktiv sind.

Inspiziert von den guten Resultaten im vorangegangenen Abschnitt wurde im Abschnitt 5.4.13, die Aktiven Bereiche der einzelnen Streifen zu bestimmen. Hierbei ist aufgefallen, dass der aktive Bereich 4-mal größer war als die Streifenbreite. Zur Kompensation dieses Problems wurde das Verfahren der Pulshöhenanalyse entwickelt. Hiermit ist es möglich, jedes Ereignis dem Streifen zuzuordnen, unter dem sich die Ladungslawine gebildet hat. Im Rahmen der Möglichkeiten hat dieses Verfahren auf ganzer Linie überzeugt. Aus diesem Grund wird es auch im kommenden Kapitel zur Bestimmung der Zeitauflösung wieder eingesetzt. Natürlich muss festgestellt werden, dass dieses Verfahren nur in gewissen Grenzen funktioniert. Da dieses Verfahren davon ausgeht, dass es nur ein primäres Ereignis im Detektor gibt, wird es immer dann versagen, wenn mehrere primäre Ereignisse gleichzeitig stattfinden. Damit ist dieses Verfahren nicht geeignet, die Vieltrefferfähigkeit zu verbessern. Ist die Verbesserung der Vieltrefferfähigkeit erforderlich, muss die Ursache des Problems, der Crosstalk, beseitigt werden. Im späteren Verlauf dieses Kapitels konnte gezeigt werden, dass es einen deutlichen Zusammenhang zwischen Crosstalk und Entstehungspunkt des Signals gibt. Dies legte die Vermutung nahe, dass die Signale beim Durchlaufen des Streifens deutlich an Höhe einbüßen. Dies ist insbesondere für die Planung zukünftiger Detektoren eine wichtige Erkenntnis.

5.5 ZEITAUFLÖSUNG

5.5.1 ZEITSPEKTREN

Nachdem sich der letzte Abschnitt ausführlich mit der Quantität der Signale befasst hat, soll in diesem Abschnitt die Qualität der Signale, namentlich die Zeitauflösung, im Mittelpunkt stehen. Im letzten Kapitel wurden die Zeitspektren sehr großzügig betrachtet. Das soll sich in diesem Kapitel ändern. Abbildung 71 zeigt das Zeitspektrum der rechten Seite des CRPC4. Zur Effizienzbestimmung wurden alle Signale verwendet, die in einem ~ 50 ns Zeitfenster um den Hauptpeak liegen. Für die Effizienzbestimmung ist dieses Vorgehen richtig, weil Nach-Trigger-Ereignisse, die direkt hinter dem Hauptpeak liegen, von dem untersuchten Elektron ausgelöst wurden. Hierbei handelt es sich lediglich um das Nachschwingen des Detektors oder um Reflektionen. Da der TDC aber nur jeweils das letzte Ereignis speichert, überschreiben solche Ereignisse das richtige Ereignis. Würde man sie nicht zur Effizienzbestimmung verwenden, würde man nur unnötig die Statistik verschlechtern. Zur Bestimmung der Zeitauflösung können sie aber problemlos herausgenommen werden, da nicht zu erwarten ist, dass die überschriebenen Ereignisse sich systematisch von den Verbleibenden unterscheiden.

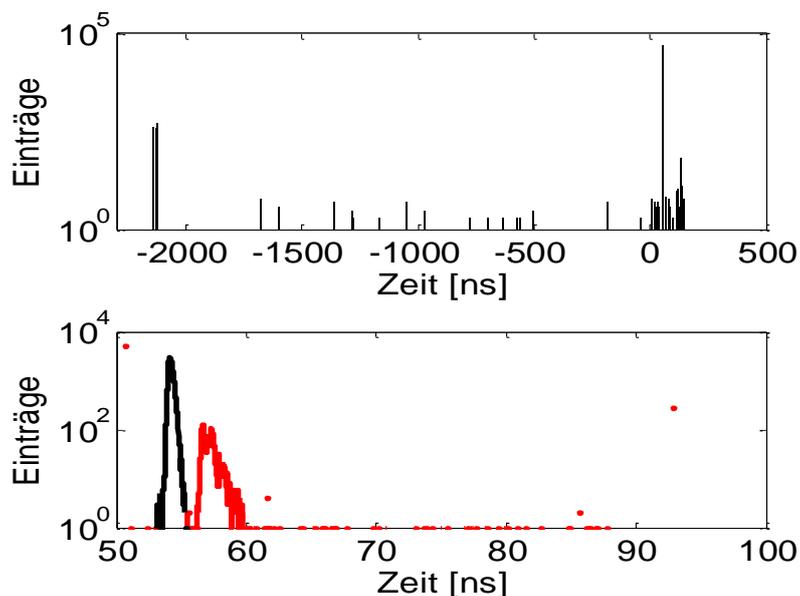


Abbildung 71: Zeitspektrum der linken Seite des Streifens 4 des CRPC1 bei einem Teilchenfluss von $5,8 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, oben: gesamtes TDC Spektrum, rechts: schmales Zeitfenster. Für die Bestimmung der Zeitauflösung wird nur der erste Peak (der schwarze Peak) verwendet, für die Effizienzbestimmung werden alle Einträge im Zeitfenster verwendet

Zur Bestimmung der Zeitauflösung reicht es nicht, wenn man lediglich einen Datenfile betrachtet, da hierbei nur ein relativ kleiner Bereich des Detektors bestrahlt wird. Da es mit dem Messaufbau nicht möglich ist, den gesamten Detektor zu bestrahlen, müssen mehrere Messungen kombiniert werden.

Abbildung 72 zeigt die Kombination der Einzelmessungen entlang eines Streifens, ausgelesen von einer Seite. Das kombinierte Spektrum hat eine Halbwertsbreite von 889 ps. Das ist die Zeitauflösung, die bei einseitiger Auslese erreicht werden kann. Der Wert ist allerdings nur qualitativ zu verstehen. Unterstrichen soll mit dieser Auswertung lediglich die Aussage werden, dass, wenn man einen Detektor mit einer Zeitauflösung von $\sigma < 100\text{ps}$ (FWHM $< 235\text{ ps}$) bauen will, man entweder "kleine" Streifen (auch "Pads" genannt) oder eine Auswertung von beiden Seiten benötigt. Deswegen reicht es nicht aus, eine Effizienz zu definieren, bei der es reicht, dass nur eine Seite ein Zeitsignal gegeben hat.

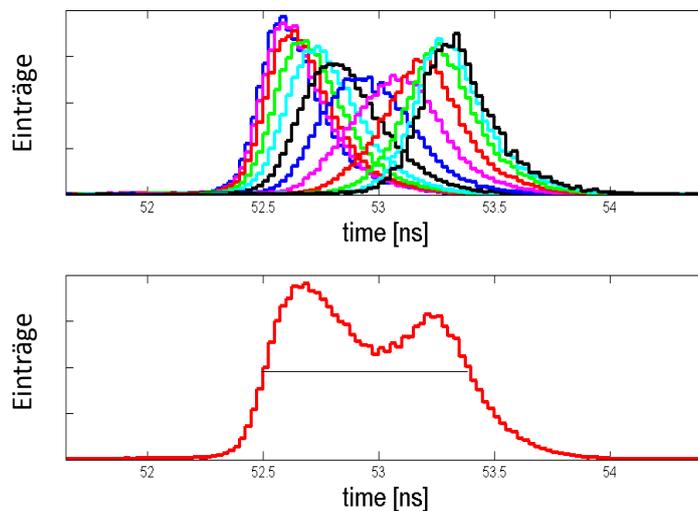


Abbildung 72: CRPC1 Kombination der Einzelmessungen

5.5.2 KOMBINATION VON LINKER UND RECHTER SEITE

Um die Positionsabhängigkeit der Trigger-Zeiten zu kompensieren, wird für jedes Ereignis der Mittelwert zwischen linker und rechter Seite gebildet. Dadurch entsteht ein leicht verändertes Spektrum. In Abbildung 73 links ist das kombinierte Spektrum eines Streifens zu sehen. Es fällt auf, dass, im Vergleich zu Abbildung 71, ein zusätzlicher Peak bei -1000 ns erscheint. Dieser Peak setzt sich aus den Ereignissen zusammen, bei denen jeweils ein "Signal" mit einem "Vor-Trigger-Ereignis" kombiniert wird. Hierbei ergibt sich eine Halbwertsbreite von 300 ps, also eine Verbesserung um ungefähr einen Faktor drei. Für die Auswertung besonders wichtig ist, dass nun die Einzelmessungen und die Überlagerung, vergleichbare Halbwertsbreiten haben. So ist der Mittelwert der einzelnen Halbwertsbreiten 283 ps. Damit beträgt die Abweichung weniger als 6 %. Im Folgenden werden nur noch Zeitauflösungen der einzelnen Messungen untersucht. Es muss aber stets bedacht werden, dass die Zeitauflösung bei Bestrahlung der gesamten Detektorfläche 6 % schlechter ist.

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

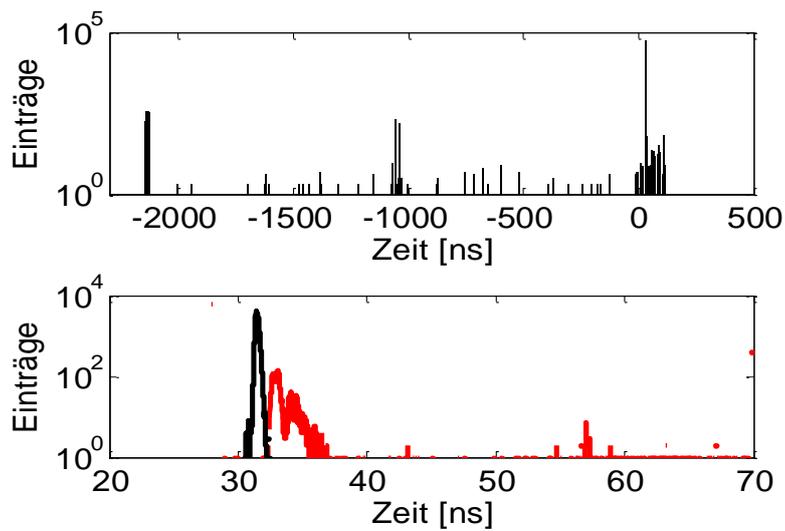


Abbildung 73: kombiniertes Zeitspektrum für Streifen 4 des CRPC1 bei einem Teilchenfluss von $5,8 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, oben: gesamtes TDC Spektrum, rechts: schmales Zeitfenster. Für die Bestimmung der Zeitauflösung wird nur der erste Peak (der schwarze Peak) verwendet, für die Effizienzbestimmung werden alle Einträge im Zeitfenster verwendet

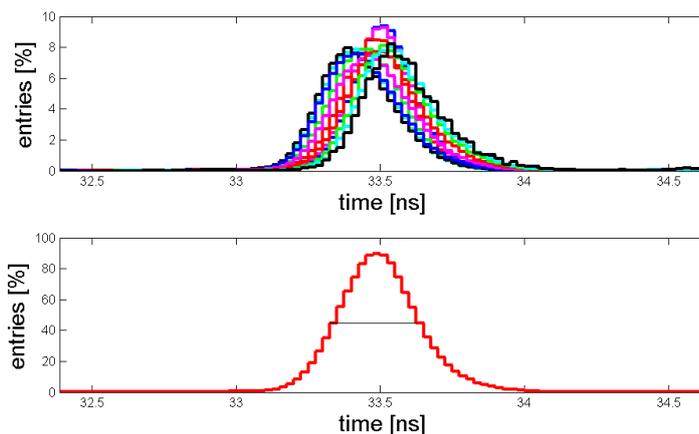


Abbildung 74: CRPC1 Kombination der Einzelmessung beider Seiten

5.5.3 ZEIT-SIGNALLADUNGS-KORREKTUR ("WALK CORRECTION")

Um die Zeitauflösung zu verbessern, wird eine Zeit-Amplituden-Korrektur des Primärsignals durchgeführt. Hierbei handelt es sich um ein Verfahren, das dem Fakt Rechnung trägt, dass größere Signale früher registriert werden. Hierzu wird die Ankunftszeit gegen die Signalladung in einem zweidimensionalen Histogramm dargestellt. In Abbildung 75 ist ein Zeit-Amplituden-Histogramm eines RPC gezeigt. Es zeigt die typische Dreiecksform, deren Grenzen sich, wie in Abbildung 76 dargestellt, in drei Zonen unterteilen [21].

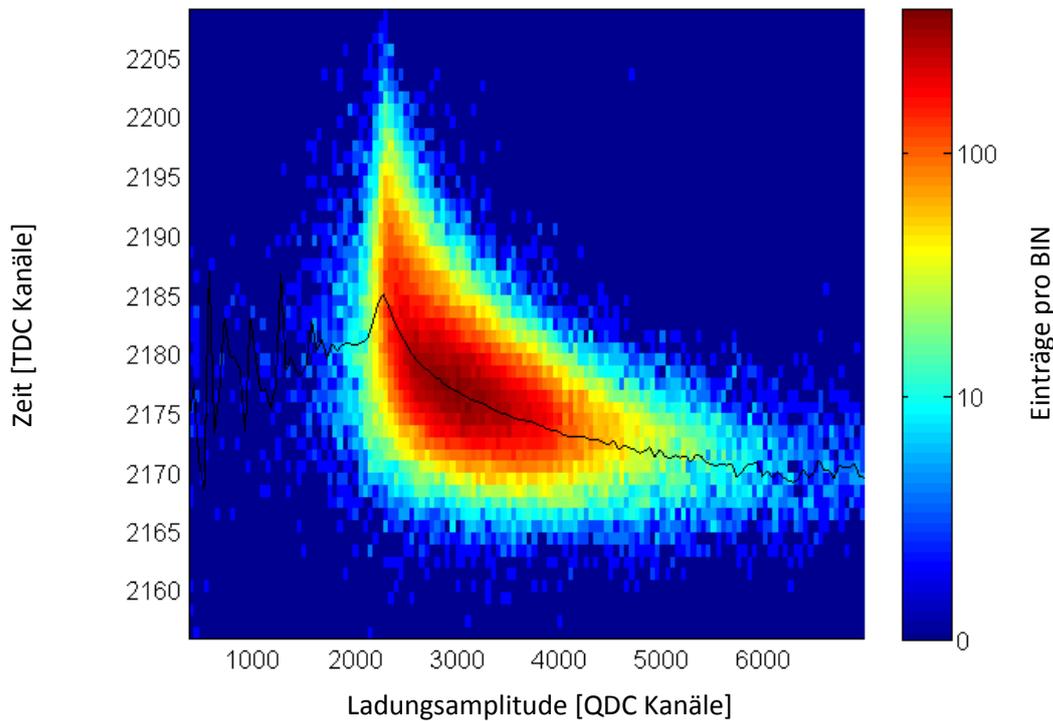


Abbildung 75: Zeit- zu Ladungs-Histogramm für Streifen 4 des CRPC2 bei einer Betriebsspannung von 6,4 kV und einem Teilchenfluss von $4.8 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

In Abbildung 76 Zitat: [21]: "

- Zone 1: Wird von der Schwelle des Analog-Digital-Wandlers bestimmt. Signale, die nicht über die Schwelle kommen, erscheinen auch nicht in dem Histogramm
- Zone 2: Die schnellst mögliche Anstiegszeit definiert diese Grenze. In Zone 2 ist praktisch keine Abhängigkeit der Schwellüberschreitungszeit von der Ladung zu sehen. Zum Verständnis nimmt man an, dass das Zeitverhalten hauptsächlich vom "führenden Cluster"¹¹ bestimmt wird und dieser überschreitet die Schwelle gleich zu Beginn. Abhängig von der Position im Detektor wird die Signalhöhe größer oder kleiner
- Zone 3: hier sind Signale mit einer geringen Anstiegszeit. Man beobachtet eine klare Korrelation zwischen Schwellüberschreitungszeit und der Ladung.

" Ende des Zitats.

¹¹ "führender Cluster" bezeichnet den Cluster, der am dichtesten an der Kathode beginnt. Im Allgemeinen ist die totale Signalhöhe vom "führenden Cluster" bestimmt, da er die längste Driftzeit hat und kann dadurch die größte Zahl an Ladungsträger aufsammeln. [21]

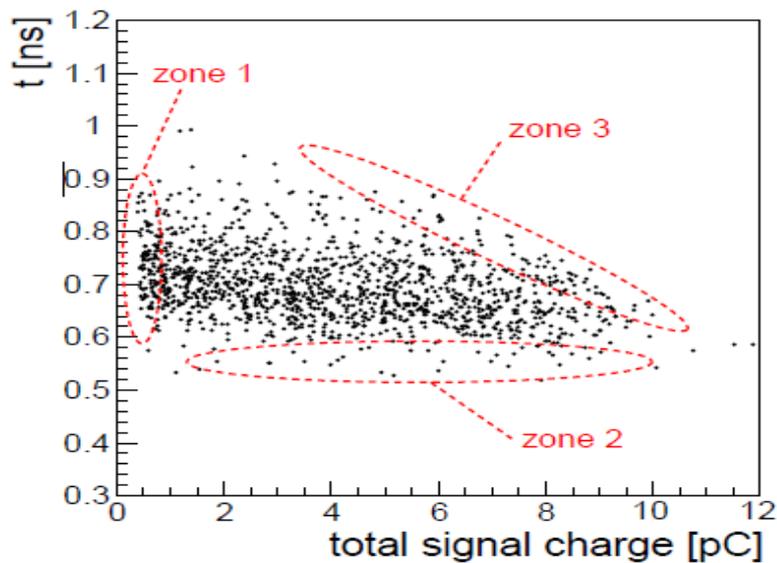


Abbildung 76: *Simuliertes Zeit-Amplitudenspektrum [21] "Intrinsische Korrelation der Ladungsschwellen-Überschreitungszeit zur induzierten Ladung für eine simulierte Lawine in einem 0.3 mm Ein-Gasspalt-Timing-RPC bei 2.8 kV..."*

Das Histogramm in Abbildung 75 weicht allerdings dahingehend von dem in Abbildung 76 ab, dass es durch die endlichen Zeitkonstanten der Elektronik nicht scharf an der Zone 2 abgeschnitten wird. Auch gibt es Ereignisse, die in Bereichen jenseits der Zone 1 liegen.

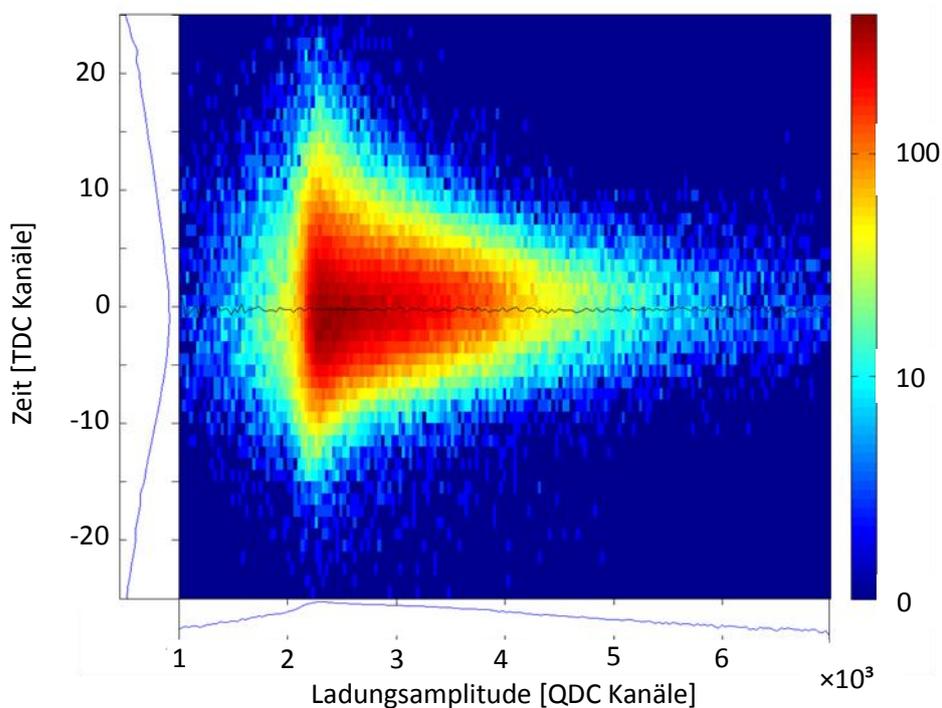


Abbildung 77: CRPC1 Zeit-Ladungs-Histogramm nach "walk correction"

Für die Zeitauflösung ist es wichtig, dass, wie in Abbildung 75 gezeigt, der Verlauf im Zentrum des Spektrums richtig modelliert wird. Die anderen Bereiche sind statistisch unbedeutend, deswegen ist

es sinnvoll, den Verlauf des Spektrums mit einer "Spline" Funktion zu modellieren. Die Spline Funktion hat den Nachteil, dass sie in Bereichen mit niedriger Statistik zur Überkompensation neigt. Da diese Bereiche statistisch keine Rolle spielen, wird dieser Effekt ignoriert. Für spätere Anwendungen existieren allerdings durchaus Methoden die Spline Funktion weiter zu glätten.

Abbildung 77 zeigt das Zeitspektren nach Zeit-Ladungs-Korrektur. Im Vergleich mit Abbildung 75 fällt auf, dass die "Verspätung" kleinere Signale vollständig korrigiert wurde. Ohne Zeit-Amplituden-Korrektur ist die Zeitauflösung $\sigma = 124$ ps (FWHM = 292 ps) mit Korrektur $\sigma = 96$ ps (FWHM = 227 ps). Dies entspricht einer Verbesserung um 22%.

5.5.4 PULSHÖHENANALYSE

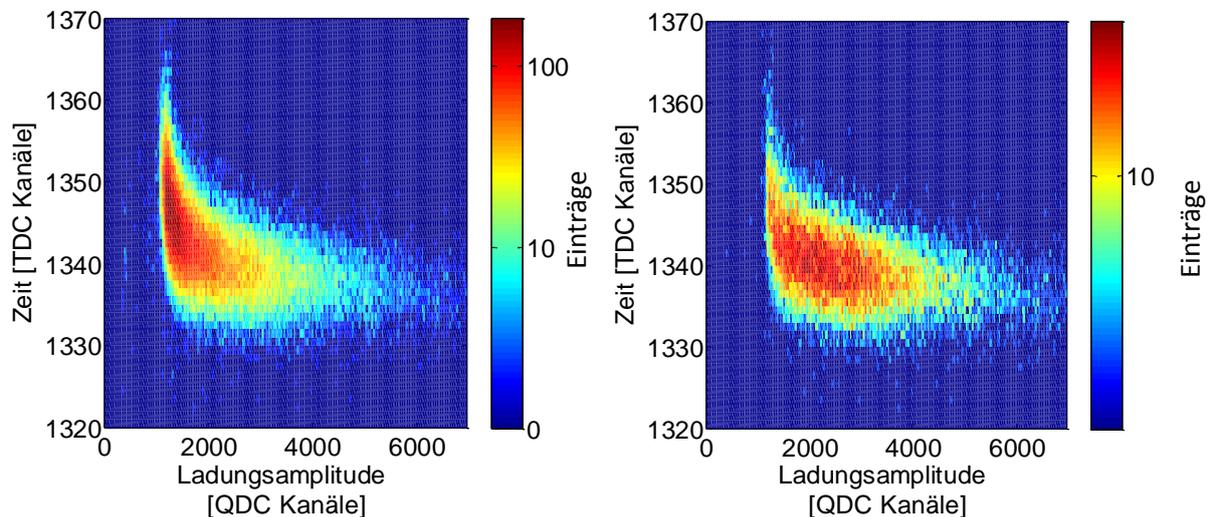


Abbildung 78: Zeit-Amplituden-Spektrum Streifens 5 des CRPC1 bei einer Betriebsspannung von 6,2 kV und einem Teilchenfluss von 2×10^3 cm⁻² s⁻¹. Links: ohne Pulshöhenanalyse, rechts: mit Pulshöhenanalyse.

In einem vorangegangenen Abschnitt wurde bereits das Konzept der Pulshöhenanalyse vorgestellt. In diesem Kapitel sollen lediglich die Auswirkungen auf die Zeitauflösung untersucht werden. Da es sich bei diesem Verfahren lediglich um eine "Sortierung" der Ereignisse handelt, wird die Effizienz dadurch nicht reduziert. Abbildung 78 zeigt den direkten Vergleich zwischen dem Zeit-Amplituden-Spektrum ohne und mit Pulshöhenanalyse. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Spektrum vor der Pulshöhenanalyse hauptsächlich von kleinen Signalen dominiert wird. Bei Pulshöhenanalyse stellt sich allerdings heraus, dass diese Signale lediglich Crosstalk-Signale sind. Diese Ereignisse werden infolge dessen anderen Streifen zugeordnet, wodurch sich das Spektrum zu größeren Signalen verschiebt. Vor der Pulshöhenanalyse hat der untersuchte Streifen eine Zeitauflösung von $\sigma = 122$ ps (FWHM = 287 ps), nach der Pulshöhenanalyse hat der Streifen eine Zeitauflösung von $\sigma = 99$ ps (FWHM = 233 ps). Dies entspricht einer Verbesserung von ~ 19 %.

Im letzten Beispiel wurde Streifen 5 untersucht. Dieser lag mitten im Elektronenstrahl und hatte deswegen eine hohe Wahrscheinlichkeit, selbst getroffen zu werden. Im Folgenden soll nun Streifen

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

6 untersucht werden. Dieser lag am Rand des Elektronenstrahls und hatte deswegen eine relativ geringe Wahrscheinlichkeit, selbst getroffen zu werden. Abbildung 79 zeigt, dass durch die Pulshöhenanalyse sich das Spektrum deutlich verändert hat. In Abbildung 79 links hat es den Anschein, als ob die Signale dieses Streifens bedeutend kleiner wären und infolge dessen die Zeitauflösung besonders schlecht wäre. In Abbildung 79 rechts erkennt man allerdings, dass das Spektrum lediglich deshalb so niedrig ist, weil es vom Crosstalk dominiert wurde. Das eigentliche Spektrum zeigt ein ähnliches Verhalten wie Streifen 5. Noch interessanter ist allerdings, wie sich die Zeitauflösung dadurch verändert. So hat Streifen 6 ohne Pulshöhenanalyse eine Zeitauflösung von $\sigma = 134$ ps (FWHM = 316 ps), was deutlich schlechter ist als Streifen 5. Mit Pulshöhenanalyse verbessert sich die Zeitauflösung auf $\sigma = 91$ ps (FWHM = 214 ps). Dies entspricht einer Verbesserung um 32 %. Es ist klar zu erkennen, dass die Pulshöhenanalyse ein wirkungsvolles Mittel ist, um die Zeitauflösung zu verbessern.

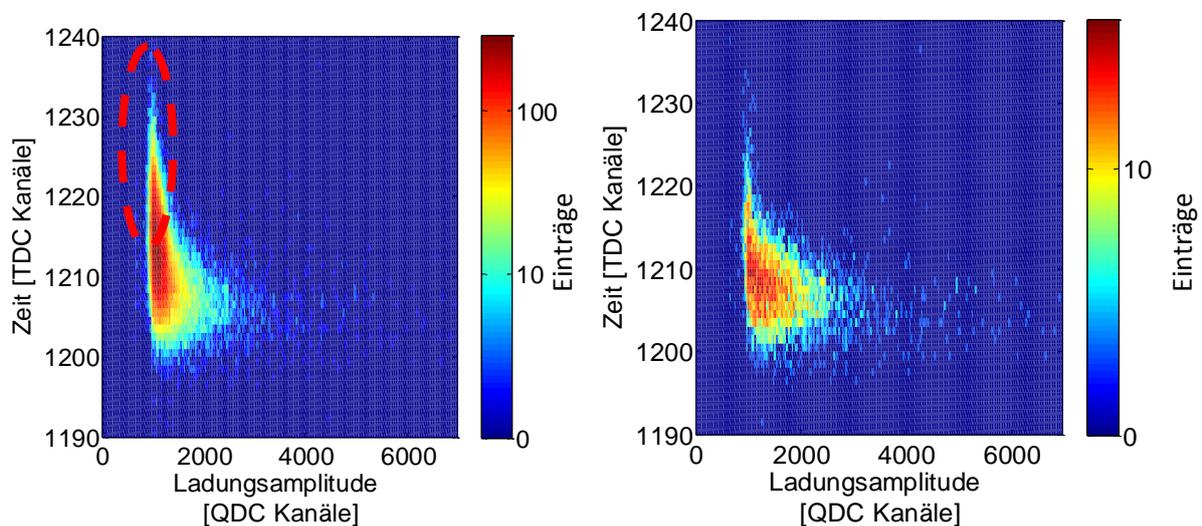


Abbildung 79: Zeit-Amplituden-Spektrum Streifens 6 des CRPC1 bei einer Betriebsspannung von 6,2 kV und einem Teilchenfluss von $2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Links: ohne Pulshöhenanalyse sind die meisten Einträge im Pedestal, rechts: mit Pulshöhenanalyse. Es stellt sich heraus, dass die Ereignisse im Pedestal hauptsächlich Crosstalk Ereignisse sind. Diese können anderen Streifen zugeordnet werden, wodurch sich die Zeitauflösung deutlich verbessert

5.5.5 VERGLEICH DER ZEITAUFLÖSUNGEN

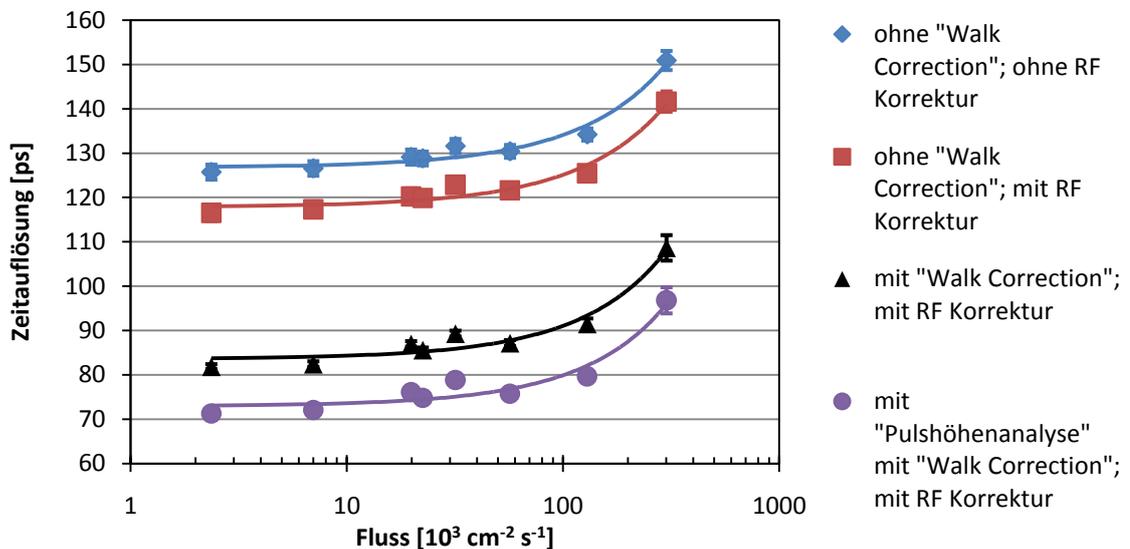


Abbildung 80: Exemplarischer Vergleich der verschiedenen Zeitauflösung an CRPC1 bei einer Betriebsspannung von 6,4 kV

Im folgenden Teil soll exemplarisch gezeigt werden, wie sich die Zeitauflösung durch die verschiedenen Korrekturen verbessern lässt. Abbildung 80 zeigt den exemplarisch die Verbesserungen durch die einzelnen Korrekturen. Die erste Korrektur besteht in der quadratischen Subtraktion der Unsicherheit des RF Signals. Die Unsicherheit des RF Signals stammt hauptsächlich von der Ungenauigkeit der Elektronik und der Digitalisierung. Die Unsicherheit dieses Signals variiert von ~ 40 ps bis ~ 60 ps. Zur weiteren Verbesserung der Zeitauflösung wird die im Abschnitt 5.5.3 eingeführte "walk correction" durchgeführt und anschließend die Unsicherheit des RF Signals quadratisch abgezogen. Die "walk correction" hat den größten Einfluss auf die Zeitauflösung und ist damit die wichtigste Korrektur. Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Zeitauflösung ist die in Abschnitt 5.5.4 eingeführte Pulshöhenanalyse. Hierbei werden die Crosstalk-Ereignisse herausgefiltert. Dies bringt nochmal eine Verbesserung der Zeitauflösung. Da die Abnahme der Zeitauflösung sich mit einer Geraden approximieren lässt, ist es sinnvoll, zur Charakterisierung die folgenden zwei Parameter verwenden:

- zum einen die Zeitauflösung des RPCs bei niedrigem Fluss (Z_0),
- zum anderen der Fluss, bei dem die Zeitauflösung sich um 20 ps verschlechtert.

Letzteres ist der Wert, mit dem [5] die Ratenfestigkeit eines RPCs definiert. In Tabelle 16 sind die Resultate der Abbildung 80 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine Verbesserung der Zeitauflösung von mehr als 50 ps erreicht wird. Des Weiteren ist zu erkennen, dass keine der verwendeten Korrekturen die Ratenfestigkeit signifikant erhöht.

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

Tabelle 16: Vergleich der einzelnen Korrekturen

Definition	Zeitauflösung (Z_0) [ps]	Ratenfestigkeit [$10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
Ohne "Walk correction" ohne RF Korrektur	127 ps	257
Ohne "walk correction" mit RF Korrektur	118 ps	259
Mit "Walk Correction" mit RF Korrektur	83 ps	245
Mit "Pulshöhenanalyse" mit "Walk correction" mit RF sub	73 ps	260

5.5.6 QUANTITATIVE BESTIMMUNG DER ZEITAUFLÖSUNG UND RATENFESTIGKEIT

In diesem Abschnitt soll eine quantitative Bestimmung der Zeitauflösung und der Ratenfestigkeit erfolgen. Wie in Abschnitt 5.5.5 ist es ausreichend die Zeitauflösung durch zwei Parameter zu definieren. Zum einen die Zeitauflösung bei niedrigen Fluss zum andern die Ratenfestigkeit nach [5]. Damit ergibt sich folgendes Bild:

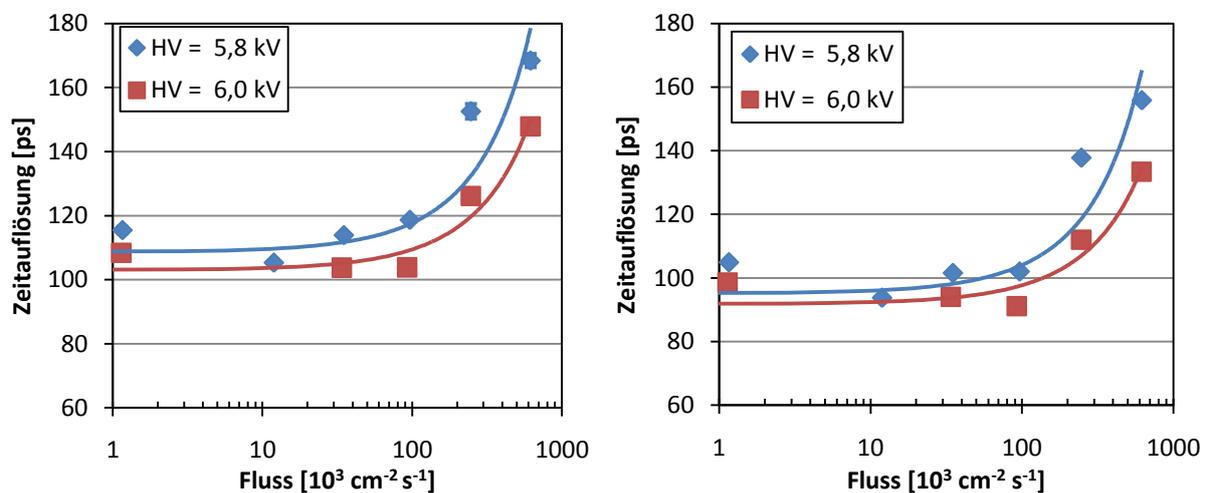


Abbildung 81: Mittlere Zeitauflösung des Detektors CRPC1 (Februar 2010 Strahlzeit), links: ohne Pulshöhenanalyse, rechts: mit Pulshöhenanalyse

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

Tabelle 17: Auswertung zu Abbildung 81

Betriebsspannung [kV]	Ohne Pulshöhenanalyse		Mit Pulshöhenanalyse	
	Zeitauflösung (Z_0) [ps]	Ratenfestigkeit [$10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	Zeitauflösung (Z_0) [ps]	Ratenfestigkeit [$10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
5,8	108	186	95	186
6,0	103	267	91	292

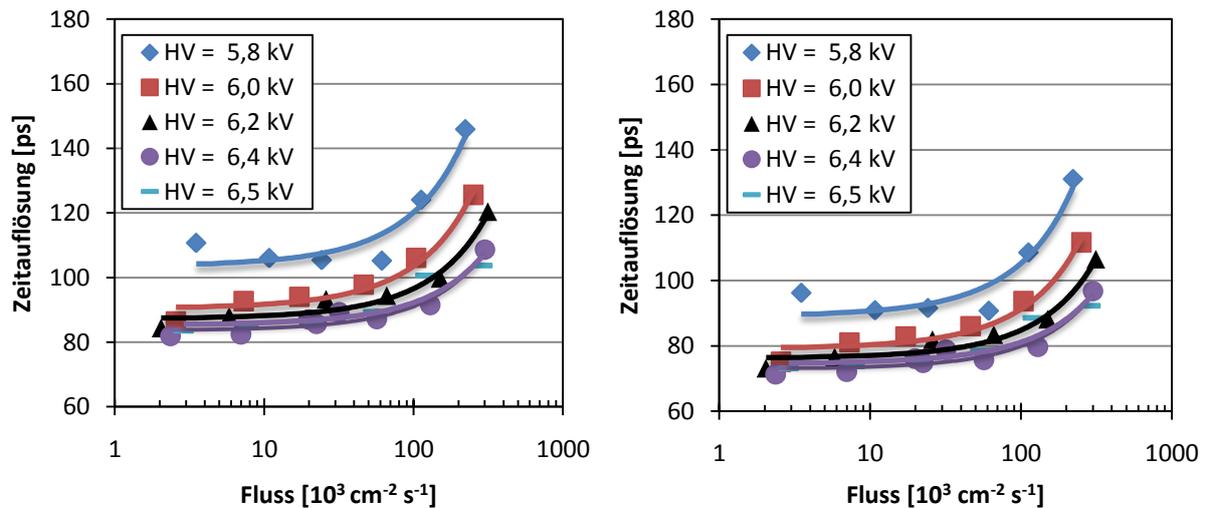


Abbildung 82: Mittlere Zeitauflösung des Detektors CRPC1 (Juni 2010 Strahlzeit), links: ohne Pulshöhenanalyse, rechts: mit Pulshöhenanalyse

Tabelle 18: Auswertung zu Abbildung 82

Betriebsspannung [kV]	Ohne Pulshöhenanalyse		Mit Pulshöhenanalyse	
	Zeitauflösung (Z_0) [ps]	Ratenfestigkeit [$10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	Zeitauflösung (Z_0) [ps]	Ratenfestigkeit [$10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
5,8	103	109	88	110
6,0	90	140	79	151
6,2	87	194	76	209
6,4	83	245	72	260
6,5	85	276	75	290

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

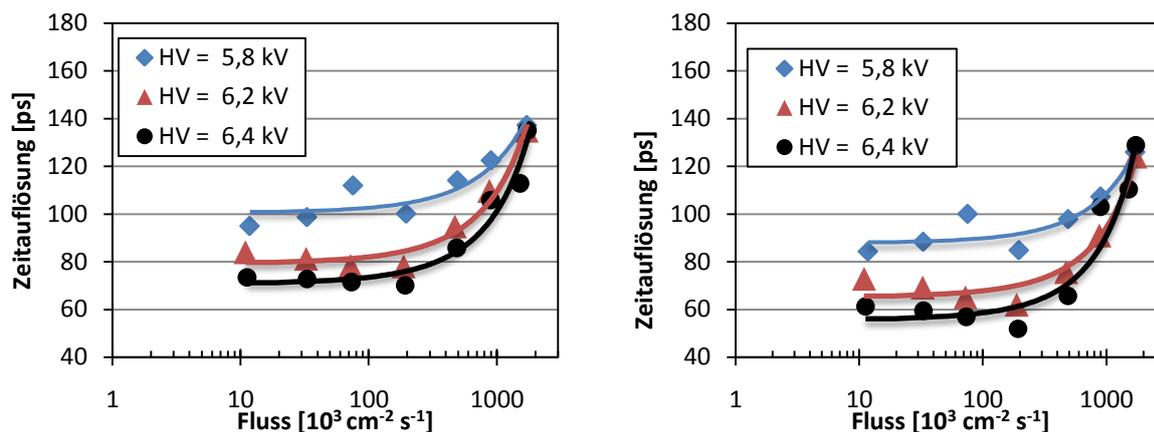


Abbildung 83: Mittlere Zeitauflösung des Detektors CRPC2 (Februar 2010 Strahlzeit), links: ohne Pulshöhenanalyse, rechts: mit Pulshöhenanalyse

Tabelle 19: Auswertung zu Abbildung 83

Betriebsspannung [kV]	Ohne Pulshöhenanalyse		Mit Pulshöhenanalyse	
	Zeitauflösung (Z_0) [ps]	Ratenfestigkeit [$10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	Zeitauflösung (Z_0) [ps]	Ratenfestigkeit [$10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
5,8	100	890	88	904
6,0	94	---	80	----
6,2	78	600	64	599
6,4	70	582	54	483

Abbildung 84 zeigt, wie sich die Zeitauflösung (Z_0) mit zunehmender Betriebsspannung verbessert. CRPC1 erreicht bei 6,2 kV ein Plateau, während sich die Zeitauflösung (Z_0) für CRPC2 weiter verbessert. Zusätzlich ist zu erkennen, dass die Pulshöhenanalyse eine weitere Verbesserung um $\sim 14\%$ bringt. Da die Pulshöhenanalyse keinerlei Nachteil hat, sollte nicht auf sie verzichtet werden. Im linken Teil der Abbildung 84 ist zu erkennen, dass ohne Pulshöhenanalyse die, für das CBM-Projekt geforderte Zeitauflösung von 80 ps nur von CRPC2 erreicht wird. Im rechten Teil der Abbildung 84 ist zu erkennen, dass mit Pulshöhenanalyse beide Detektoren die geforderte Zeitauflösung übertreffen. Der Detektor CRPC1 erreicht ab einer Betriebsspannung von 6,2 kV ein Plateau. Im Plateau war die Zeitauflösung von CRPC1 ohne Pulshöhenanalyse $\sigma = (90 \pm 4)$ ps und mit Pulshöhenanalyse $\sigma = (74 \pm 4)$ ps. CRPC2 zeigte ab einer Betriebsspannung von 6,2 kV eine mittlere Zeitauflösung ohne Pulshöhenanalyse von $\sigma = (74 \pm 6)$ ps und mit Pulshöhenanalyse von $\sigma = (59 \pm 9)$ ps. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass sich die Zeitauflösung bei homogener Bestrahlung weiter verschlechtern würde. Die Verschlechterung wurde im Abschnitt 5.5.2 mit 6 % abgeschätzt. Damit ergibt sich für CRPC1 im Plateau, d.h. für Betriebsspannungen ab 6,2 kV, eine mittlere Zeitauflösung (Z_0) mit Pulshöhenanalyse und bei homogener Bestrahlung von $\sigma = (79 \pm 4)$ ps. Der Fehler ergibt sich als Mittelwert der Einzelfehler. Für CRPC2 ergibt sich unter gleichen Bedingungen eine Zeitauflösung (Z_0) $\sigma = (63 \pm 10)$ ps.

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

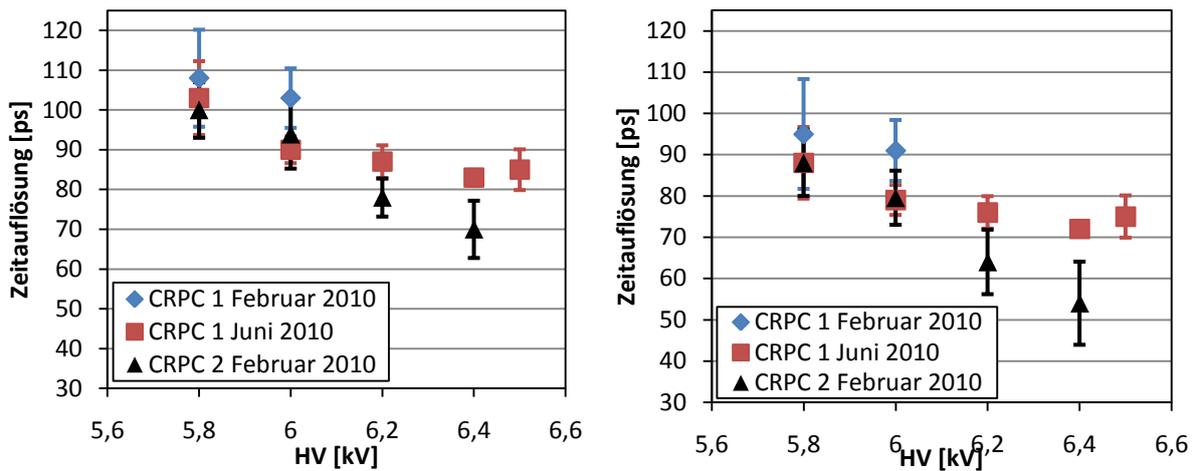


Abbildung 84: Zeitauflösung (Z_0) als Funktion der Betriebsspannung. Links: ohne Pulshöhenanalyse, rechts: mit Pulshöhenanalyse

Des Weiteren kann gesagt werden, dass, im Rahmen der Fehler, sich die Ratenfestigkeit durch die Pulshöhenanalyse nicht verändert. In Abbildung 85 ist zu erkennen, dass bei CRPC1 die Ratenfestigkeit linear mit der Betriebsspannung zunimmt. Die mittlere Ratenfestigkeit ab einer Betriebsspannung von 6,2 kV beträgt $(2,4 \pm 1,2) \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Zwischen der Februar 2010- und der Juni 2010-Strahlzeit kommt es zu einer konstanten Verschiebung. CRPC2 verhält sich entgegengesetzt. So ist bei CRPC2 eine deutliche Abnahme der Ratenfestigkeit zu erkennen. Diese erreicht bei einer Betriebsspannung von 6,2 kV ein Plateau von $(5,9 \pm 1,3) \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

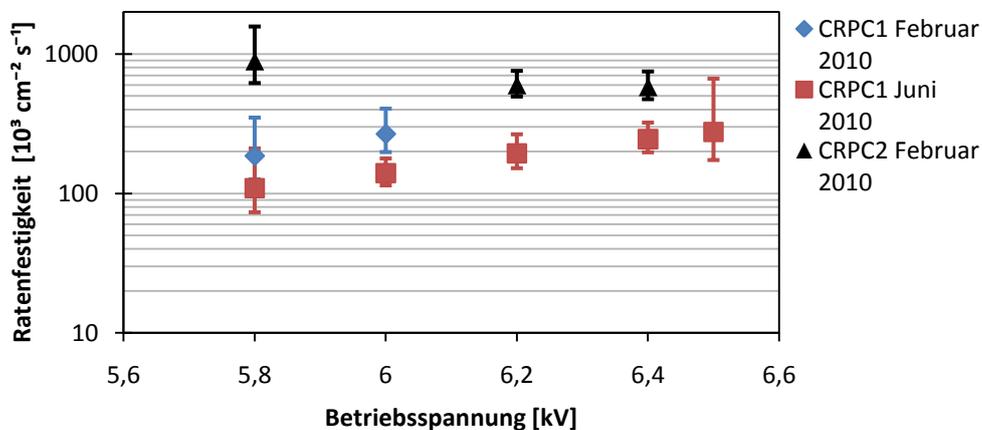


Abbildung 85: Ratenfestigkeit der Zeitauflösung als Funktion der Betriebsspannung. Mit Ratenfestigkeit der Zeitauflösung wird der Fluss bezeichnet, bei dem sich die Zeitauflösung um 20 ps verschlechtert hat

5.5.7 ZUSAMMENFASSUNG:

In Abschnitt 5.5.1 wurde gezeigt, welche Ereignisse für die Bestimmung der Zeitauflösung verwendet werden können. Des Weiteren wurde gezeigt, dass es nicht ausreicht, lediglich die Zeit-Information von einer Seite zu haben, da, geht man von homogener Bestrahlung der gesamten Detektorfläche

5. Analyse der an ELBE gesammelten Daten

aus, es unmöglich wäre, eine Zeitauflösung von unter $\sigma = 100$ ps zu erreichen. Dies wurde bei der Effizienzbestimmung berücksichtigt. Es konnte in Abschnitt 5.5.2 gezeigt werden, dass bei beidseitiger Auswertung der Trigger-Zeitpunkt kaum noch von der Einschlagposition des Elektrons abhängt. Damit ist es ausreichend, die Zeitauflösung auf einem begrenzten Teil des Detektors zu bestimmen. Dies soll nicht heißen, dass es keine Inhomogenitäten auf dem Detektor geben kann, sondern lediglich, dass die systematische Verschiebung durch unterschiedliche Einschlagpositionen kompensiert ist.

In Abschnitt 5.5.3 wurde gezeigt, dass die Signalhöhe einen signifikanten Einfluss auf den Trigger-Zeitpunkt des Signals hat. Aus diesem Grund ist es üblich, bei RPC Detektoren eine Zeit-Amplituden-Korrektur ("Walk Correction") vorzunehmen. Zur Modellierung wurde eine Spline-Funktion gewählt, da diese den Verlauf am genauesten reproduziert. Es wurde darauf hingewiesen, dass es bei einer Spline-Funktion im Bereich niedriger Statistik zu einer Überkompensation kommt. Zur Bestimmung der Zeitauflösung fallen diese Bereiche nicht weiter ins Gewicht. Für spätere Anwendung ist es durchaus sinnvoll, die Spline-Funktion weiter zu glätten.

In Abschnitt 5.5.4 konnte gezeigt werden, wie mit der bereits im vorangegangenen Abschnitt eingeführten Methode der Pulshöhenanalyse eine weitere Verbesserung der Zeitauflösung erzielt werden kann. Besonders wichtig zu bemerken ist an dieser Stelle, dass die Methode insbesondere bei Streifen, die nicht direkt im Strahl standen, einen besonders großen Effekt hat. Geht man von einer homogenen Bestrahlung des Detektors aus, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Streifen nicht direkt getroffen wurde, deutlich größer als bei zentraler Bestrahlung. Deswegen ist davon auszugehen, dass die Verbesserung der Zeitauflösung bei homogener Bestrahlung sogar noch etwas besser ist als im Test mit zentraler Bestrahlung. Trotz der Erfolge dieses Verfahren bleibt es ein erstrebenswertes Ziel den Crosstalk bereits im Detektor einzudämmen. Denn, egal wie effektiv das Verfahren der Pulshöhenanalyse auch ist, es wird niemals zu einer perfekten Rekonstruktion des Ereignisses führen. Außerdem ist es auch grundsätzlich nicht in der Lage "Vieltreffer-Ereignisse" zu rekonstruieren.

Die in Abschnitt 5.5.6 durchgeführte systematische Analyse der Zeitauflösung als Funktion des Flusses hat ergeben, dass CRPC1 und CRPC2 die Anforderungen des CBM Experimentes erfüllen. Gemeinsam haben beide Detektoren, dass die Zeitauflösung mit zunehmender Betriebsspannung leicht zunimmt. Der Detektor CRPC1 erreicht ab einer Betriebsspannung von 6,2 kV ein Plateau, ab dem sich die Zeitauflösung kaum noch verbessert. CRPC2 zeigt eine kontinuierliche Verbesserung der Zeitauflösung mit der Betriebsspannung. Die Verwendung der Pulshöhenanalyse bringt im Mittel eine weitere Verbesserung um 14 %. Beim Vergleich der Ratenfestigkeit ergibt sich folgendes Bild. Die Ratenfestigkeit von CRPC1 steigt mit zunehmender Betriebsspannung, während bei CRPC2 die Ratenfestigkeit abnimmt bzw. konstant bleibt. Es ist noch nicht eindeutig geklärt, was die Abnahme der Ratenfestigkeit bei CRPC2 verursacht. Die Pulshöhenanalyse erzielt nur eine marginale Verbesserung der Ratenfestigkeit.

Während der November 2010-Strahlzeit hat es Probleme mit der Datenakquisition gegeben. Aus diesem Grund war es nicht möglich, für den CRPC4 die genaue Zeitauflösung zu bestimmen.

6. ZUSAMMENFASSUNG:

Für das CBM-Experiment an FAIR sollen in der Vorwärtsflugrichtung Resistive Plate Chambers (RPCs) eingesetzt werden. Bei den geplanten Experimenten mit hohen Zählraten treten insbesondere im engeren Vorwärtsbereich hohe Strahlenbelastungen auf, und die einzusetzenden Detektoren müssen für hohe Zählraten ausgelegt sein. Es werden deshalb in verschiedenen Laboratorien weltweit Anstrengungen unternommen, die Ratenfestigkeit von RPCs zu erhöhen. Dazu werden neue Materialien getestet, die eine höhere Leitfähigkeit als Standard-Float Glas haben und hinreichende Homogenität aufweisen. Die Rossendorfer Hadronenphysikgruppe hat in diesem Zusammenhang speziell gefertigte Keramikplatten im eigens gefertigten Test-RPCs am supraleitenden Elektronenbeschleuniger ELBE erprobt. Die 40 MeV Elektronen weisen die Eigenschaft minimalisierender Teilchen auf und sind demnach für solche Tests gut geeignet.

Bei der derzeitigen Entwicklung von für das CBM-Experiment geeigneten Prototypen sind zunächst die Eigenschaften der eingesetzten Keramikmaterialien zu bestimmen. Es wurden dazu verschiedene RPC-Testexemplare gebaut und an ELBE getestet.

Ziel dieser Arbeit war es, die Eigenschaften diese RPCs zu charakterisieren. Hierbei waren von besonderem Interesse die Effizienz und die Zeitauflösung. Es konnte gezeigt werden, dass die Effizienz linear mit dem Teilchenfluss abnimmt und es demnach ausreicht, sie durch zwei Punkte zu charakterisieren. Hierzu diente zum einen die Effizienz bei niedrigen Flüssen (diese wird mit "Null-Effizienz" bezeichnet), zum anderen der Teilchenfluss, bei dem die Effizienz um 5 % abgesunken ist (dieser wird mit "Ratenfestigkeit der Effizienz" bezeichnet). Es wurden verschiedene Methoden untersucht, um die Effizienz zu bestimmen. Dabei hat sich die "File-Effizienz Kombiniert" am vielversprechendsten herausgestellt. Damit konnte ein in sich konsistentes Bild gezeichnet werden, dass die Detektoren CRPC1 und CRPC2 über eine "Ratenfestigkeit der Effizienz" in der Größenordnung von $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ verfügen. Trotz aller Bemühungen war es nicht möglich, die "Ratenfestigkeit der Effizienz" genauer zu bestimmen, solange nicht das Problem der "Nach-Trigger-Ereignisse" gelöst ist. Dazu ist es entweder erforderlich, mehrere Ereignisse im TDC wegzuschreiben oder das Zeitfenster genauer anzupassen. Da beide Änderungen weder kompliziert sind noch sich in irgendeiner Weise negativ auf das Experiment auswirken, sollten sie ernsthaft in Erwägung gezogen werden. Auch die Zeitauflösung verschlechterte sich linear mit dem Fluss. Deswegen war es auch hier ausreichend, zur Charakterisierung der Detektoren zwei Parameter anzugeben. Hierzu diente, wie bei der Effizienz, zum einen die "Zeitauflösung bei geringem Fluss", zum anderen der Fluss, bei dem die Zeitauflösung sich um 20 ps verschlechtert hat. Bei CRPC2 verbessert sich die Zeitauflösung linear mit der Betriebsspannung. Der Detektor CRPC1 erreicht bei 6,2 kV ein Plateau. Im Plateau konnte, nach Pulshöhenanalyse und mit Berücksichtigung der Verschlechterung durch homogene Bestrahlung, eine Zeitauflösung (Z_0) von $\sigma = (79 \pm 4) \text{ ps}$ ermittelt werden. CRPC2 hat für Betriebsspannungen von mehr als 6,2 kV eine mittlere Zeitauflösung (Z_0) $\sigma = (63 \pm 10) \text{ ps}$. Bei der "Ratenfestigkeit der Zeitauflösung" ergibt sich das folgende Bild: CRPC1 zeigt eine leichte Zunahme der Ratenfestigkeit mit zunehmender Betriebsspannung. Die "Ratenfestigkeit der Zeitauflösung" ist $(2,4 \pm 1,2) \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Dies ist etwas niedriger als die "Ratenfestigkeit der Effizienz". CRPC2 zeigt eine Abnahme der "Ratenfestigkeit der Zeitauflösung" bis sie bei einem Wert von

6. Zusammenfassung:

$(5,9 \pm 1,3) \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ein Plateau erreicht. In Anbetracht der Fehler der "Ratenfestigkeit der Effizienz" sind beide Werte konsistent.

Die erreichten Ratenfestigkeiten für CRPC1 und CRPC2 erfüllen die Anforderungen des CBM-Experiments. Damit sind geeignete Materialien gefunden, die für die Weiterentwicklung der Test-RPCs zu größeren Prototypen verwendet werden können. Neben dem Ausbau der RPC-Testanlage an ELBE sind weitere Schritte zum Erreichen von experiment-tauglichen RPCs, wie Optimierung der Auslese und mechanische Konstruktion, nötig. In der vorliegenden Arbeit wurde detailliert über die Analyse der RPCs unter Hochraten-Strahlungsumgebungen berichtet und damit die Voraussetzung für weitere Untersuchungen geschaffen.

7. ANHANG

ERGÄNZUNG ZU 5.4.3 GRENZEN DER ZÄHLER EFFIZIENZ

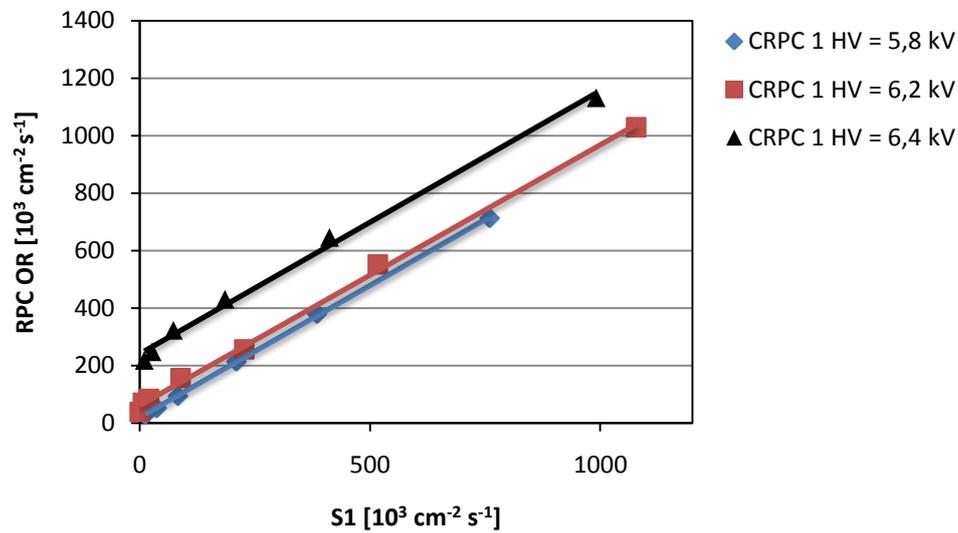


Abbildung 86: Zählrate des CRPC1 (nur eine Seite) als Funktion der Zählrate von S1. Es ist eine lineare Abhängigkeit zu erkennen

ERGÄNZUNG ZU 5.4.9 FILE EFFIZIENZ ALS FUNKTION DES FLUSSES

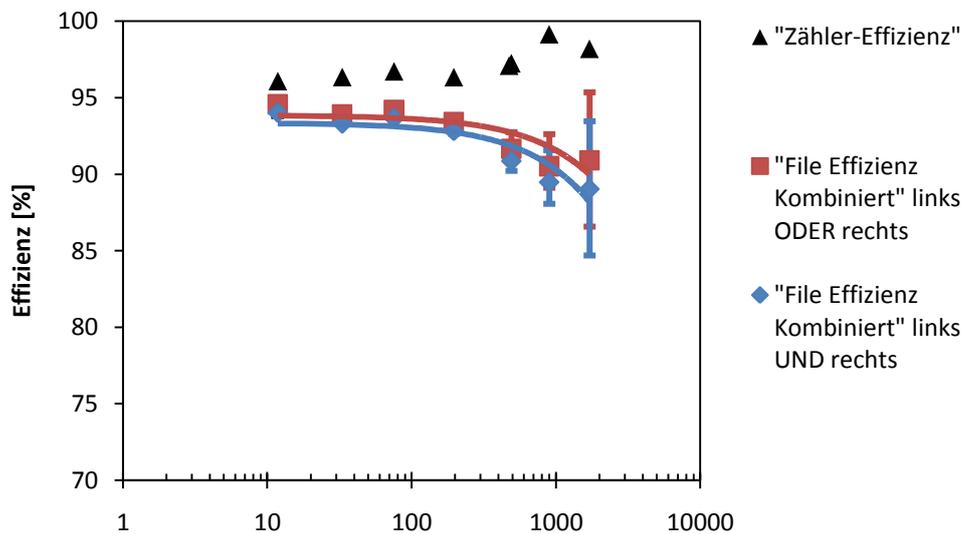


Abbildung 87: Effizienz als Funktion des Flusses für CRPC2 bei einer Betriebsspannung von 5,8 kV (Februar 2010 Strahlzeit)

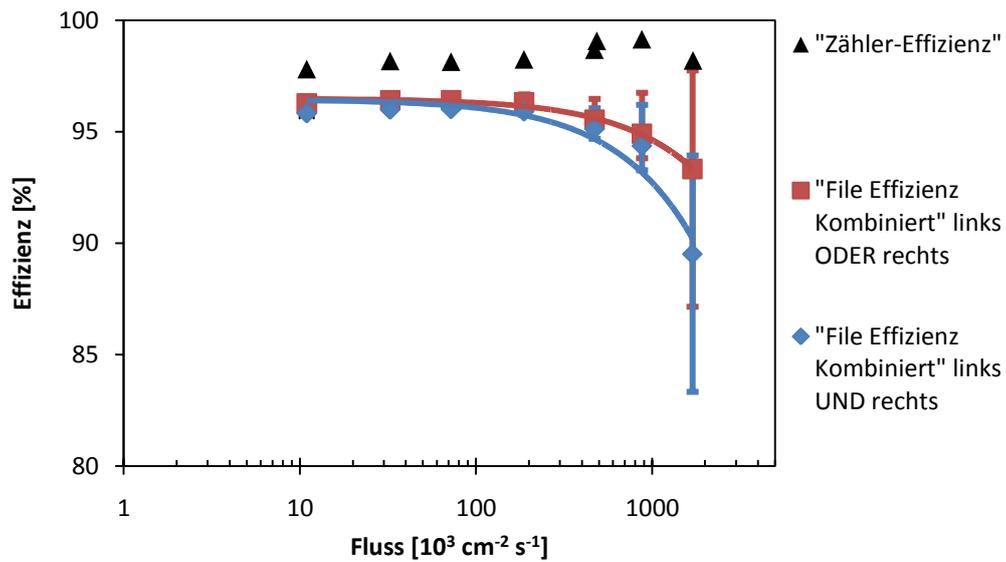


Abbildung 88: Effizienz als Funktion des Flusses für CRPC2 bei einer Betriebsspannung von 6,2 kV (Februar 2010 Strahlzeit)

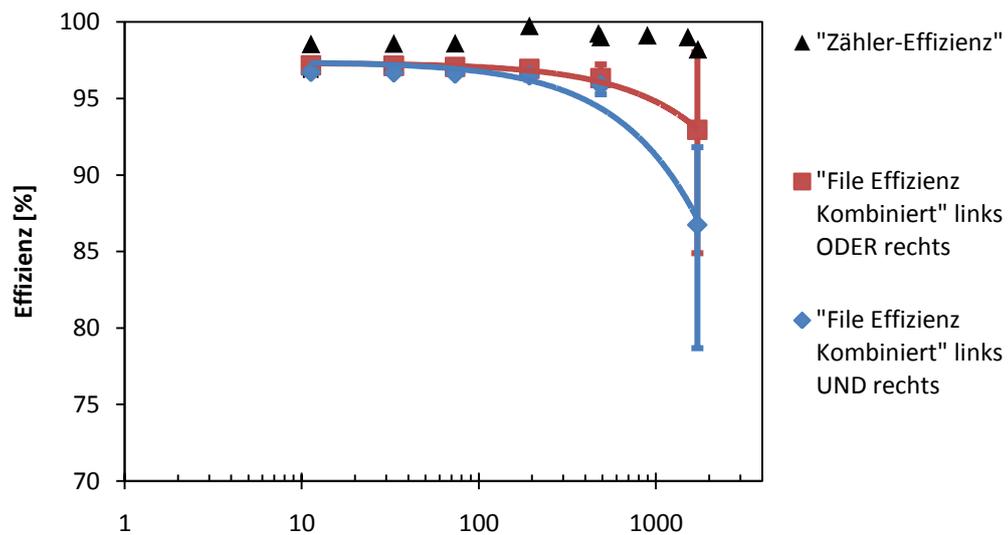


Abbildung 89: Effizienz als Funktion des Flusses für CRPC2 bei einer Betriebsspannung von 6,4 kV (Februar 2010 Strahlzeit)

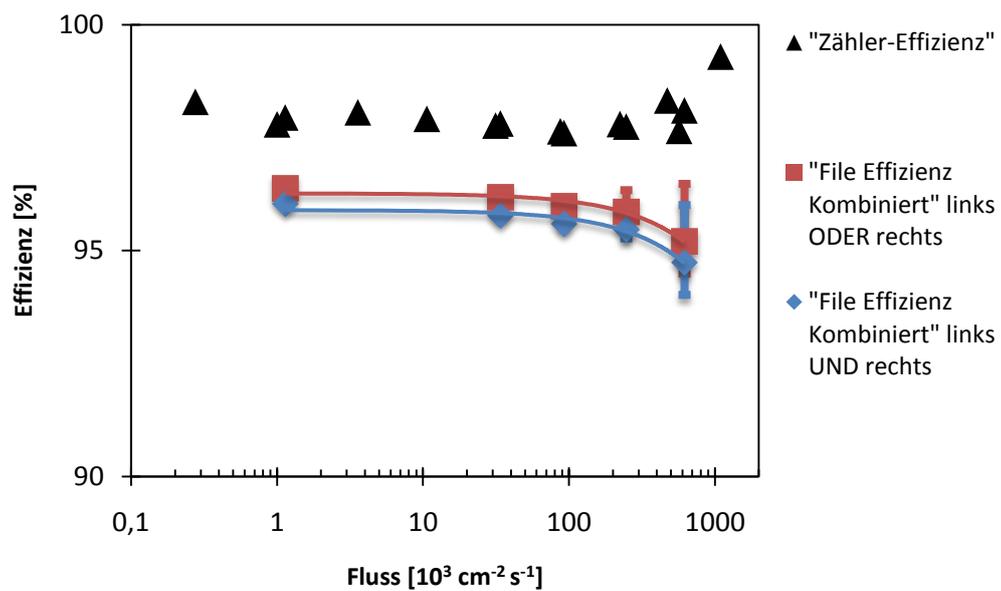


Abbildung 90: Effizienz als Funktion des Flusses für CRPC1 bei einer Betriebsspannung von 6,0 kV (Februar 2010 Strahlzeit)

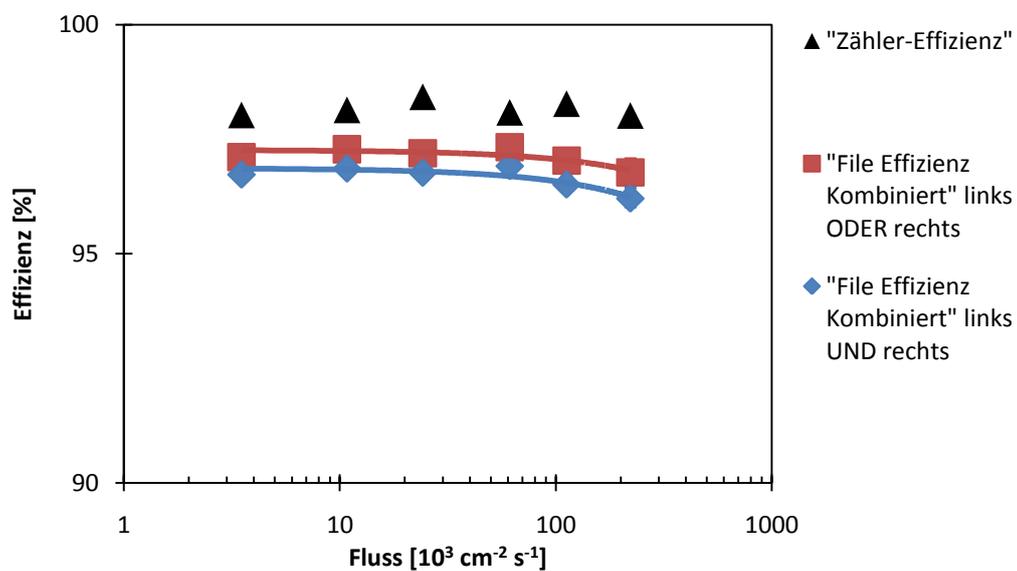


Abbildung 91: Effizienz als Funktion des Flusses für CRPC2 bei einer Betriebsspannung von 6,0 kV (Juni 2010 Strahlzeit)

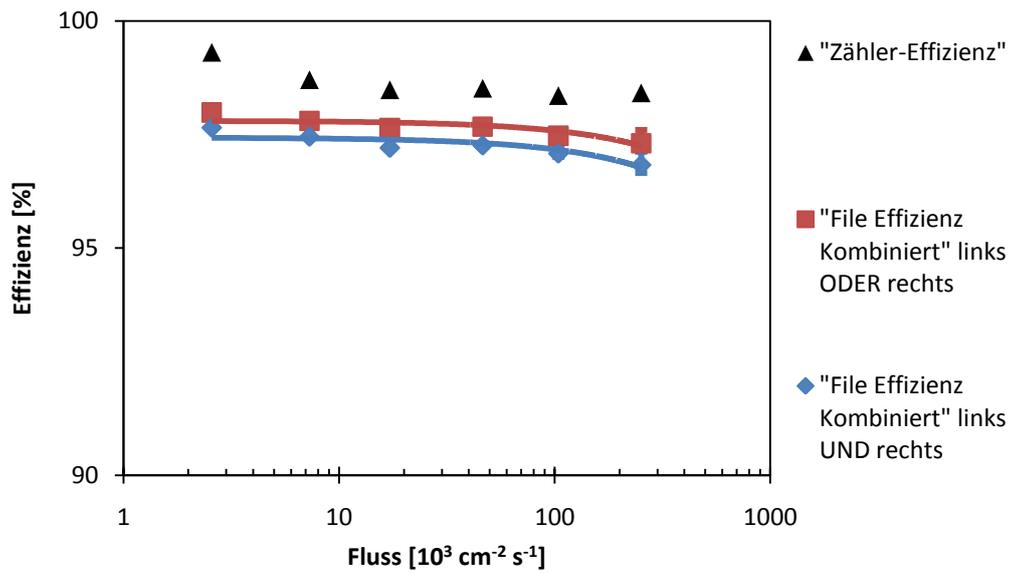


Abbildung 92: Effizienz als Funktion des Flusses für CRPC1 bei einer Betriebsspannung von 6,0 kV (Juni 2010 Strahlzeit)

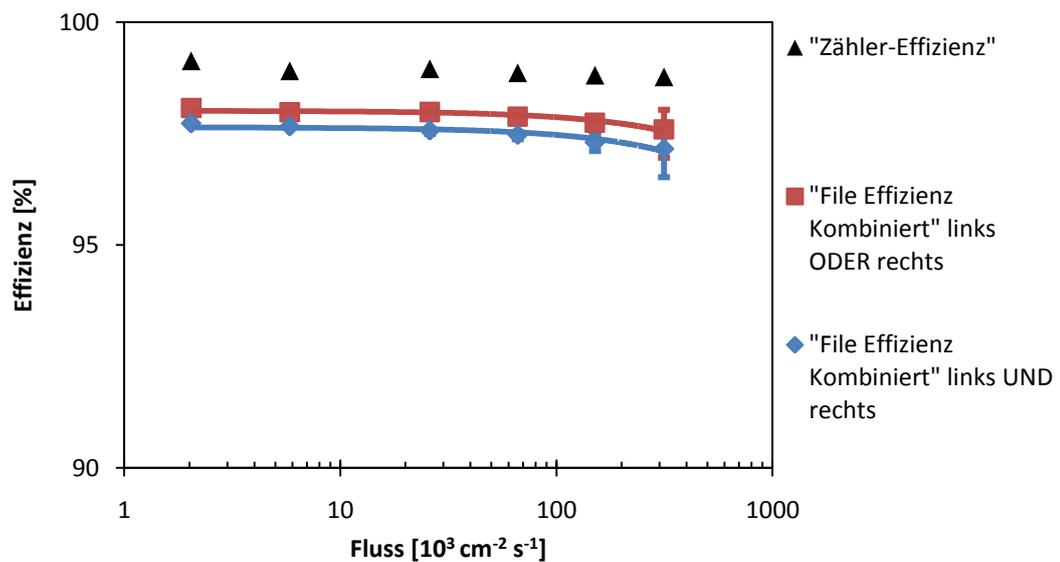


Abbildung 93: Effizienz als Funktion des Flusses für CRPC2 bei einer Betriebsspannung von 6,2 kV (Juni 2010 Strahlzeit)

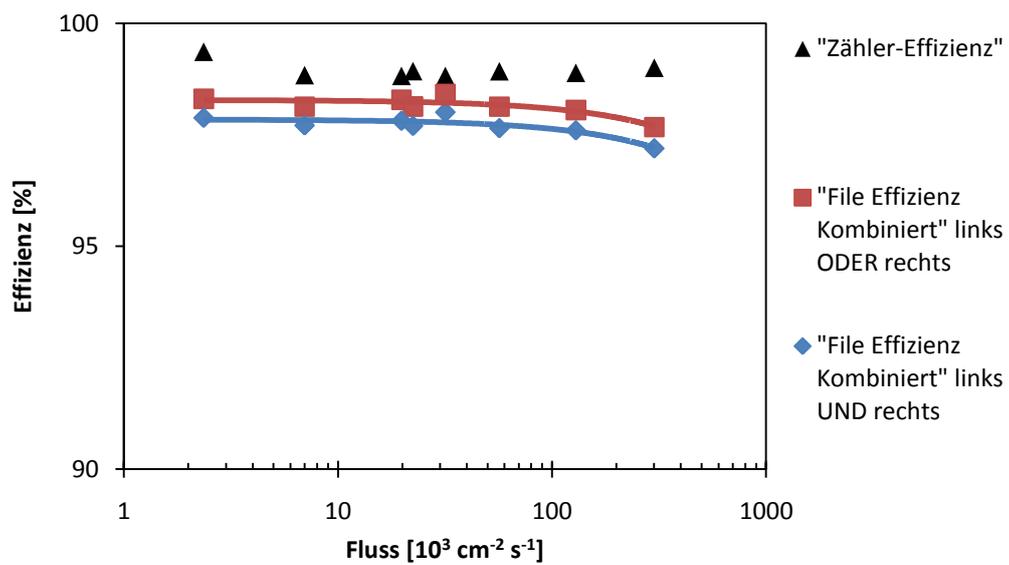


Abbildung 94: Effizienz als Funktion des Flusses für CRPC2 bei einer Betriebsspannung von 6,4 kV (Juni 2010 Strahlzeit)

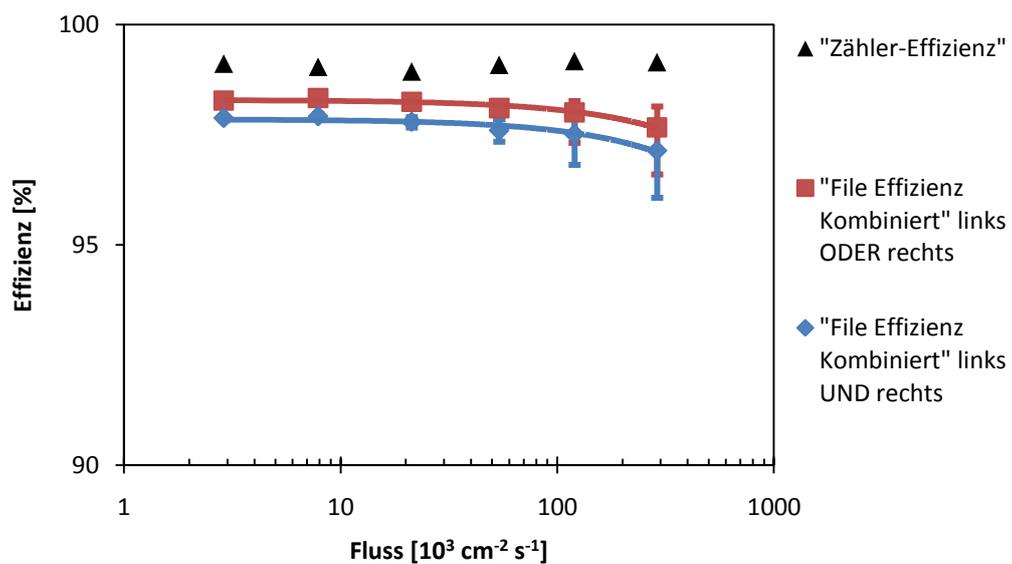


Abbildung 95: Effizienz als Funktion des Flusses für CRPC2 bei einer Betriebsspannung von 6,5 kV (Juni 2010 Strahlzeit)

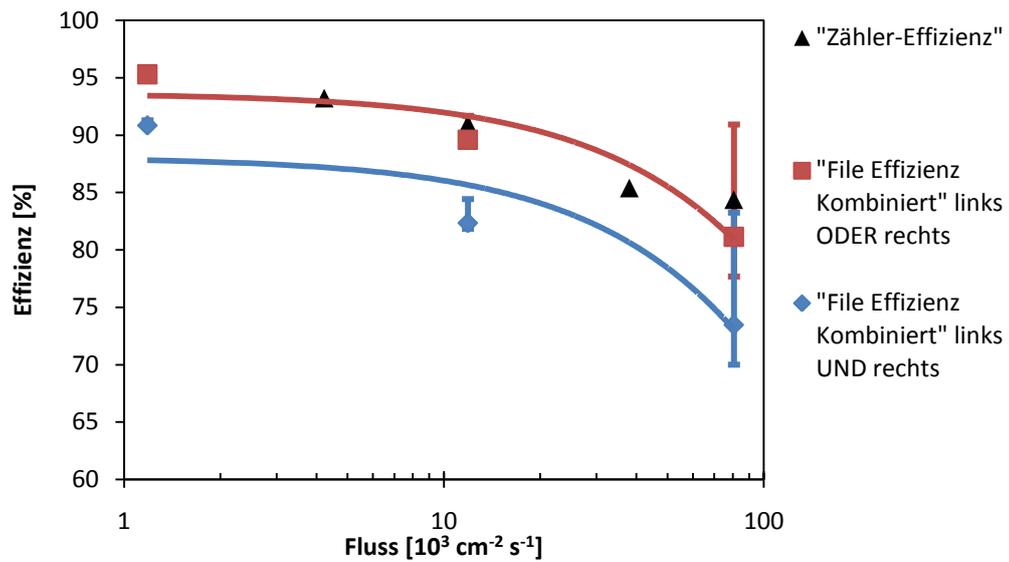


Abbildung 96: Effizienz als Funktion des Flusses für CRPC4 bei einer Betriebsspannung von 6,0 kV (November 2010 Strahlzeit)

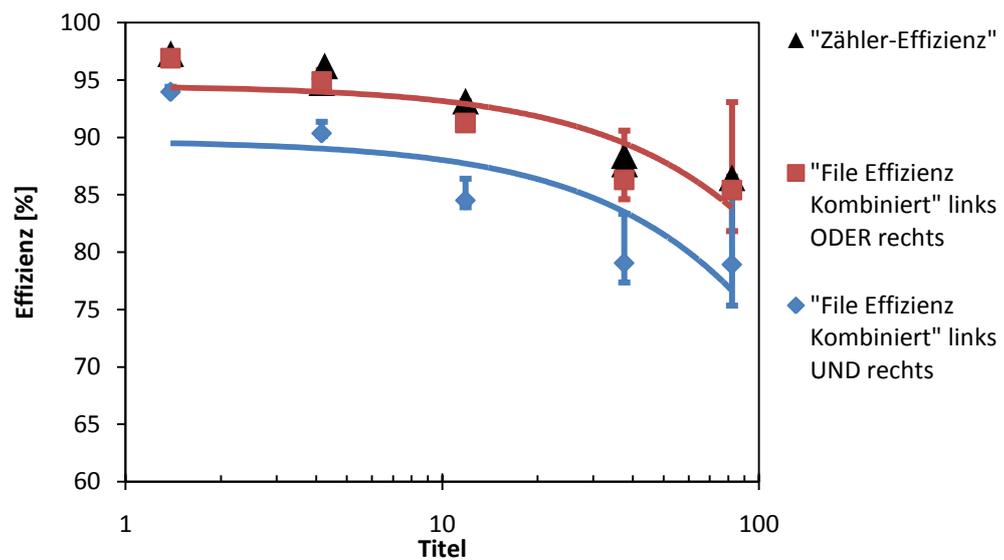


Abbildung 97: Effizienz als Funktion des Flusses für CRPC4 bei einer Betriebsspannung von 6,4 kV (November 2010 Strahlzeit)

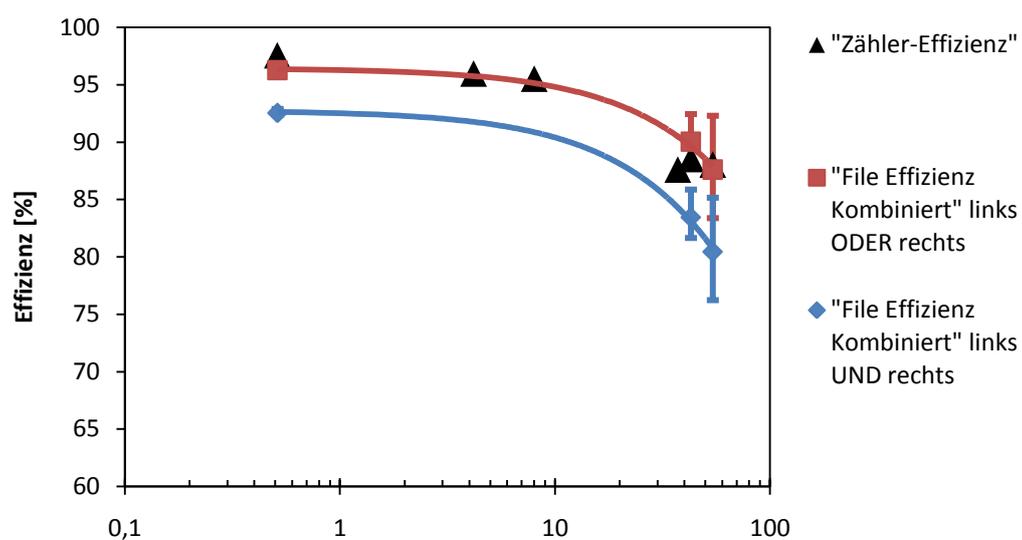


Abbildung 98: Effizienz als Funktion des Flusses für CRPC4 bei einer Betriebsspannung von 6,5 kV (November 2010 Strahlzeit)

6. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	9
Abbildung 2:	10
Abbildung 3:	12
Abbildung 4:	13
Abbildung 5:	14
Abbildung 6:	15
Abbildung 7:	17
Abbildung 8:	18
Abbildung 9:	19
Abbildung 10:	20
Abbildung 11:	20
Abbildung 12:	21
Abbildung 13:	22
Abbildung 14:	23
Abbildung 15:	24
Abbildung 16:	27
Abbildung 17:	28
Abbildung 18:	29
Abbildung 19:	29
Abbildung 20:	32
Abbildung 21:	32
Abbildung 22:	33
Abbildung 23:	34
Abbildung 24:	35
Abbildung 25:	36
Abbildung 26:	38
Abbildung 27:	39
Abbildung 28:	39
Abbildung 29:	40
Abbildung 30:	40
Abbildung 31:	41
Abbildung 32:	42
Abbildung 33:	43
Abbildung 34:	45
Abbildung 35:	46
Abbildung 36:	46
Abbildung 37:	47
Abbildung 38:	47
Abbildung 39:	48
Abbildung 40:	49
Abbildung 41:	50
Abbildung 42:	51
Abbildung 43:	51
Abbildung 44:	51
Abbildung 45:	52

Abbildung 46:	53
Abbildung 47:	54
Abbildung 48:	55
Abbildung 49:	56
Abbildung 50:	57
Abbildung 51:	58
Abbildung 52:	58
Abbildung 53:	59
Abbildung 54:	59
Abbildung 55:	60
Abbildung 56:	60
Abbildung 57:	61
Abbildung 58:	62
Abbildung 59:	63
Abbildung 60:	64
Abbildung 61:	65
Abbildung 62:	66
Abbildung 63:	67
Abbildung 64:	69
Abbildung 65:	70
Abbildung 66:	71
Abbildung 67:	71
Abbildung 68:	72
Abbildung 69:	72
Abbildung 70:	73
Abbildung 71:	76
Abbildung 72:	77
Abbildung 73:	78
Abbildung 74:	78
Abbildung 75:	79
Abbildung 76:	80
Abbildung 77:	80
Abbildung 78:	81
Abbildung 79:	82
Abbildung 80:	83
Abbildung 81:	84
Abbildung 82:	85
Abbildung 83:	86
Abbildung 84:	87
Abbildung 85:	87
Abbildung 86:	91
Abbildung 87:	91
Abbildung 88:	92
Abbildung 89:	92
Abbildung 90:	93
Abbildung 91:	93
Abbildung 92:	94
Abbildung 93:	94
Abbildung 94:	95

7. Tabellenverzeichnis

Abbildung 95:	95
Abbildung 96:	96
Abbildung 97:	96
Abbildung 98:	97

7. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	13
Tabelle 2:	18
Tabelle 3:	25
Tabelle 4:	28
Tabelle 5:	34
Tabelle 6:	43
Tabelle 7:	55
Tabelle 8:	56
Tabelle 9:	56
Tabelle 10:	56
Tabelle 11:	64
Tabelle 12:	66
Tabelle 13:	68
Tabelle 14:	69
Tabelle 15:	70
Tabelle 16:	84
Tabelle 17:	85
Tabelle 18:	85
Tabelle 19:	86

8. LITERATURVERZEICHNIS

[1]. P. Senger et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.36 (2009) 064037.

[2]. A. Kotynia, CBM Public Web. [Online] 2009. <http://cbm-wiki.gsi.de/cgi-bin/view/Public/PublicSts?skin=print.pattern>.

[3]. C. Höhne, The Ring Imaging Cherenkov Detector (RICH). [Online] 2009. <http://cbm-wiki.gsi.de/cgi-bin/view/Public/PublicRich>.

[4]. CBM collaboration. The CBM Experiment Introduction. [Online] 2010. http://www.gsi.de/forschung/fair_experiments/CBM/1intro_e.html.

- [5]. I. Deppner et al., Nucl. Instr. and Meth. A, in print doi: 10.1016 / j.nima. 2010.09.165. et al., doi:10.1016/j.nima.2010.09.165.
- [6]. G. Aielli et al., Nucl. Instr. and Meth. A 456 (2000) 77. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.
- [7]. V. Ammosov et al., Nucl. Instr. and Meth. A 576 (2007) 331.
- [8]. A. Schüttauf, Nucl. Instr. and Meth. A 533 (2004) 65.
- [9]. T. Francke et al., Nucl. Instr. and Meth. A 508 (2003) 83.
- [10]. W. Blum, W. Riegler, L. Rolandi. *Particle detection with drift chambers*. Berlin Heidelberg : Springer, 2008.
- [11]. C. Lippmann, Detector Physics of Resistive Plate Chambers, Disputation, Frankfurt am Main, 2003.
- [12]. L. Naumann et al., Nucl. Instr. and Meth. A 635 (2011) 113.
- [13]. D. Stach, Entwicklung und Test von Widerstandsplattenzählern hoher Ratenfestigkeit und Zeitauflösung. Diplomarbeit an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (2007).
- [14]. DIN IEC 93 VDE 0303 Teil 30, *Prüfverfahren für Elektroisierstoffe*. Berlin : Beuth Verlag, (1983).
- [15]. Wikipedia: Siliciumcarbid. [Online] 22. 04 2011. [Zitat vom: 01. 05 2011.]
<http://de.wikipedia.org/wiki/Siliciumcarbid>.
- [16]. Wikipedia: Siliciumnitrid. [Online] 23. 04 2011. [Zitat vom: 01. 05 2011.]
<http://de.wikipedia.org/wiki/Siliciumnitrid>.
- [17]. NASA. Space Shuttle Main Engine Enhancements. [Online] 12. 4 2008. [Zitat vom: 1. 5 2011.]
<http://www.nasa.gov/centers/marshall/news/background/facts/ssme.html>.
- [18]. L. Naumann et al., Nucl. Instr. and Meth. A, in ptint: doi: 10.1016/ j.nima. 2010.09.121.
- [19]. CAEN V965. [Online] 2011. [Zitat vom: 18. 07 2011.]
<http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?parent=11&idmod=398>.
- [20]. CAEN V1290N. [Online] 2011. [Zitat vom: 18. 07 2011.]
<http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?parent=11&idmod=403>.
- [21]. C. Lippmann, Detector Physics of Resistive Plate Chambers. Dissertation. Frankfurt am Main (2003).
- [22]. A. Blanco et al., Nucl. Instr. and Meth. A 602 (2009) 691.

DANKSAGUNG

Im Folgenden möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während der Diplomarbeit unterstützt und an deren Entstehung mitgewirkt haben:

Herrn Prof. Dr. Thomas E. Cowan für die Gelegenheit, in seinem Institut meine Diplomarbeit zu erstellen. Herrn Prof. Dr. Burkhard Kämpfer als Abteilungsleiter der Hadronenphysik für die interessante Aufgabenstellung. Herrn Dr. Lothar Nauman für die enge und konstruktive Zusammenarbeit und intensive Betreuung. Herrn A. Laso Garcia für die gemeinsame Arbeit an den Untersuchungsobjekten und die Überlassung von Messdaten. Herrn Daniel Stach für seine kompetente Unterstützung. Sowie meinen weiteren Kollegen Herrn Marcus Kaspar, Herrn Dr. Roland Kotte, Herrn Christian Wendisch und Herrn Dr. Jörn Wüstenfeld.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Michael Kobel dafür, dass er in mir die Begeisterung für Teilchenphysik geweckt hat und mir auch abseits der Physik mit seinem Rat zur Hilfe stand.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Richard Peschke
Dresden, den