

Ereignis-Rekonstruktion für CBM TRD-Testdaten

Bachelorarbeit

zur Erlangung des Abschlusses Bachelor
of Science am Fachbereich Physik der
Westfälischen-Wilhelms-Universität
vorgelegt von:

Philipp Munkes
aus Coesfeld

Abgabedatum: 29. Juli 2016
Erstgutachter: Prof. Dr. Johannes Wessels
Zweitgutachter: PD. Dr. Christian Klein-Bösing

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation	1
2. Hintergrund	3
2.1. FAIR	3
2.2. CBM	4
2.2.1. CBM TRD	5
3. Theoretische Grundlagen	6
3.1. Vieldrahtproportionalkammer	6
3.1.1. Signalentstehung	7
3.1.2. Ortsbestimmung	8
3.2. MWPC des CBM TRD Detektors	10
3.2.1. Padplane	11
3.3. SPADIC	13
3.3.1. Multihit-Erkennung	14
3.3.2. Komparatorbug	15
3.3.3. Forced-Neighbour-Readout	16
4. Aufbau und Datennahme	18
5. Datenanalyse	20
5.1. Clusterizer	20
5.1.1. Beobachtungen	22
5.2. Bestimmung einer globalen Baseline	27
5.3. Pad-Response-Function	30
6. Zusammenfassung und Ausblick	37
A. Anhang	43
A.1. MPV-Profil	43
A.2. Padplane	45

1. Motivation

Zum Verständnis der Welt ist es erforderlich, diejenigen Werkzeuge zu verstehen, mit deren Hilfe wir versuchen, uns dieses zu erarbeiten. Insbesondere in der Kern- und Teilchenphysik ist das Verständnis der Detektoren unbedingt erforderlich. Dies ergibt sich aus den hohen Anforderungen, die in dieser Disziplin an Genauigkeit und Präzision gestellt werden.

Um diese hohen Anforderungen zu erfüllen, werden die verwendeten Detektoren schon während ihrer Entwicklung intensiv anhand von Prototypen untersucht. Das dabei erlangte Wissen wird verwendet, um die Prototypen zu verfeinern und den letztendlich verwendeten Detektor für den späteren Einsatz optimal auszulegen. Für das *Compressed Baryonic Matter* Experiment ist dieser Prozess nahezu abgeschlossen, die aktuellen Prototypen entsprechen weitgehend den späteren Detektoren. Mittels ausführlicher Untersuchungen der Prototypen können daher schon im aktuellen Stadium des Experimentes viele Eigenschaften des späteren Detektors gefunden und verstanden werden.

Das Signal eines Detektors kann oftmals nicht direkt interpretiert werden. Stattdessen muss es zunächst aufbereitet und verstärkt werden. Um eine spätere Analyse zu ermöglichen, wird auch eine Digitalisierung der Messwerte durchgeführt. Da jedoch nicht jeder mögliche Messwert physikalisch interessante Informationen enthält, wird bei vielen Experimenten die Erfassung der Messwerte nur dann durchgeführt, wenn ein Teil der Detektoren ein Signal beobachtet hat, das eine sogenannte Triggerbedingung erfüllt. Sobald diese erfüllt ist, wird von einem elektronischen System, dem Trigger, die Datennahme gestartet. Je nach Experiment kann es eine, oder auch mehrere, dieser Triggerbedingungen geben, deren Kriterien nicht auf einen Teildetektor beschränkt sein müssen.

Das Design eines solchen Triggers ist oft eine der anspruchsvollsten Aufgaben beim Bau eines Beschleunigerexperimentes, da ein falsch ausgelegter Trigger die Messergebnisse massiv verfälschen kann. Weiterhin können auch bei der Implementierung des Triggers Fehler gemacht werden – ein Risiko, das mit zunehmender Komplexität des Triggers ansteigt. Die Alternative zu einem solchen komplexen globalen Trigger wäre ein Modell, in dem die einzelnen Teildetektoren dauerhaft Messwerte erfassen, diese aber nur dann abspeichern, wenn eine einfache lokale Triggerbedingung erfüllt wird. In einem solchen Modell kann die Auswahl der interessanten Messdaten später durch eine Software erfolgen, da zunächst alle physikalischen Ereignisse, die die Detektoren beobachten, erfasst werden. Dieses Modell der *frei fließenden Daten* vermeidet

die Probleme, die sich aus dem globalen Trigger ergeben, verlangt aber danach, dass die einzelnen Teildetektoren zusätzliche Logik für den lokalen Trigger und die Kommunikation mit der Datenerfassung implementieren.

Beim Experiment *Compressed Baryonic Matter* (CBM) wird dieses Prinzip erstmals großflächig angewandt, um die Erfassung großer Datenmengen über Blei-Blei-Kollisionen zu ermöglichen. Diese Datenmengen werden dazu verwendet, die Starke Wechselwirkung zu erforschen und neue Erkenntnisse zu gewinnen.

2. Hintergrund

Das Experiment *Compressed Baryonic Matter* (CBM) ist Teil des geplanten Programmes an der *Facility for Antiproton and Ion Research* (FAIR) zur Untersuchung grundlegender Eigenschaften der Starken Wechselwirkung. Insbesondere sollen hierbei neue Bereiche des Quanten-Chromo-Dynamik-Phasendiagramms erforscht werden.

2.1. FAIR

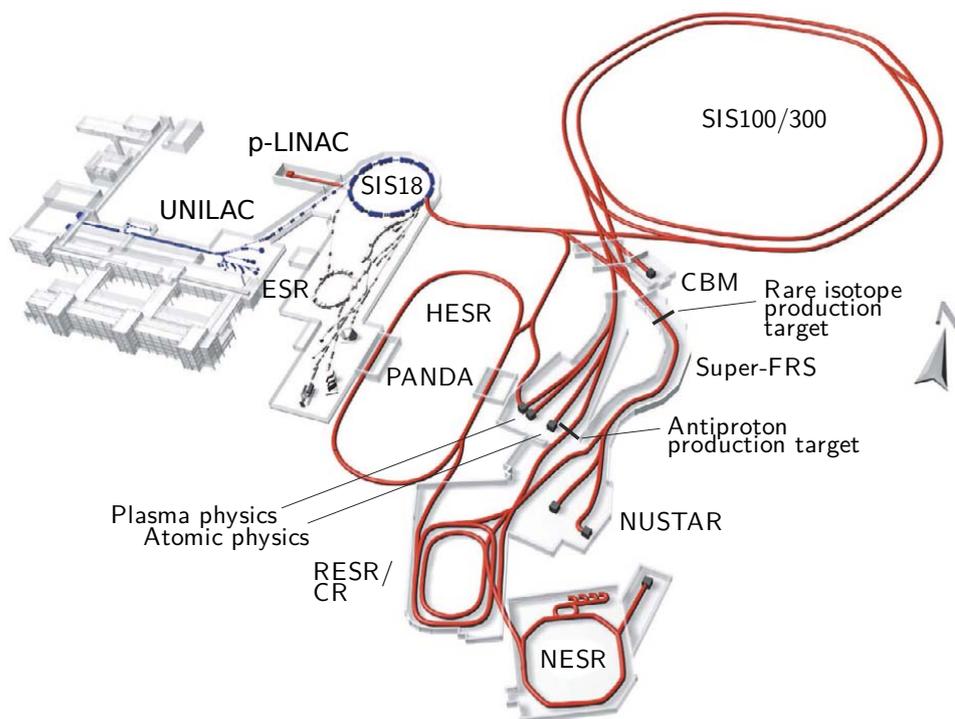


Abbildung 2.1. – Übersicht über den FAIR-Komplex mit den geplanten Experimenten und den geplanten Beschleunigern (rote Linien) und die bestehenden Anlagen an der GSI (blaue Linien)[Kle09]

Der FAIR-Komplex (siehe Abb. 2.1) ist eine, im Bau befindliche, internationale Einrichtung an der Gesellschaft zur Schwereionenforschung (GSI) zur Erforschung grundlegender Fragen in der Physik nach der Struktur der Materie und der Evolution des Universums. Das Herzstück

dieser Einrichtung ist der Beschleuniger-Doppelring SIS100/SIS300 (*Schwer-Ionen-Synchrotron*). Dieser Beschleuniger liefert den Experimenten CBM, NUSTAR und PANDA, sowie dem APPA-Laboratorium, hochrelativistische Ionenstrahlen, mit bislang in der Kombination von hoher Energie, Luminosität, Brillanz und niedriger Energiedispersion unerreichten Eigenschaften. APPA, CBM, NUSTAR greifen hierzu direkt auf den Ionenstrahl des SIS100/ SIS300 zu, während PANDA den Beschleuniger zur Erzeugung von Antiprotonen verwendet.

2.2. CBM

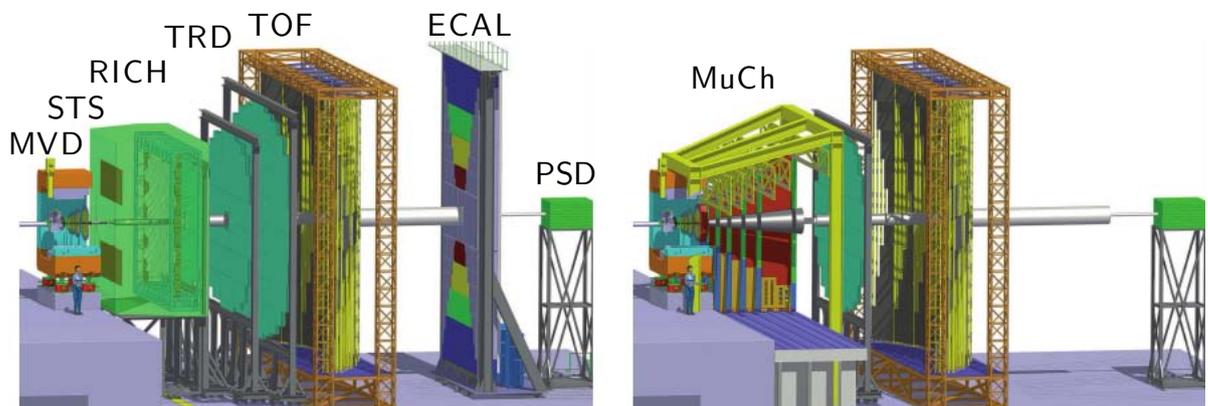


Abbildung 2.2. – Geplante Konfigurationen des CBM Detektors, links im Elektronen-Modus, rechts im Myonen-Modus [Sen09]

Das CBM Experiment (siehe Abb. 2.2) widmet sich, wie die Experimente PHENIX, STAR und ALICE, der Erforschung des QCD Phasenraumes und der Suche nach dem Quark-Gluonen-Plasma, einem extremen Materiezustand in Bezug auf Dichte und Temperatur (siehe Abb.2.3). Der Detektor ist als Fixed-Target-Experiment ausgelegt, mit dem besonders hohe Kollisionsraten erreicht werden können. Hauptziel ist dabei die Suche nach einem kritischen Punkt und die weitere Erforschung des Phasendiagramms der Starken Wechselwirkung. Hierbei wurde das Augenmerk auf einen Bereich hoher Dichten und (relativ) niedriger Temperatur gelegt, der von bisherigen Experimenten nicht detailliert untersucht wurde. Insbesondere die bestehenden Experimente am LHC und am RHIC untersuchen einen Bereich hoher Temperatur und „niedriger“ Dichte [HC09]. Bei CBM ist es durch Variation der Ionen und der Strahlenergie möglich, die Bedingungen der Kollision in einem weiten Bereich durchzustimmen und somit das Wissen über physikalische Zusammenhänge in bislang unerforschte Bereiche zu erweitern [Fri+11].

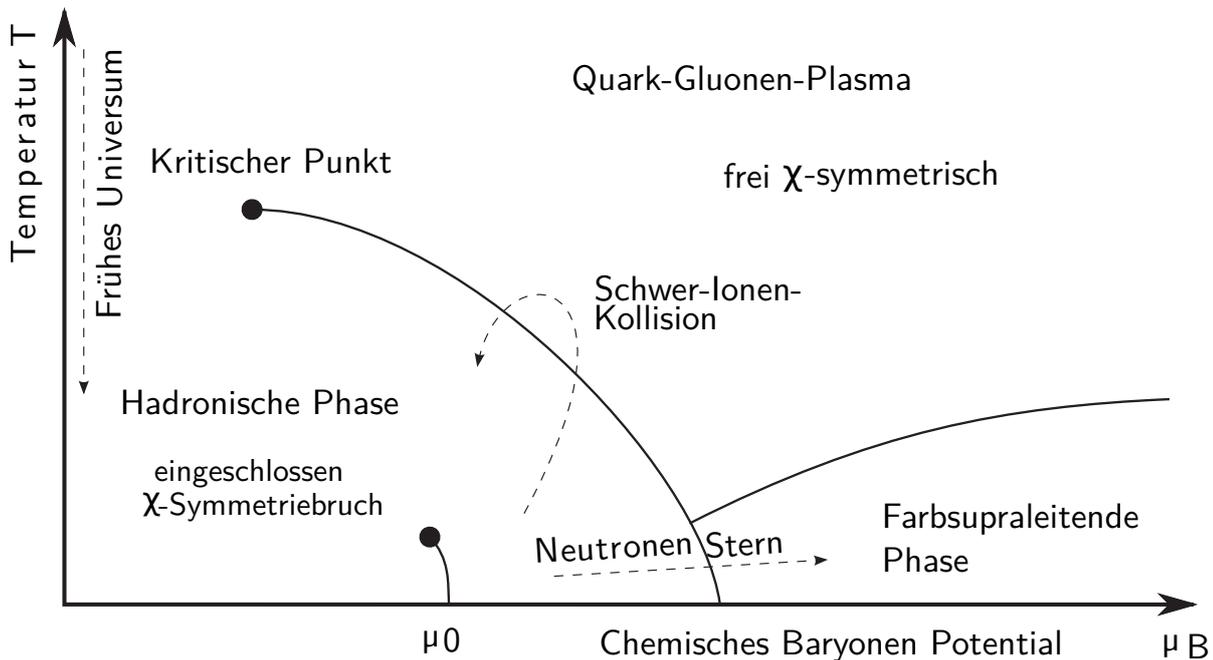


Abbildung 2.3. – Skizze des QCD-Phasendiagramms, frei nach [Ber14]. Die Baryondichte gewöhnlicher Kernmaterie ist am Punkt μ_0 eingezeichnet. Der Phasenübergang zwischen den Hadronengas und dem QGP, kann durch die Kollision schwerer Ionen untersucht werden. Ob dieser Phasenübergang einen kritischen Punkt aufweist, ist Gegenstand aktueller Forschung. Bei niedrigen Dichten und hohen Temperaturen gibt es einen Übergang, der vermutlich im frühen Universum durchquert wurde. Bei hohen Dichten und niedrigen Temperaturen, wird die Existenz einer weiteren Phase vermutet, die im Zentrum von Neutronensternen existiert.

2.2.1. CBM TRD

Wie die meisten Beschleunigerexperimente wird auch CBM aus mehreren Teildetektoren aufgebaut sein [Fri+11], von denen im Rahmen dieser Arbeit der Übergangsstrahlungsdetektor, allgemein mit TRD abgekürzt, betrachtet wird. Ein TRD besteht im allgemeinen aus einem Radiator und einem Detektor für ionisierende Strahlung. Beim CBM TRD werden als Detektor Multi-Wire-Proportional-Chambers (MWPC) verwendet.

Der CBM TRD besteht aus vier Lagen von jeweils einem Radiator und einer MWPC (siehe Abb. 3.4). Diese Kammern sind mit einem Gasgemisch aus 80% Xenon und 20% CO_2 bei nahezu Umgebungsdruck gefüllt und werden in der Kathodenebene, der *Padplane*, mit einem speziell für diesen Detektor entwickelten Mikrochip ausgelesen.

3. Theoretische Grundlagen

Da der TRD Detektor auf MWPCs basiert, wird im folgenden Kapitel kurz die Funktionsweise erläutert und die Eigenschaften zu anderen Detektoren abgegrenzt.

3.1. Vieldrahtproportionalkammer

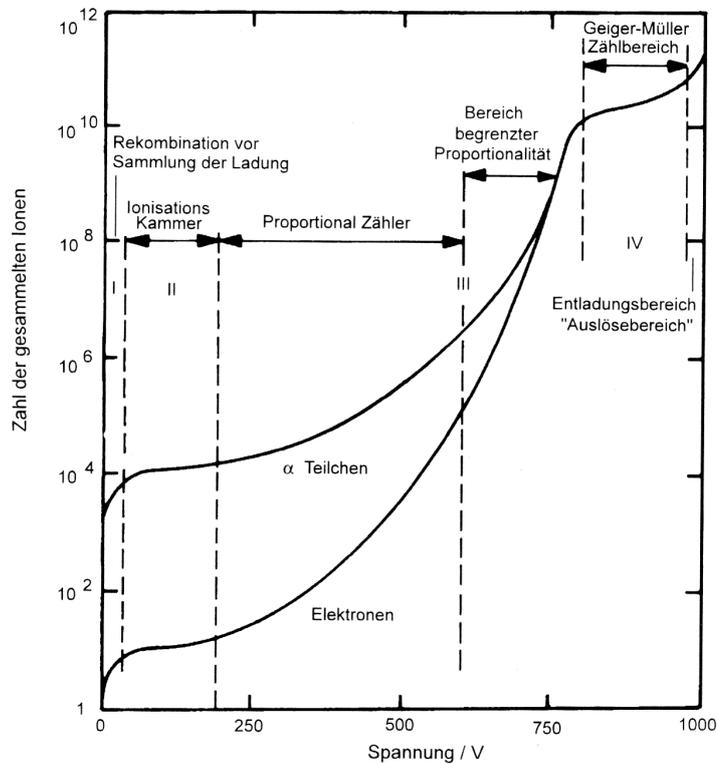


Abbildung 3.1. – Übersicht über den Verlauf des Gasverstärkungsfaktors eines Gasdetektors in Abhängigkeit von der angelegten Spannung [Sau77]

Der vielleicht bekannteste Teilchendetektortyp sind die Gasdetektoren, von denen das Geiger-Müller-Zählrohr der bekannteste Vertreter ist. Dieses wird bei einer sehr hohen Spannung betrieben, was dazu führt, dass dieser Detektor eine sehr hohe Empfindlichkeit für ionisierende Strahlung aufweist, dabei jedoch keinerlei Energieauflösungsfähigkeit besitzt [GM28].

Die verschiedenen Gasdetektoren können nach unterschiedlichen Eigenschaften charakterisiert werden, von denen hier der Gasverstärkungsfaktor kurz betrachtet werden soll (siehe Abb. 3.1). Allgemein wird dabei zwischen vier Typen unterschieden [Leo87]. Der erste dieser Typen ist die Ionisationskammer, die bei recht niedriger Spannung und Gasverstärkung betrieben wird und hauptsächlich die Elektronen der Primärionisation registriert. Bei höheren Spannungen werden nun durch Wechselwirkungen der primären Elektronen mit dem Detektorgas weitere Elektronen freigesetzt, deren Anzahl proportional zum Energieverlust im Detektor ist. Gasdetektoren im mittleren Spannungsbereich werden daher als Proportionalzähler bezeichnet und können eingesetzt werden, um neben dem Ort eines Teilchendurchgangs auch eine Messung des Energieverlustes vorzunehmen, weshalb es sich bei diesen um einen für Beschleunigerexperimente häufig verwendeten Detektortyp handelt. Auch der in dieser Arbeit untersuchte Detektor wird im proportionalen Bereich der Gasverstärkung betrieben.

Bei noch höheren Spannungen schließen die Geiger-Müller-Zählrohre an, deren Gasverstärkung maximal ist. Diese Detektoren sind nicht in der Lage, den Energieverlust eines Teilchens aufzulösen. Dafür sind sie technologisch einfach aufgebaut und weisen eine hohe Empfindlichkeit auch für schwach ionisierende Teilchen auf. Bei noch höheren Spannungen kommt man in den Betriebsbereich der Funkenkammer. Dieser Detektor ist in der Lage, die Spur eines Teilchens nachzuzeichnen, indem entlang der vom durchfliegenden Teilchen hinterlassenen Ionenspur elektrische Entladungen erzeugt werden. Diese können von einem Beobachter optisch wahrgenommen oder mittels einer Kamera aufgezeichnet werden.

3.1.1. Signalentstehung

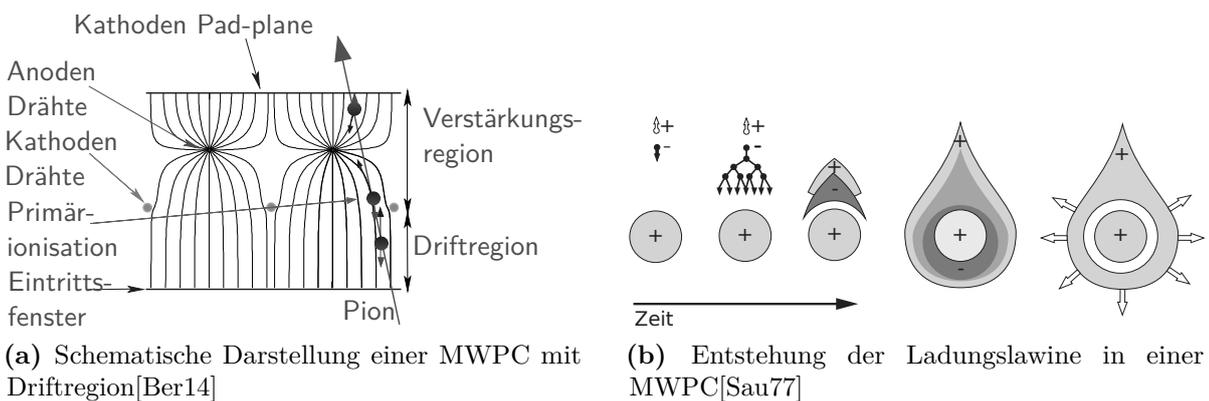


Abbildung 3.2. – Darstellung des Funktionsprinzips einer MWPC

Anhand von Abb. 3.2a und 3.2b soll nun die Entstehung der Ladungssignale einer MWPC erläutert werden. Ein in die Kammer hineinfliegendes ionisierendes Teilchen, im Beispiel ein geladenes Pion, kann mit dem Detektorgas interagieren und so eine Anzahl von primären Ionen

erzeugen. Die dabei freigesetzten Elektronen driften im anliegenden elektrischen Feld zur Anode. Aufgrund der Drahtgeometrie nimmt die elektrische Feldstärke mit abnehmendem Abstand zum Anodendraht massiv zu, was zu einer hohen Beschleunigung der Elektronen führt. Diese Beschleunigung führt zur lawinenartigen Entstehung weiterer Elektron-Ion-Paare. Die Ionen folgen dem elektrischen Feld zur Kathode, wobei sie, aufgrund ihrer deutlich größeren Masse, eine längere Zeit benötigen. Die Elektronenwolke wird nun über die Anode abgesaugt und hinterlässt die Ionenwolke, die an den Kathodendrähten neutralisiert wird.

Die so entstandene Ionenwolke induziert, nach dem Abführen der Elektronen über die Anodendrähte, auf der Kathodenebene (auch *Padplane*) Spiegelladungen, die von der Detektorelektronik ausgelesen werden können. Hierfür wird das Kathodenpad mit einem ladungsempfindlichen Verstärker verbunden, der aus dem schwachen Ladungspuls einen Spannungspuls generiert, welcher in einem messtechnisch leicht zugänglichen Bereich liegt.

3.1.2. Ortsbestimmung

Die auf der Padplane induzierte Spiegelladung wird nicht isotrop über die Padplane verteilt erzeugt, sondern um einen Bereich um den Durchgangspunkt des Teilchens konzentriert. Zur Beschreibung der entstandenen Ladungsdichte wird die von Gatti et al. [Gat+79] gefundene empirische Formel in der von Mathieson [Mat] vorgeschlagenen Form verwendet:

$$\rho(d/h) = q_a \cdot \frac{\frac{\pi}{2} \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{K_3}}{2}\right)}{4 \arctan(\sqrt{K_3})} \cdot \frac{1 - \tanh^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{K_3}}{2}\right) \frac{d}{h}\right)}{1 + K_3 \tanh^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{K_3}}{2}\right) \frac{d}{h}\right)}, \quad (3.1.1)$$

mit dem Geometrieparameter K_3 , dem Abstand der Padplane zu den Anodendrähten h und dem Abstand des Teilchens zum nächsten Padmittelpunkt, dem Versatz (englisch *Displacement*) d . Diese Ladungsverteilung wird im vorliegenden Detektor nicht räumlich kontinuierlich, sondern über ausgedehnte Bereiche der Padplane integriert ausgelesen. Diese wird in abgegrenzte Bereiche unterteilt, die sogenannten Pads, wodurch es möglich wird, einzelne Ausschnitte der Ladungsverteilung zu messen, und damit die Fähigkeit zur Ortsbestimmung zu erlangen. Der Detektor kann dabei nur die auf dem Pad induzierte Gesamtladung messen und keine feiner strukturierte Ladungsverteilung. Die Messpunkte der Pads entsprechen räumlichen Samples der Ladungsverteilung und berechnen sich über das Integral von Formel (3.1.1) über ein einzelnes

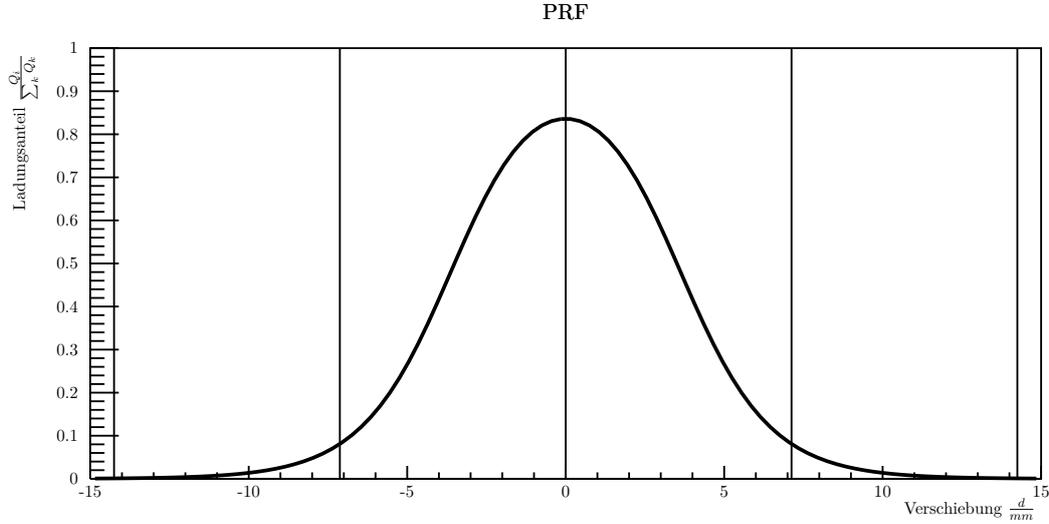


Abbildung 3.3. – PRF nach Formel (3.1.2) für den Münsteraner Vieldrahtproportionalkammer-Prototyp (2012) mit einem Geometrieparameter $K_3 \approx 0,38$ und einer Padbreite $W = 7,125$ mm. Eingezeichnet sind die Messpunkte, die Mittelpunkte der Pads mit induzierter Ladung, für ein zentral auftreffendes Teilchen.

Pad mit der Breite W [Ber14]:

$$\begin{aligned} \text{PRF}(d/h) &= \int_{d/h-W/2}^{d/h+W/2} \rho(d'/h) d(d'/h) dd' \\ \Rightarrow \text{PRF}(d/h) &= - \frac{\arctan\left(\sqrt{K_3} \tanh\left(\pi\left(\sqrt{K_3}-2\right) \cdot \frac{W-2 \cdot d}{8 \cdot h}\right)\right)}{2 \arctan\left(\sqrt{K_3}\right)} \\ &\quad - \frac{\arctan\left(\sqrt{K_3} \tanh\left(\pi\left(\sqrt{K_3}-2\right) \cdot \frac{W+2 \cdot d}{8 \cdot h}\right)\right)}{2 \arctan\left(\sqrt{K_3}\right)} \end{aligned} \quad (3.1.2)$$

Nach Bergmann [Ber14] lässt sich für die vorliegenden Kammern $K_3 \approx 0,38$ abschätzen. Dies führt bei einer Padbreite von 7,125 mm zu dem in Abb. 3.3 dargestellten Ladungsverlauf mit den eingezeichneten Samplingpunkten für ein zentral auftreffendes Teilchen.

Aus den Messdaten soll später der tatsächliche Wert für den verwendeten Prototypen anhand einer berechneten *Pad-Response-Function* (PRF) bestimmt werden. Zur Bestimmung der PRF ist es jedoch notwendig, sowohl das Displacement jedes Teilchens gegenüber dem zentralen Pad, als auch die anteilige Ladung der einzelnen Pads zu bestimmen. Formel (3.1.2) ist zur Positionsbestimmung eines Teilchens leider ungeeignet, da für jeden Ladungscluster die Verteilung angefitet werden muss und der Parameter K_3 bekannt sein muss. Dieses Verfahren der Rekonstruktion ist sehr aufwendig, insbesondere im Bezug auf die notwendige Rechenzeit, und mit einer Kalibrationsmessung verbunden, weshalb verschiedene Rekonstruktionsformeln

entwickelt wurden. In dieser Arbeit wird der Ansatz des quadrierten hyperbolischen Sekans (*SECHS*) zur Positionsbestimmung von Drei-Pad-Clustern verwendet:

$$d = \frac{a_3}{\pi} \tanh^{-1} \left(\frac{\sqrt{Q_i/Q_{i-1}} - \sqrt{Q_i/Q_{i+1}}}{2 \sinh((\pi W)/a_3)} \right) \quad (3.1.3)$$

$$a_3 = \frac{\pi W}{\cosh^{-1} \left(0,5 \cdot \left(\sqrt{Q_i/Q_{i-1}} + \sqrt{Q_i/Q_{i+1}} \right) \right)}$$

Diese (von [LP95], [LST72],[Bar+85] und [Ott+99] vorgeschlagene) Formel rekonstruiert aus der Verteilung der drei Ladungen $Q_{i\pm\{0,1\}}$ das Displacement bezogen auf den Mittelpunkt des mittleren Pads i . In dem speziellen Fall, dass ein Teilchen zwischen zwei Pads den Detektor passiert hat, kann diese Formel auch auf den dabei entstehenden 4-Pad-Cluster angewendet werden. Hierzu wird für die drei benachbarten linken und die drei benachbarten rechten Pads jeweils ein Erwartungswert des Displacements berechnet und der Mittelwert der beiden Erwartungswerte gebildet. Eine alternative Formel, die auf den Ladungsanteilen auf den Pads beruht, ist der *Center-of-Gravity*-Ansatz:

$$d_{\text{CoG}} = \frac{\sum_{k=i-1}^{i+1} Q_k \cdot x_k}{\sum_{k=i-1}^{i+1} Q_k} - x_i \quad (3.1.4)$$

Dieser Ansatz liefert einen über den Ladungsanteil gewichteten Mittelwert der Padpositionen $x_{i\pm\{0,1\}}$ und zieht davon die Position des mittleren Pads ab.

Der Detektor wird an den Kathodenpads mit einem speziell für den CBM TRD entwickelten ASIC¹ ausgelesen. Dieser Chip, der *Self-triggered Pulse Amplification and Digitization asIC* (SPADIC) [AFP10] ist unter anderem in der Lage nicht nur einzelne räumliche Samples der Ladungsverteilung eines Clusters, sondern stattdessen gleichzeitig mehrere Samples zu nehmen, ohne dass jedes einzelne Pad die Triggerbedingung erfüllt. Diese Samples werden mit einem Zeitstempel versehen, in einzelne Nachrichten verpackt und an die Datenaufzeichnung abgeschickt.

3.2. MWPC des CBM TRD Detektors

Bei der MWPC des CBM TRD-Detektors handelt es sich um eine asymmetrische Vieldrahtproportionalalkammer mit einer Driftregion von 5,0 mm [Ber14]. Durch die erweiterte Driftregion wird die Akzeptanz des Detektors für Übergangsstrahlungsphotonen gegenüber einer symmetrischen MWPC verbessert. Die weiteren relevanten Abmessungen der Kammer sind:

¹Application Specific Integrated Circuit

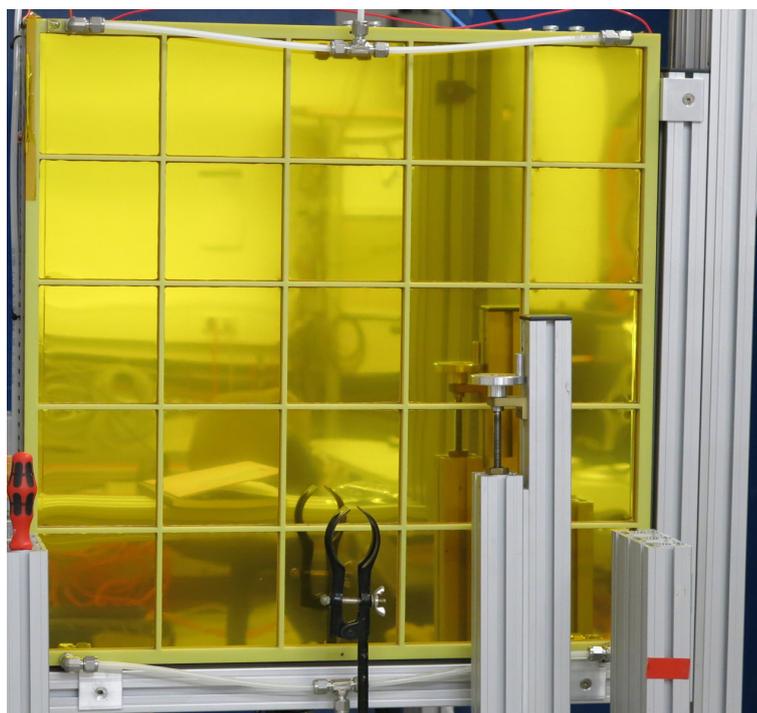


Abbildung 3.4. – Frontansicht eines 2012er MWPC Prototyps im Labor. Deutlich zu erkennen ist das goldene Eintrittsfenster, mit dem stützenden Gitter, und die Halterung für radioaktive Quellen davor. Diese kann für Kalibrationsmessungen verwendet werden. Am oberen und unteren Rand der Kammer sind die Gaszu- und Gasableitungen zu erkennen.

Abstand Anode/Kathode $h = 3.5 \text{ mm}$

Abstand Anode/Anode $s = 2.5 \text{ mm}$

Anodendrahradius $r_a = 20 \text{ }\mu\text{m}$

Padbreite $W = 7,125 \text{ mm}$

Beim Eintrittsfenster handelt es sich um eine einseitig mit Aluminium beschichtete Kaptonfolie, die mithilfe von Profilen abgestützt wird (Abb. 3.4). Die Anoden- und Kathodendrähte sind nicht instrumentiert und werden nur verwendet, um die, für den Betrieb, notwendige Hochspannung zu liefern. Die Datenauslese erfolgt ausschließlich über die Padplane.

3.2.1. Padplane

Beim Design einer Padplane sind verschiedene Anforderungen, wie ein möglichst geringes Übersprechen und eine möglichst hohe Platzeffizienz, zu vereinbaren, siehe [Ems13] und [Ems14]. Beide Anforderungen können, abhängig von der erforderlichen Granularität, dadurch erfüllt werden, dass rechteckige Pads in zwei Reihen verwendet werden [Ber14]. Diese Anordnung

minimiert die Strecke, die eine Signalleitung über ein anderes Pad läuft, und stellt gleichzeitig eine einfache und kompakte Form der Padplane dar. Gleichzeitig müssen diese Signalleitungen mit dem SPADIC verbunden werden, ohne dass die Leitungsführung an den Stecker zu komplex wird. Die verwendete Padplane ist im Anhang in Abb. A.3 dargestellt, im Rahmen dieser Arbeit ist allerdings nur die Zuordnung der Pads zu den einzelnen Kanälen von Interesse, siehe Abb. 3.5.

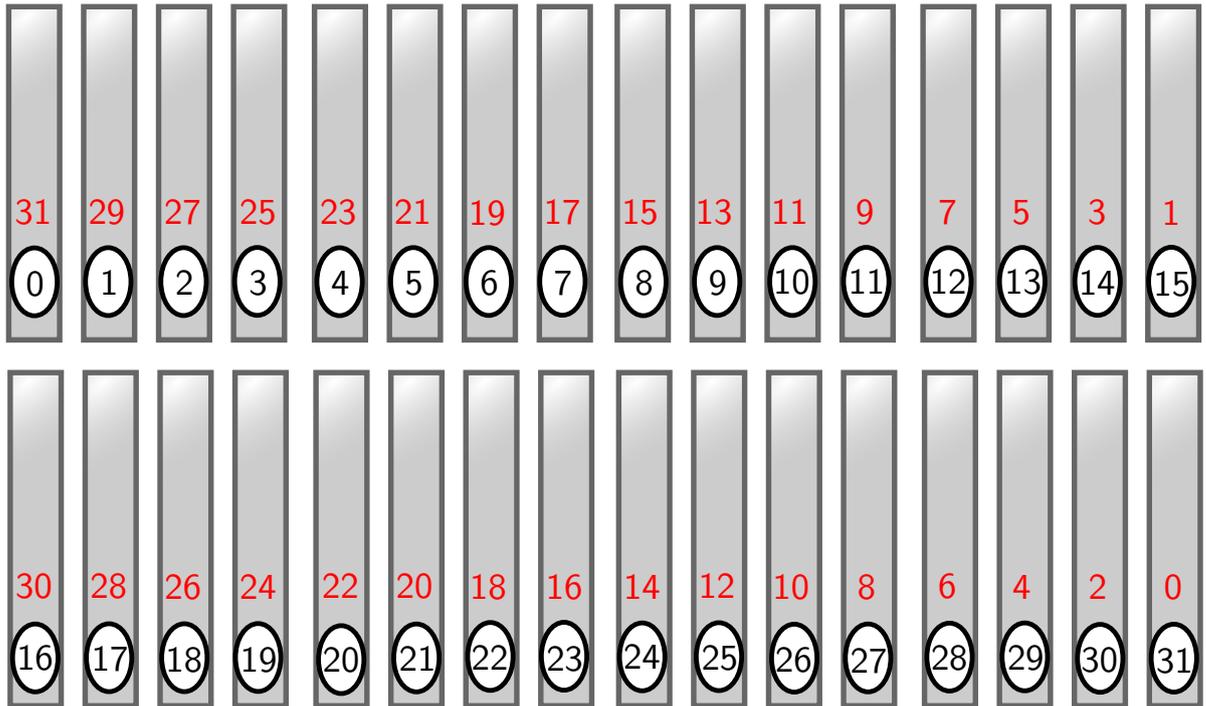


Abbildung 3.5. – Darstellung der Pads (eingekreist) und der dazu gehörigen Kanäle des SPADIC (rot) in Blickrichtung entgegen des Strahls. Nach der Konvention des CBM Detektors werden die Pads in Blickrichtung zum Target von links oben nach rechts unten zeilenweise durchnummeriert.

Da die Daten des ASICs im Channelraum, die physikalische Observablen jedoch im Padraum vorliegen, wird die Übersetzung zwischen den beiden Räumen während der Analyse durchgeführt, insbesondere um eine Resortierung der Nachrichten zu ermöglichen. Dies führt dazu, dass in der Analysesoftware jeder SPADIC-Kanal auf ein Pad abgebildet werden muss. Für die in Abb. A.3 abgebildete Padplane lautet dieses Mapping²:

```
1 int ChannelOnPadplane [32] = {31,15,30,14,29,13,28,12,27,11,26,10,25, 9,24, 8,
2                               23, 7,22, 6,21, 5,20, 4,19, 3,18, 2,17, 1,16, 0};
```

²Die Funktion `GetChannelOnPadplane` gibt für den SPADIC-Kanal n den n -ten Eintrag aus dem Array `ChannelOnPadplane` zurück. Dieser gibt das dazugehörige Pad auf der Padplane an.

3.3. SPADIC

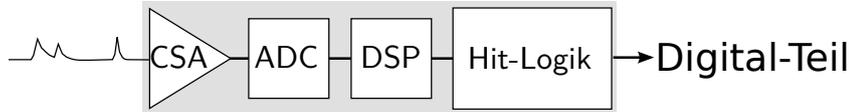


Abbildung 3.6. – Schematische Darstellung des Signalflusses im analogen Teil des SPADIC, nach [Kri14]. Ein vom Detektor erzeugtes Ladungssignal wird zunächst durch den *Charge-Sensitive-Amplifier* verstärkt, durch den Analog-Digital-Wandler (*Analog-Digital-Converter*) digitalisiert, eventuell digital nachbearbeitet und an die Hit-, bzw. Triggerlogik übergeben. Diese zeichnet die Nachricht gegebenenfalls auf und übergibt die Samples zusammen mit dem Zweitstempel des Triggers an den Digitalteil des SPADIC, der die Kommunikation mit der Datenaufzeichnung durchführt.

Die Datennahme im CBM-Experiment basiert auf dem Prinzip frei fließender Daten, bei dem die Sensoren sich eigenständig triggern und die Daten selbstständig an die Datenaufzeichnung senden. Die Teildetektoren werden hierzu mittels eigens entwickelter ASICs ausgelesen, die in der Lage sind, ohne einen globalen Trigger festzustellen, dass gerade ein physikalisches Ereignis stattgefunden hat und anschließend die lokale Datennahme zu starten. Diese einzelnen Ereignisse werden mit einem Zeitstempel versehen und über eine digitale Verbindung an die Aufzeichnungselektronik geschickt, die diesen frei fließenden Datenstrom aufzeichnet.

Beim SPADIC handelt es sich um den für den TRD entwickelten ASIC, der speziell auf die Anforderungen einer MWPC abgestimmt ist. Er weist 32 Kanäle zur Datennahme auf, die jeweils aus einem analogen CSA³ und Signal-Former, sowie einem vorzeichenbehafteten 8-Bit-Analog-Digitalwandler bestehen (siehe Abb. 3.6). Das Impulsantwortverhalten folgt der Formel [Arm13]:

$$V_{\text{aus}}(t) = Q_i \frac{\text{const}}{\tau_s^2} t e^{-\frac{t}{\tau_s}}, \quad (3.3.1)$$

mit der induzierten Ladung Q_i und der Zeitkonstanten des Signalumformers, der *shaping time* τ_s . Das bedeutet, dass die Amplitude V_{aus} des digitalisierten Signales proportional zur induzierten Ladung Q_i ist. In der vorliegenden Arbeit wird daher der Maximalwert der ADC-Samples in einer Nachricht, im Folgenden als MaxADC bezeichnet, abzüglich einer möglichen Baseline als Einheit der induzierten Ladung verwendet.

Die einzelnen SPADIC-Kanäle liefern kontinuierlich einen Strom von Samples, die dem Digitalteil des SPADICs übergeben werden.⁴ Dieser digitale Datenstrom kann noch durch einen digitalen IIR-Filter⁵ nachbearbeitet werden, bevor er an die Triggerlogik übergeben wird. Die Triggerlogik des Kanals entscheidet nun anhand eines Algorithmus, ob gerade ein physikalisches Ereignis stattgefunden hat und zeichnet bei positivem Ergebnis die nächsten 32 Werte auf. Die

³Charge Sensitive Amplifier

⁴Der AD-Wandler wird, nach Konvention des Entwicklers, dem Analogteil des SPADICs zugerechnet.[Arm13]

⁵Infinite Impulse Response

Triggerbedingung für drei aufeinander folgende Samples a , b , c und die beiden Schwellwerte $t1$, $t2$ lässt sich wie folgt zusammenfassen (Darstellung als C++ Code):

```
1 bool g = (a > t1) && (b > t2)
2 bool h = (b > t1) && (c > t2)
3 bool t = !g && h
```

Ein Triggersignal wird dann ausgesendet, wenn t als wahr ausgewertet wird. Im Rahmen der untersuchten Daten gilt stets $t1 = t2$, damit vereinfacht sich die Triggerbedingung zu:

```
1 bool t = (a <= t1) && (b > t1) && (c > t1)
```

Durch diese Triggerbedingung müssen mindestens zwei Samples in Folge über der eingestellten Schwelle liegen. Die aufgezeichneten Nachrichten, des SPADIC 1.0, enthalten dabei ein zusätzliches Sample, vor den drei in die Triggerbedingung eingehenden Samples.

3.3.1. Multihit-Erkennung

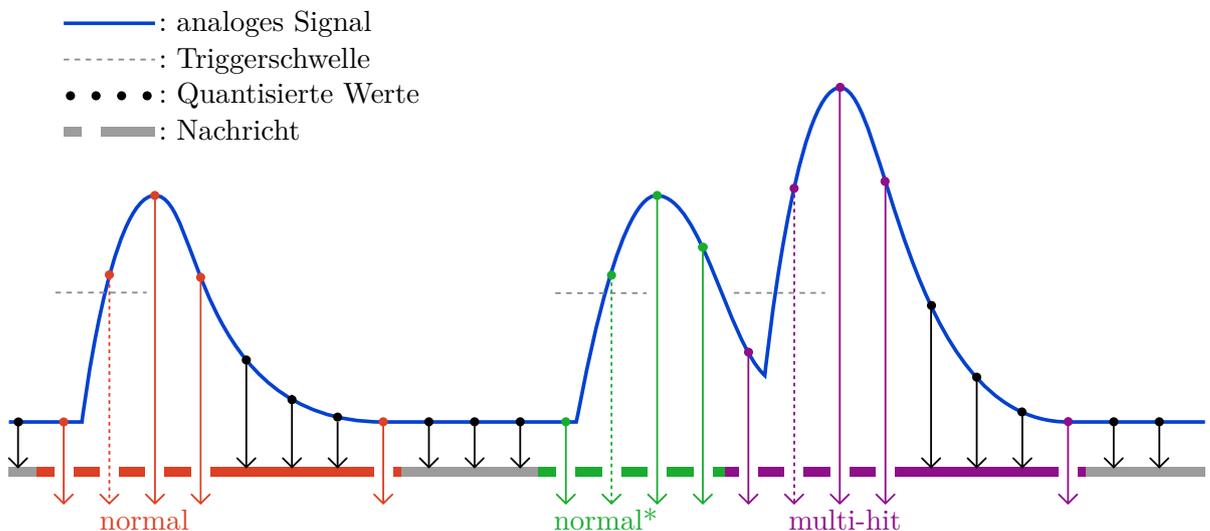


Abbildung 3.7. – Schematische Darstellung der *Multihit*-Erkennung des SPADIC, frei nach [Arm13]. Ein Triggersignal wird ausgelöst, wenn ein Sample x_0 unterhalb der Triggerschwelle liegt und die zwei folgenden Samples x_1 (markiert durch eine gestrichelte Linie) und x_2 nacheinander die Triggerschwelle überschreiten. Dieses führt zur Aufzeichnung einer Nachricht mit 32 Samples, in der Standardkonfiguration des Chips. Im Beispiel sind die ersten drei Samples der Nachricht die Samples, die in die Triggerbedingung eingehen. Wird die Triggerbedingung während der laufenden Aufzeichnung einer Nachricht erfüllt, so wird die Aufzeichnung abgebrochen und eine neue Nachricht begonnen. Diese Nachricht ist in der Zeichnung mit dem Stern gekennzeichnet und wird im Datenstrom mit einem speziellen Stop-Typ versehen.

Aufgrund der hohen erwarteten Ereignisrate am SIS 100 ist es möglich, dass während der Aufzeichnung einer Nachricht ein weiteres Teilchen den Detektor passiert und eine weitere Ladungslawine verursacht. Damit die einzelnen Ereignisse im nachrichtenbasierten Datenmodell des SPADIC unterscheidbar bleiben, muss bei der Erkennung eines solchen überlappenden Ereignisses eine neue Nachricht generiert werden (siehe Abb. 3.7). Diese zweite Nachricht wird als *Multihit* bezeichnet, sie ist jedoch im Datenstrom des SPADIC 1.0 nicht besonders ausgezeichnet. Die Information, dass ein Multihit stattgefunden hat, ist im sogenannten Stop-Typ der abgebrochenen Nachricht enthalten. Eine wichtige Eigenschaft dieses Mechanismus ist es, dass kein Sample bei der Generierung eines Multihits verloren geht. Die Samples des Multihits schließen direkt an die Samples der vorhergehenden Nachricht an.

3.3.2. Komparatorbug

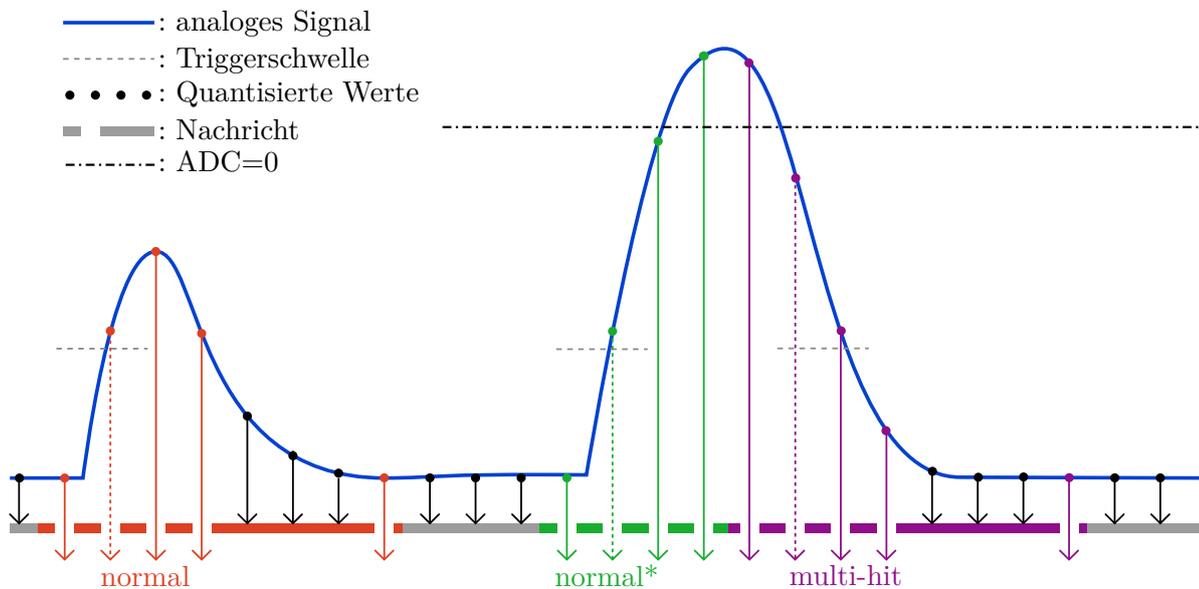


Abbildung 3.8. – Schematische Darstellung des Komparatorbugs des SPADIC 1.0, Darstellung frei nach [Arm13], Quelle: [Kri14]. Ein über der Nulllinie liegendes Sample setzt die Triggerbedingung zurück, was zur Generierung eines neuen Triggersignals beim Nulldurchgang zu den negativen Werten führt.

Bei den ersten Tests des SPADIC wurde ein Fehler im Komparator der Triggerlogik gefunden, der in bestimmten Situationen die Erzeugung eines Triggersignals verhindern, bzw. zur Erzeugung von zusätzlichen Triggersignalen führen kann [Kri14]. Dieser Fehler besteht darin, dass der Komparator beim Vergleich einer positiven und negativen Zahl immer die negative Zahl als die größere erkennt. Dies führt dazu, dass ein Signal, welches einen Nulldurchgang aus dem positiven Bereich in den negativen aufweist, bei diesem ein neues Triggersignal generiert (Abb. 3.8). Dadurch wird ein zusätzlicher „Multihit“ generiert, der die Nachricht abbricht und in zwei Teile

aufspaltet. Eine Rekonstruktion des ursprünglichen Signalverlaufes wäre theoretisch möglich, da dieser Fehler in den kommenden Versionen des Chips, SPADIC 1.1 und 2.0, behoben wird [KF16], wird hier darauf verzichtet. Die durch den Komparatorbug gespaltenen Nachrichten werden in der vorliegenden Arbeit als fragmentierte Nachrichten bezeichnet.

3.3.3. Forced-Neighbour-Readout

Um in einer MWPC eine genaue Ortsbestimmung durchzuführen, ist es notwendig nicht nur diejenigen Pads pro Ladungscluster auszulesen, die die Triggerbedingung erfüllen, sondern auch die benachbarten Pads. Da benachbarte Pads, nach Formel (3.1.2), meist nur einen Bruchteil der Ladung des zentralen Pads messen, ist es bei herkömmlichen Detektoren notwendig, die Triggerschwelle auf einen niedrigen Wert zu setzen, der nur knapp oberhalb des Rauschens liegt. Um die Zahl der fälschlich ausgelösten Pads zu minimieren und gleichzeitig die Cluster möglichst vollständig auszulesen, wird ein Mechanismus benötigt, der das Auslösen einzelner Pads als Triggerbedingung für die benachbarten Pads akzeptiert. Ein solcher Mechanismus ermöglicht eine hohe Triggerschwelle, ohne dass hierbei Informationen über die Ladungsverteilung verloren gehen. Zur Umsetzung eines solchen Mechanismus wurde im SPADIC eine Funktion namens *Forced-Neighbour-Readout* (FNR) implementiert [Arm13].

FNR ermöglicht, dass sich an das aktuelle Setup angepasste Triggerschemata umsetzen lassen. Dadurch können beliebige Gruppen von Pads gleichzeitig ausgelesen werden, wobei die Information über den jeweils aktiven Trigger-Mechanismus im sogenannten Triggertyp gespeichert wird. In den, dieser Arbeit zugrundeliegenden, Daten treten ausschließlich Nachrichten mit den beiden Triggertypen 1 (*Self-Triggered Readout*, 0b001⁶) und 2 (FNR, 0b010) auf, die auch gemeinsam auftreten können. Für jedes Pad, für das die Triggerbedingung erfüllt ist, sendet der SPADIC eine Nachricht mit dem Triggertyp 1 aus und für jedes Pad, das über den FNR-Mechanismus ausgelöst wird, eine Nachricht mit dem Triggertyp 2. Diese Information eignet sich daher zur Rekonstruktion der ursprünglichen Ladungscluster. Diese „normalen“ 3 Pad Cluster weisen somit die Triggertyp-Zusammensetzung FNR|STR|FNR auf.

Diese Funktion unterliegt gewissen Einschränkungen, die sich aus der logischen Struktur des SPADICs ergeben. Der SPADIC ist intern so organisiert, dass er aus zwei nahezu vollständig autonomen Halbchips mit je 16 Kanälen aufgebaut ist. Innerhalb dieser Hälften können beliebige Triggerschemata umgesetzt werden, da jeder Kanal jeden anderen Kanal auslösen kann. Um auf anderen Chips ein solches Signal zu triggern, sind sechs bidirektionale Verbindungen zu anderen Chips vorgesehen, von denen jeweils drei als Gruppe ausgebildet sind. Von diesen ist pro Halbchip je eine Gruppe für die Verbindung zum anderen Halbchip vorgesehen.

Da diese Funktion dazu gedacht ist, die Ladung eines Clusters vollständig zu erfassen, müssen

⁶0b001 ist eine drei Bit Binärzahl.

zu jedem selbst ausgelösten Pad die benachbarten Pads ausgelöst werden. Da im Padraum benachbarte Pads im Channelraum nicht direkt benachbart sind, muss dieser Effekt bei der Programmierung der Neighbour-Trigger-Matrix berücksichtigt werden.

4. Aufbau und Datennahme

Die im Rahmen dieser Arbeit analysierten Daten wurden bei einer Strahlzeit im November 2015 am Super-Proton-Synchrotron (SPS) mit dem 2012er MWPC Prototypen des Instituts für Kernphysik Münster aufgenommen [Ber+16]. Der Bleiionenstrahl war auf eine Energie von 30 AGeV eingestellt und wurde für ein Fixed-Target-Experiment mit einer variablen Anzahl von Blei-Folien verwendet. Das verwendete Cave¹ war ein Bunker im Bereich H4 der North Area. Der Belegungsplan dieses Bunkers während der Strahlzeit ist in Abb. 4.1 einsehbar.

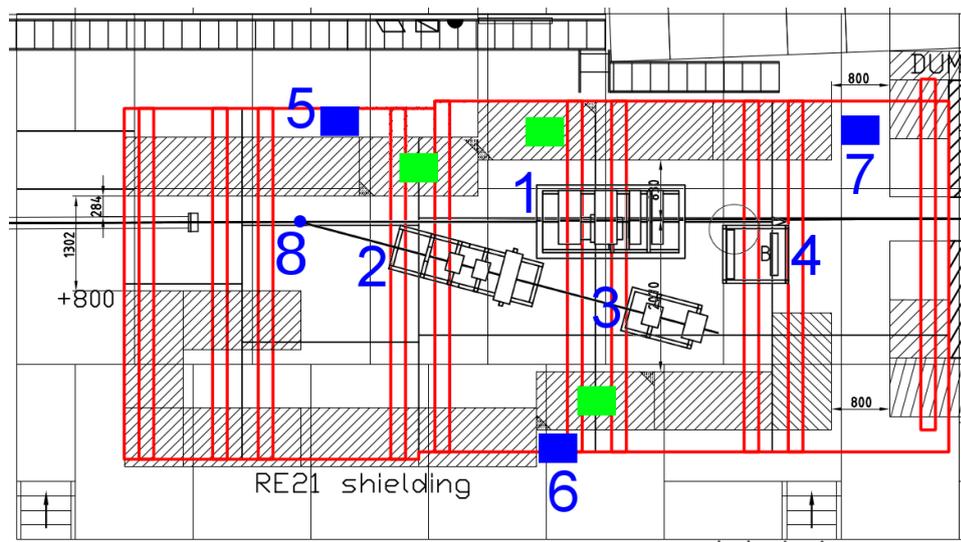


Abbildung 4.1. – Aufbau der CBM-Prototypen während der SPS-Strahlzeit[Ber+16]. Der Münsteraner MWPC-Prototyp war an Position 4 aufgebaut, die Kontrollelektronik und die Gas- und Hochspannungsversorgung befand sich an Position 7. An Position 1 waren die Time-of-Flight-Prototypen aus Frankfurt und Heidelberg aufgebaut. Die Bucharester MWPC-Prototypen befanden sich Position 2 und an Position 3 stand der Bucharester TOF-Prototyp.

Der Prototyp wurde mit einem Gasgemisch aus Argon/CO₂, Mischung ungefähr 4:1, bei einer Anodenspannung von 1850 V und einer Kathodenspannung von -500 V betrieben. Die Datennahme erfolgte durch einen angeschlossenen SPADIC (siehe Abb. 4.2), der über die

¹Ein Cave ist eine Halle mit der notwendigen Infrastruktur zum Betrieb von Hochenergiephysikexperimenten an einem Teilchenbeschleuniger. Meist befindet sich ein Cave unter dem Erdboden, daher wird als Bezeichnung das englische Wort für Höhle verwendet.

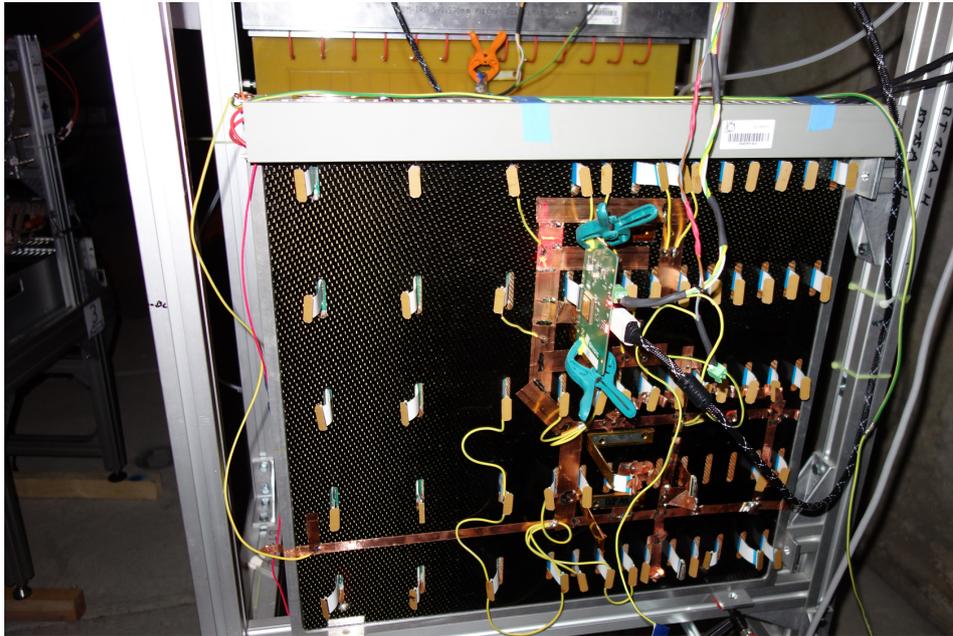


Abbildung 4.2. – Aufbau des Detektor Prototypen auf der Strahlzeit. Der SPADIC befindet sich auf der grünen Platine im Vordergrund und ist an die MWPC, von der nur die Rückseite zu sehen ist, angeschlossen. Der Datentransport erfolgt über das HDMI-Kabel im Vordergrund.

CBMNet-*Data-Aquisition-Chain* (DAQ) mit dem Kontroll-Computer verbunden war. Das hierbei verwendete CBMNet-Protokoll implementiert eine eigens für CBM entwickelte Architektur zur vollständig digitalen Konfiguration, Synchronisation und Auslese der Sensoren. Der SPADIC, im Schema als *Front End Electronics* bezeichnet, ist an ein Konzentrationboard, das Syscore, angeschlossen, welches die logische Verbindung zu den einzelnen SPADICs über eine *Low Voltage Differential Signalling* Verbindung herstellt und die Uhren der Chips synchronisiert. Das Syscore ist über eine optische Glasfaserverbindung mit dem *First Level Event Selection Input Board*, FLIB, verbunden, bei welchem es sich um ein *Field Programmable Gate Array* handelt, das die serverseitige Komponente von CBMNet implementiert. Die Datenaufzeichnung und die Generierung des Taktes erfolgt auf der Strahlzeit durch den *FLIB-PC*, in dem dieses eingebaut ist.

Die Entwicklung des CBMNet-Protokolls wurde inzwischen zugunsten einer auf dem CERN-Standard *GBT-X* basierenden DAQ eingestellt. Die GBT-X-Verbindung ist das Hauptmerkmal des SPADIC 2.0, der wahrscheinlich finalen Version des Chips, dessen Fertigstellung für September 2016 geplant ist.

5. Datenanalyse

Die Datenanalyse erfolgte mittels des Softwarepakets CBMROOT [ABK04], einer speziell auf die Anforderungen des CBM Experimentes angepassten Variante des Datenanalysepaketes ROOT [BR97]. Alle in dieser Arbeit durchgeführten Analysen wurden mittels der Analyseklasse CbmTrdTimeCorrel in der SVN Revision 10418 erstellt.

5.1. Clusterizer

Ein MWPC-Detektor dient im Allgemeinen dazu, ein durchfliegendes ionisierendes Teilchen zu lokalisieren. Ein solches Teilchen erzeugt eine Ladungswolke (siehe Abb. 3.2b) die eine ausgedehnte Bildladung auf der Padplane induziert, die als Ladungscluster bezeichnet wird. Diese Cluster werden vom SPADIC aufgezeichnet und in Form von einzelnen Nachrichten im Datenstrom abgelegt (siehe 3.3.3). Im Datenstrom ist die Zugehörigkeit zu einem Cluster nicht explizit enthalten, weshalb sie aus den Nachrichten rekonstruiert werden muss. Diese Nachrichten zeichnen sich durch einen identischen Zeitstempel und einen Triggertyp aus, der abhängig von ihrer räumlichen Position im Cluster ist. In der Analyse bietet es sich daher an, die Daten nach ihrem Zeitstempel zu ordnen und zeitlich zu *clustern*. Da der Detektor einer hohen Teilchenrate ausgesetzt war, kann es dazu kommen, dass zwei Ladungscluster mit demselben Zeitstempel aufgezeichnet werden. Es bietet sich daher an, die Nachrichten anschließend noch räumlich, anhand ihres Triggertyps, zu clustern, um mögliche Doppeldeutigkeiten aufzulösen.

Die Rekonstruktion der Cluster wird daher durch einen zeitbasierten Clusterizer durchgeführt. Dieser Clusterizer ist eine Funktion der Analyseklasse, die aus einem Puffer von Hit-Nachrichten die ursprünglichen Ladungscluster rekonstruiert (siehe Abb. 5.1). Der verwendete Algorithmus ist in Abb. 5.2 dargestellt, implementiert wurde er mithilfe einer Zustandsmaschine mit zwei Zuständen.

Vor Aufruf des Clusterizers werden die im betrachteten Timeslice¹ enthaltenen Hit-Nachrichten aus dem ursprünglichen Nachrichtenstrom extrahiert und in einem separaten Puffer abgelegt. Dieser Puffer wird an den Clusterizer übergeben und anschließend verarbeitet. Als erster

¹Ein Timeslice ist die Gesamtheit aller, in einem bestimmten Zeitraum angefallenen, Nachrichten der CBM-Detektoren. Die Analyse der Daten des CBM-Experimentes erfolgt immer über einen jeweils einen dieser Timeslices, wobei diese auch parallel untersucht werden können.

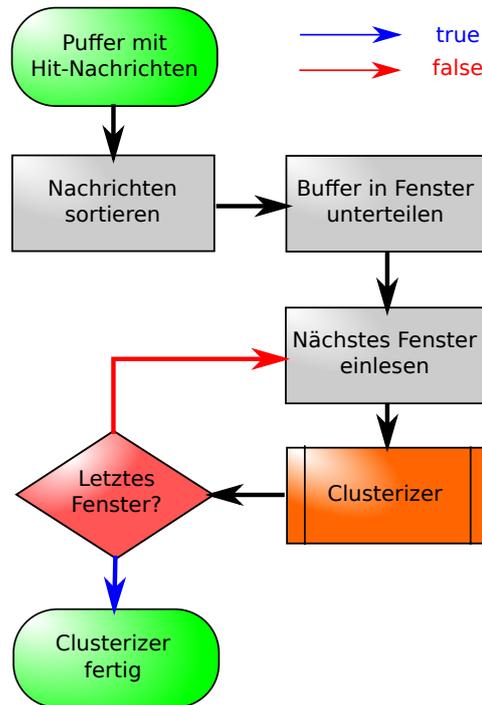


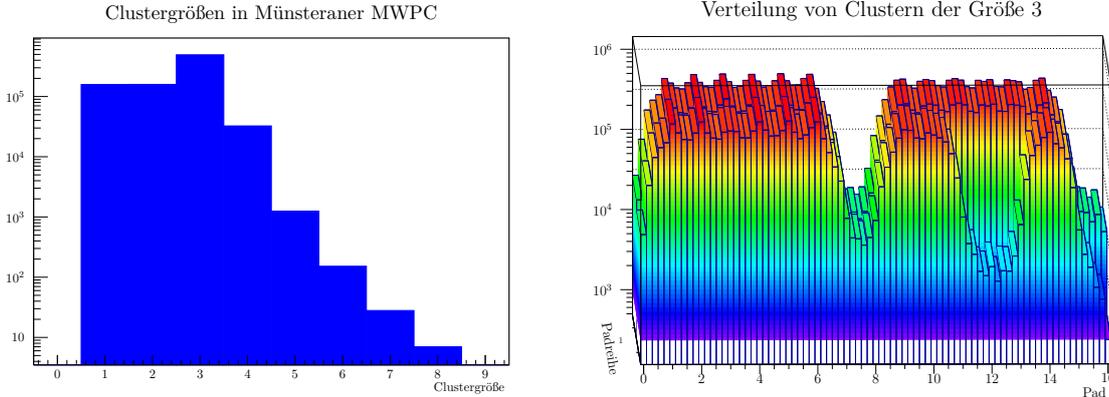
Abbildung 5.1. – Vorbereitung des Clusterizeraufrufs. Die im untersuchten Teilabschnitt des Datensatzes vorliegenden Hit-Nachrichten werden sortiert, nach ihrem Zeitstempel aufgeteilt und in Form dieser „Fenster“ an den eigentlichen Clusterizer übergeben.

Schritt ist es notwendig, die Nachrichten nach ihrem Zeitstempel zu sortieren, da durch das Datenerfassungssystem nicht sichergestellt wird, dass die Nachrichten nach ihrem Entstehungszeitpunkt geordnet vorliegen. Anschließend werden aus diesem Puffer Fenster von Nachrichten gleichen Zeitstempels gebildet, aus denen dann die Cluster rekonstruiert werden. Hierzu werden die Nachrichten nach ihrer Padnummer sortiert ausgelesen und anhand ihres Triggertyps zu möglichst großen Clustern zusammengesetzt. Die Zuordnung einer Nachricht zu einem Cluster erfolgt durch eine Art State-Machine mit zwei Zuständen. Die beiden Zustände sind *Cluster abgeschlossen*, ① und *Cluster im Bau* ②.

Zu Beginn jedes Clusterizer-Durchlaufs befindet sich der Clusterizer im Zustand ① und verarbeitet die erste Nachricht in diesem Zustand. Falls der vorherige Cluster noch nicht in den Ausgabepuffer geschrieben wurde, wird dies nachgeholt, ein neuer Cluster eröffnet und die hereinkommende Nachricht in diesen neuen Cluster hineingeschrieben. Nachdem die Nachricht in den Cluster hineingeschrieben wurde, wechselt die State-Machine in den Zustand ② und liest die nächste Nachricht ein.

Im Zustand ② werden zunächst die folgenden Abbruchbedingungen überprüft:

1. Ist eine räumliche Lücke von mehr als einem Pad vorhanden?



(a) Rekonstruierte Clustergrößen von Run 121 (b) Clusterverteilung im Run 121, Kanal 6 (Pad 12, vordere Reihe) ist defekt, für eine genauere Erklärung siehe 5.1.1.

Abbildung 5.3. – Ergebnisse des zeitlichen Clusterizers für einen einzelnen Run (121). Die Größe der rekonstruierten Cluster entspricht dabei der Anzahl der enthaltenen Nachrichten (und damit auch der gemessenen Pads). Der eingetragene Ort der Cluster entspricht der rekonstruierten Position des verursachenden Teilchens, die aus der Summe der Verschiebung d und dem Ort des mittleren Pads berechnet wird.

Cluster rekonstruiert. Weiterhin treten auch Cluster mit einer Größe größer als drei auf, wobei der Anteil der größeren Cluster exponentiell mit der Größe abfällt. Diese Cluster können auf verschiedenen Wegen entstanden sein oder auch nur Artefakte des Clusterizers sein. Da die Ladungscluster der Erwartung nach eine Größe von drei Pads haben sollten, werden zunächst die rekonstruierten Cluster dieser Größe betrachtet. Da die Kammer so aufgestellt wurde, dass die Padplane gleichmäßig von den bei der Kollision entstandenen Teilchen ausgeleuchtet werden sollte, wird zunächst die räumliche Verteilung dieser Cluster über die Padplane betrachtet. Als horizontale Position eines Clusters wurde der rekonstruierte Ort des ursprünglichen Teilchens eingetragen, der aus der Summe des Displacements (Formel (3.1.3)) und dem horizontalen Mittelpunkt des mittleren Pads bestimmt wurde. Da der SPADIC aufgrund der eingestellten Triggermatrix nur Nachrichten innerhalb der Zeile des auslösenden Pads aufgezeichnet hat, kann die vertikale Position nicht genauer als diese Zeile bestimmt werden.

Bei der Betrachtung von Abb. 5.3b fallen sofort drei Bereiche auf der Padplane auf, in denen besonders wenige Cluster auftreten. Der Bereich in der vorderen Reihe bei Pad 12, respektive Pad 28 insgesamt (siehe Abb. 3.5) ist dadurch zu erklären, dass der entsprechende Kanal auf dem SPADIC defekt ist. Die Erklärung für die Lücken bei den Pads 7/8 in beiden Reihen ist nicht so offensichtlich. Dieser Bereich stimmt mit dem Übergang zwischen den beiden Halbchips überein, was einen Zusammenhang mit der Triggermatrix nahelegt. Da die Konfiguration des SPADIC bei der Strahlzeit nicht aufgezeichnet wurde, muss diese aus den vorliegenden

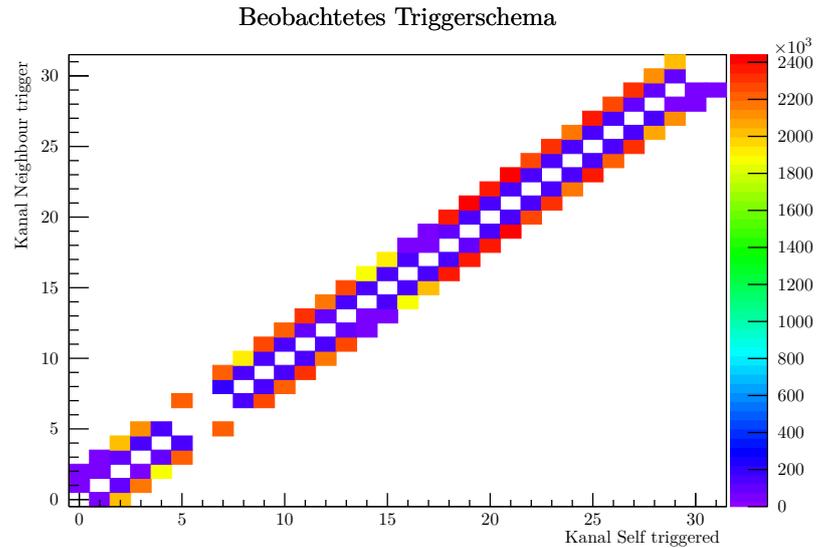


Abbildung 5.4. – Rekonstruierte Triggermatrix. Zur Bestimmung wurde für jede Nachricht mit dem Triggertyp STR oder *Self-Neighbour-triggered-Readout* nach Nachrichten mit demselben Zeitstempel gesucht, und für jede Nachricht mit dem Triggertyp FNR ein Eintrag in das Histogramm gemacht.

Daten rekonstruiert werden. Hierzu wird für jede Nachricht, deren Triggertyp STR ist, die Kanalnummer jeder koinzidenten Nachricht mit dem Triggertyp FNR aufgezeichnet, deren Kanäle im Channel- oder im Padraum dem auslösenden Kanal benachbart sind (siehe Abb. 5.4).

In dieser Darstellung befindet sich der Übergang zwischen den Halbchips bei den Chip-Kanälen 14/16 und 15/17. Dort zeigt sich, dass der FNR-Mechanismus aktiv ist und die erwarteten Kanäle auf dem jeweils anderen Halbchip auslöst. Die auf demselben Halbchip befindlichen Kanäle werden allerdings nicht ausgelöst. Eine Erklärung für dieses Phänomen findet sich bei der Betrachtung der Standardeinstellungen (siehe Abb. 5.5).

Das dort eingestellte Verhalten korreliert genau mit den Beobachtungen aus Abb. 5.4, da die Triggerleitungen zum anderen Halbchip in der Triggermatrix aktiviert, die internen Leitungen zu den gewünschten Kanälen jedoch deaktiviert sind. Diese Einstellungen wurden vermutlich so gesetzt, um die Aufnahme nicht verwendbarer Daten an der Chipaußengrenze zu minimieren. Zur Rekonstruktion der Ladungsverteilung eines aufgezeichneten Ladungscluster sind mindestens drei Messpunkte notwendig, von denen nur zwei aufgezeichnet werden können, wenn das primäre Pad das Äußerste der jeweiligen Reihe ist. Die beobachteten Artefakte lassen sich daher vermeiden, indem die Standardeinstellungen entsprechend angepasst werden. Entsprechend angepasste Triggermatrizen für die beiden Halb-SPADICs finden sich in Abb. 5.6.

Für die Analyse in dieser Arbeit werden der defekte und die fehlerhaft konfigurierten Bereiche der Padplane maskiert. Dadurch wird eine Verteilung der Clustergrößen wie in Abb. 5.7a

	u.0	u.1	u.2	a.0	a.1	a.2	a.3	a.4	a.5	a.6	a.7	a.8	a.9	a.10	a.11	a.12	a.13	a.14	a.15	l.0	l.1	l.2	
u.0																							
u.1																							
u.2																							
a.0						X																	
a.1							X																
a.2								X															
a.3									X														
a.4						X				X													
a.5							X				X												
a.6								X				X											
a.7									X				X										
a.8										X				X									
a.9											X				X								
a.10												X				X							
a.11													X				X						
a.12														X									
a.13															X								
a.14																X					X		
a.15																	X					X	
l.0																		X					
l.1																						X	
l.2																							X

Abbildung 5.5. – Standardeinstellung der Triggermatrix für Halbchip A, die Darstellung folgt der im Konfigurationsprogramm SPADIC-UI verwendeten. Ein X steht für einen gesetzten und ein Gedankenstrich für einen ungesetzten Eintrag. Die fehlenden Einträge sind mit einem Unterstrich: (–) markiert. Die spaltenweisen Einträge geben an welcher Kanal welchen anderen auslösen kann, die zeilenweisen Einträge geben dementsprechend an, von welchem Kanal welcher andere ausgelöst werden kann. Kanäle auf Halbchip A, bzw. B, sind mit dem Präfix a., respektive b., beschriftet.

erhalten. Die Anzahlen der unvollständigen Cluster sind nun deutlich geringer als ohne die Maskierung, was die Hypothese stützt, dass es sich um einen Konfigurations- und nicht um einen Hardwarefehler handelt. Durch die Maskierung gehen im betrachteten Run 30.015 von 492.276 3-Pad-Cluster verloren, was einem Anteil von 6% entspricht. Die Verteilung der 3-Pad-Cluster über die Padplane ist nun in den gefüllten Bereichen gleichmäßig.

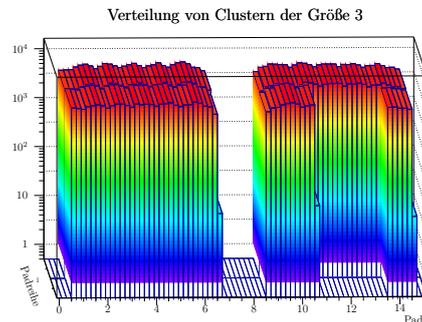
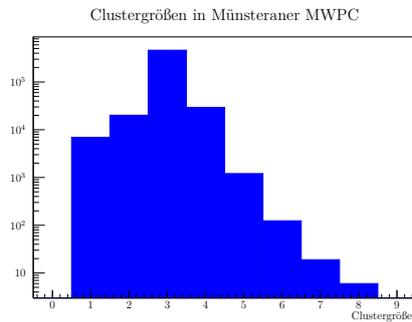
	u.0	u.1	u.2	a.0	a.1	a.2	a.3	a.4	a.5	a.6	a.7	a.8	a.9	a.10	a.11	a.12	a.13	a.14	a.15	l.0	l.1	l.2	
u.0																							
u.1																							
u.2																							
a.0						X																	
a.1							X																
a.2								X															
a.3									X														
a.4						X				X													
a.5							X				X												
a.6								X				X											
a.7									X				X										
a.8										X				X									
a.9											X				X								
a.10												X				X							
a.11													X				X						
a.12														X				X					
a.13															X				X				
a.14																X				X			
a.15																	X				X		
l.0																		X					
l.1																			X				
l.2																				X			

(a) Triggermatrix für Halbchip A

	u.0	u.1	u.2	b.0	b.1	b.2	b.3	b.4	b.5	b.6	b.7	b.8	b.9	b.10	b.11	b.12	b.13	b.14	b.15	l.0	l.1	l.2	
u.0				X																			
u.1					X																		
u.2						X																	
b.0	X					X																	
b.1		X					X																
b.2			X					X															
b.3				X					X														
b.4					X					X													
b.5						X					X												
b.6							X					X											
b.7								X					X										
b.8									X					X									
b.9										X					X								
b.10											X					X							
b.11												X					X						
b.12													X					X					
b.13														X					X				
b.14															X					X			
b.15																X					X		
l.0																							
l.1																							
l.2																							

(b) Triggermatrix für Halbchip B

Abbildung 5.6. – Angepasste Triggermatrizen für einen SPADIC mit der Standard-Padplane (siehe Abb. A.3). Die spaltenweisen Einträge geben an welcher Kanal welchen anderen auslösen kann, die zeilenweisen Einträge geben dementsprechend an, von welchem Kanal welcher andere ausgelöst werden kann. Kanäle auf Halbchip A, bzw. B, sind mit dem Präfix a., respektive b., beschriftet. Die Inter-Chip-Lanes werden mit l. und u. beschriftet, und sind so miteinander verbunden, dass l auf Halbchip A mit u auf Halbchip B verbunden ist.



(a) Clustergrößenverteilung nach Maskierung (b) Clusterverteilung in Run 121, für eine genauere Erklärung siehe 5.1.1

Abbildung 5.7. – Ergebnisse der Maskierung der falsch konfigurierten Padplanebereiche

5.2. Bestimmung einer globalen Baseline

Die Baseline ist der Ausgabewert, auf den ein Detektor in Ruhe zurückkehrt. Sie setzt sich aus dem Dunkelstrom/-spannung und der Baselinekorrektur des SPADICs zusammen und bleibt während eines Runs üblicherweise konstant. Da der SPADIC jedoch kein kontinuierliches Signal liefert, sondern nur einzelne Nachrichten, wenn die Triggerbedingung erfüllt ist, muss die Baseline aus diesen Nachrichten rekonstruiert werden. Hierzu wird zunächst der überlagerte Signalverlauf der STR-Nachrichten betrachtet.

Signalverlauf von STR-Nachrichten

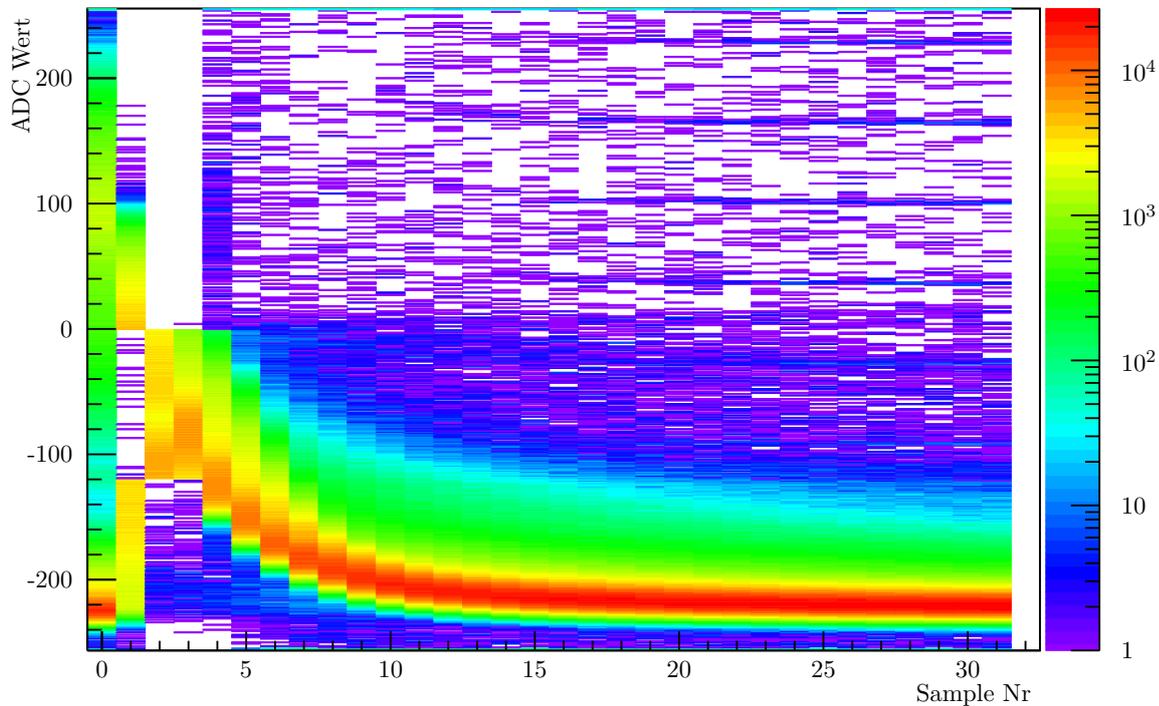


Abbildung 5.8. – Überlagerter Signalverlauf aller STR Nachrichten des Runs 121 mit der Triggerbedingung $t_1 = t_2 = -120$. Die Daten wurden mit dem Münsteraner MWPC-Prototypen aufgezeichnet.

Aus dem in Abb. 5.8 dargestellten Signalverlauf ergeben sich zwei Möglichkeiten zur Bestimmung der Baseline, jeweils ausgehend vom ersten und vom letzten Sample. Bei Betrachtung des ersten Samples ist der stark ausgeprägte Peak bei $\text{ADC} \approx -200$ deutlich erkennbar, es tritt jedoch auch eine breite Streuung über beinahe den vollen Dynamikbereich auf. Diese ist vermutlich ein Artefakt des bereits erwähnten Komparatorbugs. Da der Signalverlauf zum Ende der Nachricht auf einen bestimmten Wert hin abfällt, der idealerweise dem Ruhezustand der Kammer entsprechen sollte, lässt sich auch daraus ein Erwartungswert für die Baseline

Erstes gegen Letztes Sample, STR-Nachrichten

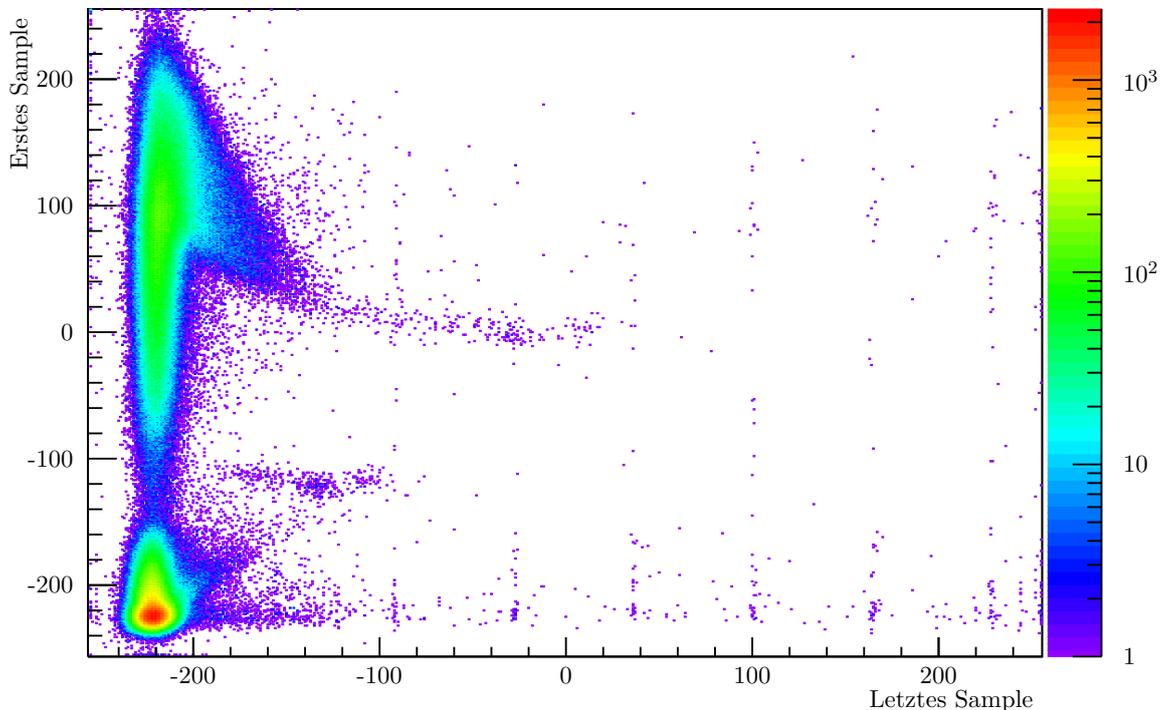
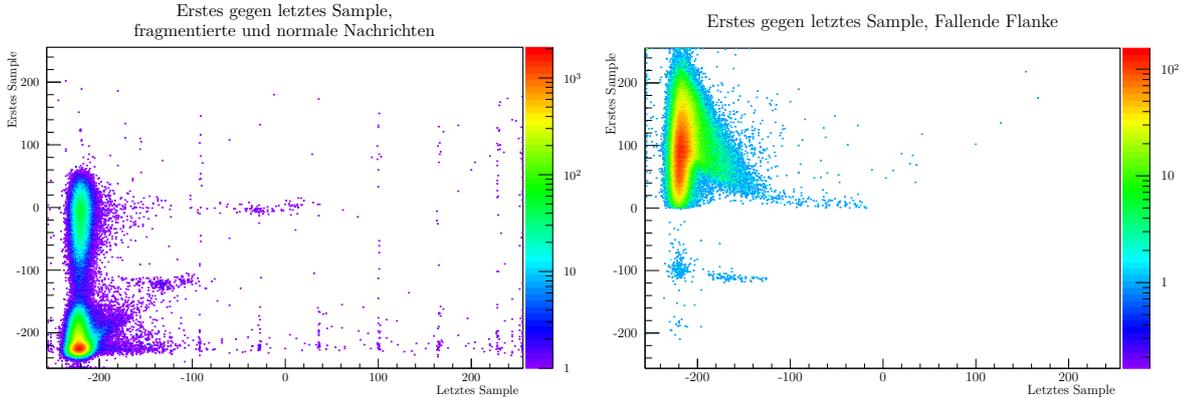


Abbildung 5.9. – Gegenüberstellung des ersten und des letzten Samples zur Bestimmung der Baseline

bestimmen. Zum Vergleich wird nun der Wert des ersten Samples gegen den des letzten Samples aufgetragen.

Idealerweise sollte sich nur ein einzelner scharfer Peak in diesem Histogramm zeigen. In Abb. 5.9 wird auch ein solcher Peak beobachtet, aber gleichzeitig lässt sich auch ein zweites diffuses Maximum oberhalb davon beobachten. Da der Komparatorbug Nachrichten beim Nulldurchgang fragmentiert, dies aber in der zweiten Nachricht nicht mehr erkennbar ist, lässt sich dieses zweite Maximum sehr gut dadurch erklären, dass hier kein Sample aus dem Ruhezustand vorliegt, sondern ein Sample aus der fallenden Flanke einer fragmentierten Nachricht. Die schwach erkennbaren quasi-diskreten Verteilungen im rechten Teil sind vermutlich auf einen kürzlich gefundenen Fehler im analogen Teil des SPADIC [KF16] zurückzuführen, der für die nächsten Versionen des Chips bereits behoben wurde. Das aus der oberen Wolke heraus wachsende „Horn“ ist vermutlich ein Artefakt des Komparatorbugs, genauer gesagt wird hier vermutlich die fallende Flanke der fragmentierten Hits abgebildet. Um den Einfluss der fragmentierten Hits auf die Baseline zu untersuchen, wird Abb. 5.9 danach gefiltert, ob der untersuchte Hit nur aus der fallenden Flanke stammt.

Aus Abb. 5.10b ist deutlich abzulesen, dass das beobachtete „Horn“ aus der fallenden Flanke



(a) Normale Hits, deren Form Formel (3.3.1) folgt. (b) Nur fallende Flanke der fragmentierten Hits

Abbildung 5.10. – Gegenüberstellung des ersten und des letzten Samples zur Bestimmung der Baseline, gefiltert nach der Art des Signalverlaufes.

der fragmentierten Hits stammt. Durch die Beschränkung auf die normalen Hits lässt sich somit eine globale Baseline aus dem letzten Sample aller Nachrichten ermitteln (siehe Abb. 5.10a). Ideal wäre eine Bestimmung der Baseline für jede einzelne Nachricht, hierzu würde sich das erste Sample eignen. Dieses Sample würde zu einem Zeitpunkt aufgenommen werden, zu dem sich die Kammer noch im Ruhezustand befindet und noch keine Ionenwolke entstanden ist. Aufgrund des Komparatorbugs ist dies allerdings nicht möglich, da alle Nachrichten, die einen Nulldurchgang aufweisen, fragmentiert werden. Für den SPADIC 1.1, der diesen Fehler nicht mehr aufweist, sollte diese Methode evaluiert werden. Für diese Arbeit wird eine globale Baseline aus den letzten Samples aller Nachrichten bestimmt, die nicht nur auf der fallenden Flanke des Signals aufgenommen wurden.

Diese Baseline wird für jeden Kanal einzeln bestimmt, indem das letzte Sample kanalweise in ein Histogramm, Abb. 5.11a, eingetragen wird. Dabei zeigt sich, dass die so bestimmte Baseline zwar nahezu konstant ist, aber dennoch leichte Schwankungen zwischen den einzelnen Kanälen aufweist. Die Verteilung der Baselinewerte wird nun für jeden einzelnen Kanal in ein TProfile eingetragen, in Abb. 5.11b beispielsweise für Kanal 16. Die dadurch erhaltene Verteilung ähnelt einer Gaußkurve, was konsistent mit normalverteiltem Rauschen ist. Die Baseline wird daher aus dem Mittelwert einer angepassten Gaußverteilung bestimmt, im Beispiel liegt die so bestimmte Baseline bei $\text{ADC} = -221 \pm 5$, mit 1σ als angenommener Fehler. Zusammen mit dem maximalen ADC-Wert lässt sich damit die auf einem Pad induzierte Ladung bestimmen.

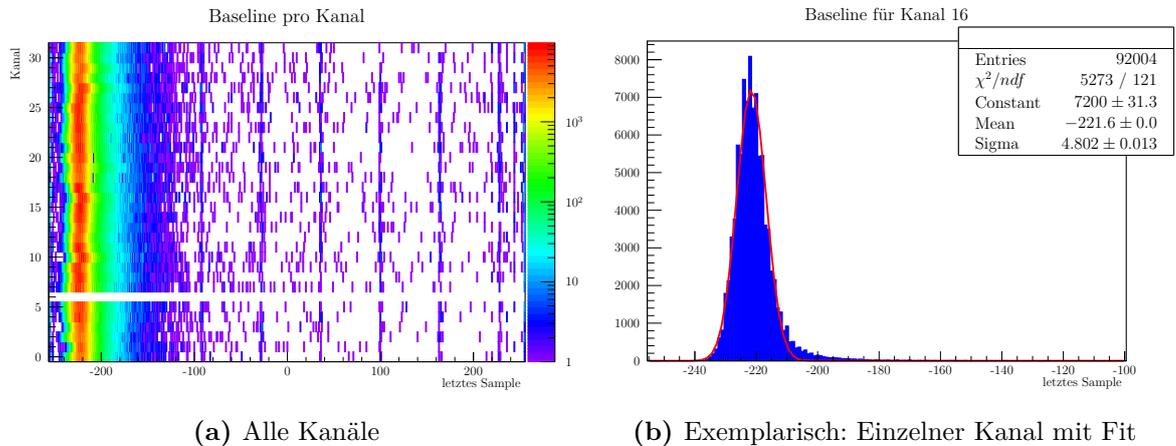


Abbildung 5.11. – Das letzte Sample aller STR Nachrichten wird kanalweise in ein Histogramm eingetragen. Aus diesem Histogramm wird ein Profil für jeden einzelnen Kanal extrahiert und mit einer Gaußfunktion gefittet, um die globale Baseline eines Kanals abzuschätzen.

5.3. Pad-Response-Funktion

Mit der bestimmten Baseline ist es nun möglich, die Ladung auf den einzelnen Pads und damit auch die Gesamtladung der vom Clusterizer rekonstruierten Ladungsclustern zu bestimmen. Damit kann nun der Ladungsanteil der jeweiligen Pads an der Gesamtladung des Clusters bestimmt und damit den Abstand der Teilchenspur gegenüber dem Mittelpunkt des mittleren Pads mittels Formel (3.1.3) berechnet werden. Anhand dieser Messwerte soll nun mithilfe der Padbreite $W = 7,125$ mm aus den am SPS aufgezeichneten Daten eine PRF rekonstruiert werden. Hierzu werden die Ladungsanteile der einzelnen Pads eines 3-Pad-Clusters, um das Displacement verschoben, in ein Histogramm eingetragen. Da Formel (3.1.3) nicht bei MaxADC Werten echt kleiner null angewendet werden kann, wird für diejenigen Cluster, die solche Nachrichten enthalten, Formel (3.1.4) verwendet.

Im so erhaltenen Histogramm zeigt sich schon der charakteristische Funktionsverlauf der PRF nach [Mat]. Neben diesem Hauptzweig sind aber auch weitere Strukturen zu erkennen, die eine Analyse erschweren könnten. Insbesondere sind hier die „Sterne“ und das breit gefächerte Rauschen besonders hervorzuheben. Um diese Artefakte zu kompensieren, ist es notwendig die Daten vor der Analyse zu filtern. Hierzu wurden im Rahmen dieser Arbeit fünf *Cuts* (Auswahlregeln) entwickelt, die auf jeden Cluster angewendet werden. Jedem Cluster wird eine Zahl zugeordnet, die angibt, welchem dieser Cuts der jeweilige Cluster entspricht. Einem Cluster kann dabei immer nur ein einzelner Cut zugeordnet sein. Da die Bereiche der Padplane, in denen durch die Konfiguration des SPADIC 1- und 2-Pad-Cluster entstehen können, maskiert wurden, muss es sich bei den beobachteten Clustern dieser Größe um fragmentierte 3-Pad Cluster handeln. Für die Analyse der verwendeten Cuts werden diese Cluster daher wie 3-Pad-Cluster

Pad Response Function für Münsteraner MWPC

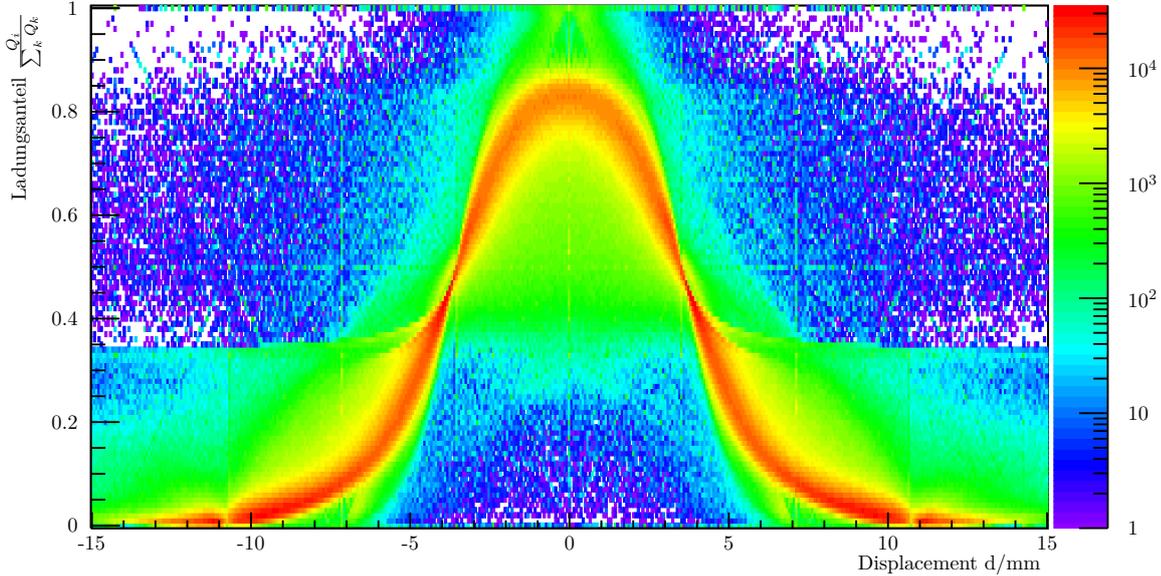


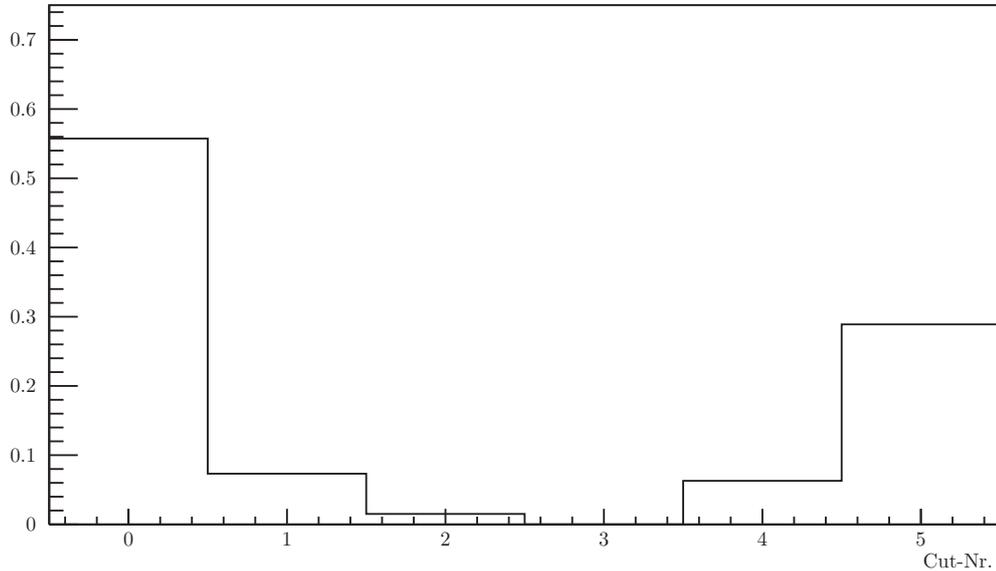
Abbildung 5.12. – Ungefilterte PRF für 3-Pad-Cluster, des Münsteraner MWPC-Prototypen bei der Strahlzeit am SPS im November 2015. Zur Erzeugung des Histogramms wurden 21 Runs zusammengefügt in denen nutzbare Daten vorhanden waren und in denen alle 32 Sample aufgezeichnet wurden. Aufgetragen ist der auf einem Pad gemessene Anteil der Clustergesamtladung gegen den Abstand des Pads vom Vertex des ursprünglichen Teilchens. Der Bereich der zwischen $d = -3,6$ mm und $d = 3,6$ mm gibt die Ladung auf dem zentralen Pad an, die Bereiche zwischen $d = \pm 10,7$ mm und $d = \pm 3,6$ mm den Ladungsanteil auf den äußeren Pads. Die Strukturen außerhalb dieser Bereiche sind vermutlich Artefakte von ursprünglich größeren fragmentierten Clustern. Neben dem in Abb. 3.3 dargestellten und erwarteten Verlauf der PRF ist in dem Histogramm auch eine große Menge an verschiedenen Artefakten und Rauschen enthalten.

behandelt und in die Gesamtstatistik (siehe Abb. 5.13) eingerechnet. Die verwendeten Cuts sind:

- ① Cluster, die durch Anwendung der Cuts nicht gefiltert wurden.
- ① Cluster, die nicht 2 FNR-Nachrichten enthalten.
- ② Cluster, die keine STR-Nachrichten enthalten oder eine Lücke aufweisen.
- ③ Cluster, deren Gesamtladung kleiner null ist.
- ④ Cluster, die eine Nachricht enthalten, deren MaxADC kleiner gleich null ist.
- ⑤ Cluster, bei denen der größte Ladungsanteil nicht auf dem zentralen Pad liegt.

Cut ① filtert fragmentierte Cluster heraus, denen mindestens eine der äußeren FNR-Nachrichten fehlt. Dies betrifft 7,3% der nach der Maskierung verbleibenden Cluster. Mit

Durch Cuts verlorener Anteil von 3-Pad-Cluster

**Abbildung 5.13.** – Clusterverluste durch die einzelnen Cuts

Cut ② werden Cluster verworfen, denen eine Nachricht aus dem Mittelteil fehlt. Da bei diesen Clustern die Ladungsverteilung nicht vollständig erfasst wurde, ist eine Rekonstruktion der Position des verursachenden Teilchens nicht möglich, denn die hierzu notwendigen Informationen fehlen. Dieser Cut betrifft 1,5% der vorhandenen Cluster. Bei den von Cut ③ gefilterten Clustern handelt es sich vermutlich um Artefakte aus dem Komparatorbug (siehe 3.8), bei denen der Ladungspuls so fragmentiert wurde, dass nur Samples auf der aufsteigenden Flanke in den Nachrichten verbleiben, die einen MaxADC-Wert aufweisen, der unter global bestimmten Baseline liegt. Dieser Cut betrifft $\approx 7,7 \cdot 10^{-4}\%$ aller 3-Pad-Cluster. Cut ④ ist auch in der globalen Baseline begründet, da FNR Nachrichten unter Umständen einen MaxADC-Wert aufweisen können, der unter der globalen Baseline liegt. Da die Rekonstruktionsformel (3.1.3) auf Quadratwurzeln und auf der Division der Ladung des zentralen durch die Ladung der äußeren Pads beruht, könnte eine solche Nachricht zu einem Programmabsturz während der Rekonstruktion führen. Dieser Cut könnte durch eine lokal für jede einzelne Nachricht bestimmte Baseline kompensiert werden, wofür sich bei kommenden Chipversionen, die den Komparatorbug nicht aufweisen, vermutlich das erste Sample der Nachricht eignen würde. Eine lokale Verschiebung der Baseline zur Kompensation dieses Phänomens wird nicht durchgeführt, da dies die Vergleichbarkeit der Ladungsverteilung der Cluster innerhalb des Runs verschlechtert. Aufgrund dieses Cuts werden 6,3% der Cluster verworfen. Cut ⑤ ergibt sich direkt aus der Definition des FNR-Mechanismus. Falls auf dem zentralen Pad des Clusters eine STR-Nachricht

aufgezeichnet wurde, die nicht den höchsten Ladungsanteil aufweist, und der größte Anteil der Ladung des Clusters stattdessen auf einem mittels FNR ausgelesenen Pad liegt, so kann es sich nicht um einen normalen Cluster handeln. Dieser Cut verwirft weitere 28,9% der 3-Pad Cluster. Durch die verwendeten Cuts werden insgesamt 44,3% der rekonstruierten Cluster zusätzlich zu den 6%, die durch die Maskierung der falsch konfigurierten Bereiche bereits verloren gehen, verworfen.

Cut ⑤ soll noch genauer betrachtet werden. Ein Cluster, der von diesem Cut verworfen wird, weist den höchsten Ladungsanteil auf einem mittels FNR ausgelesenen Pad auf, weshalb das zentrale Pad nicht den höchsten Ladungsanteil aufweist. In dieser Konstellation hätte der Chip das entsprechende Pad auch zusätzlich mittels STR auslesen müssen, was ein weiteres Pads mittels FNR hätte auslösen müssen. Eine mögliche Erklärung wäre, dass es sich bei diesen Clustern ursprünglich um größere Cluster handelt, die durch den Komparatorbug fragmentiert wurden. Um diese Hypothese zu überprüfen, wird in Abb. 5.14 die rekonstruierte PRF der vom Cut ⑤ betroffenen 3-Pad-Cluster der PRF der 4-Pad-Cluster gegenübergestellt.

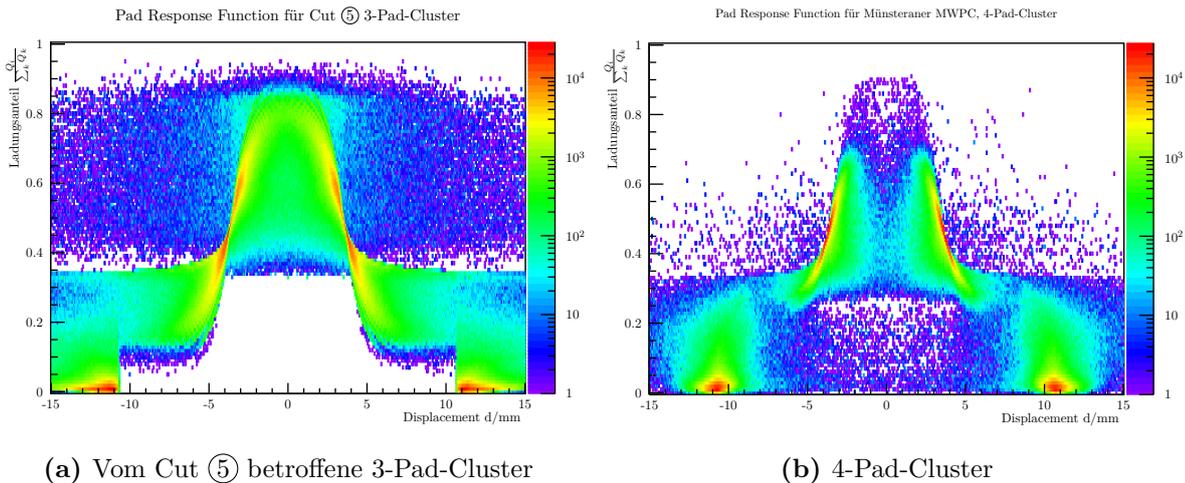
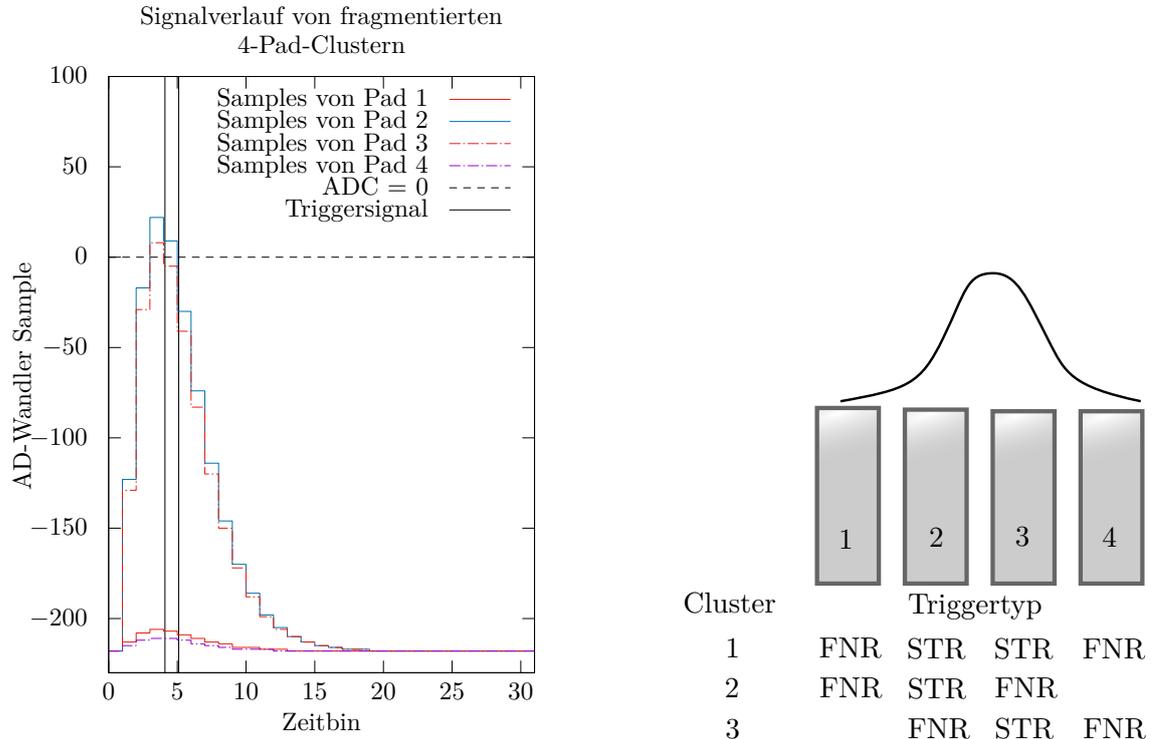


Abbildung 5.14. – Gegenüberstellung der PRF der vom Cut ⑤ betroffenen 3-Pad-Cluster und der 4-Pad-Cluster. Die Verschiebung der 4-Pad-Cluster wurde mittels Formel (3.1.3) berechnet.

Beide Verteilungen weisen eine hohe Übereinstimmung auf, was die Arbeitshypothese stützt, dass es sich bei den beobachteten Clustern um fragmentierte 4-Pad-Cluster handelt. Ein möglicher Entstehungsmechanismus ist in Abb. 5.15 skizziert.

In Abb. 5.15a sind mögliche Signalverläufe der umliegenden Pads für ein nicht ganz zentral auf der Padgrenze auftreffendes Teilchen dargestellt. Aufgrund des Komparatorbugs wird das oberhalb von $ADC = 0$ liegende Sample als unterhalb der Triggerschwelle betrachtet. Nach dem Nulldurchgang befinden sich mindestens zwei Sample oberhalb der Triggerschwelle, wodurch auf dem entsprechenden Pad ein Triggersignal erzeugt wird. Da der Nulldurchgang des auf den



(a) Signalverlauf der durch den Komparatorbug fragmentierten Cluster

(b) Durch den Komparatorbug aus einem ursprünglichen 4-Pad-Cluster erzeugte Cluster

Abbildung 5.15. – Schematische Erläuterung der Auswirkungen des Komparatorbugs auf den FNR-Mechanismus. Wenn der Nulldurchgang der beiden zentralen Pads nicht in demselben Digitalisierungstakt stattfindet, so ist es möglich, dass die entstehenden Triggersignale zur Erzeugung von zwei weiteren unabhängigen 3-Pad-Clustern führen. Diese Cluster lassen sich nur schwer systematisch erkennen, da nur ein Teil der dadurch erzeugten Cluster ein atypisches Ladungsverhältnis aufweist.

Pads 2 und 3 beobachteten Signalverlaufes in verschiedenen Samples stattfindet, kommt es zur Generierung zweier unabhängiger Triggersignale. Jedes dieser Triggersignale führt nun jeweils zur Bildung eines 3-Pad Clusters aus dem auslösenden und den benachbarten Pads (siehe Abb. 5.15b). Da die beiden zentralen Pads benachbart sind, wird über den FNR-Mechanismus die Aufzeichnung der Nachrichten unterbrochen und die im Cluster enthaltenen Nachrichten werden fragmentiert.

Die durch diesen Mechanismus fragmentierten Cluster sind zum Zeitpunkt der Analyse durch den Clusterizer nur schwer zu erkennen, da nur einzelne der entstandenen Cluster hervorstechende Eigenschaften aufweisen. Dies erschwert es auch, die ursprünglichen Cluster zu diesem Zeitpunkt der Analyse zu rekonstruieren. Eine Rekonstruktion der Cluster sollte daher zu einem früheren Zeitpunkt geschehen, vorzugsweise durch das Zusammenführen der einzelnen fragmentierten Nachrichten zu Beginn der Analyse. Da keine Samples bei einer Fragmentation

durch den Komparatorbug verloren gehen, kann die erste fragmentierte Nachricht um die Samples der darauf folgenden Nachrichten erweitert werden, um das ursprüngliche Signal zurückzugewinnen.

Bei der Rekonstruktion der ursprünglichen Hits müssen aber verschiedene Einschränkungen beachtet werden. Zuerst muss verhindert werden, dass echte Multihits als fragmentierte Nachrichten interpretiert werden. Dies kann durch eine Überprüfung der Pulsformen vor der Zusammenführung bewerkstelligt werden. Weiterhin können auch einzelne Nachrichten verloren gehen. Eine mögliche Ursache hierfür wäre ein voller Ausgangspuffer. Der SPADIC berechnet für jeden einzelnen Kanal die Anzahl dieser verlorenen Hits und sendet eine Nachricht mit dieser Zahl an die Datenerfassung. Die verlorenen Nachrichten können nicht rekonstruiert werden und müssen daher bei der Rekonstruktion beachtet werden. Unter Beachtung dieser Einschränkungen sollte es möglich sein, den Großteil der fragmentierten Nachrichten zu rekonstruieren und die ursprünglichen Hit-Nachrichten zurückzugewinnen. Dadurch ließe sich die Analyse weiter verfeinern und auch ein Energieverlustspektrum aus den vorhandenen Messdaten bestimmen.

Durch die Anwendung der Cuts wird nun eine gefilterte PRF erhalten, die sich dazu eignet, den Parameter K_3 aus Formel (3.1.2) zu bestimmen. Da sich ein 2D-Histogramm nur eingeschränkt zur Anpassung einer 1D-Funktion eignet, wird aus den Messdaten ein 1D-Profil entlang der x-Achse erzeugt. Im vorliegenden Fall wird aus den Messdaten der PRF ein Profil des wahrscheinlichsten Wertes extrahiert, das dazu verwendete Verfahren wird in Anhang A.1 beschrieben. Dieses Profil und der resultierende Fit sind in Abb. 5.16 abgebildet, es ergibt sich $K_3 = 0,388 \pm 0,008$, der angegebene Fehler ist der Fitfehler. Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem vorher abgeschätzten Wert von $K_3 = 0,38 \pm \approx 1\%$ [Ber14] für den verwendeten MWPC-Prototyp überein.

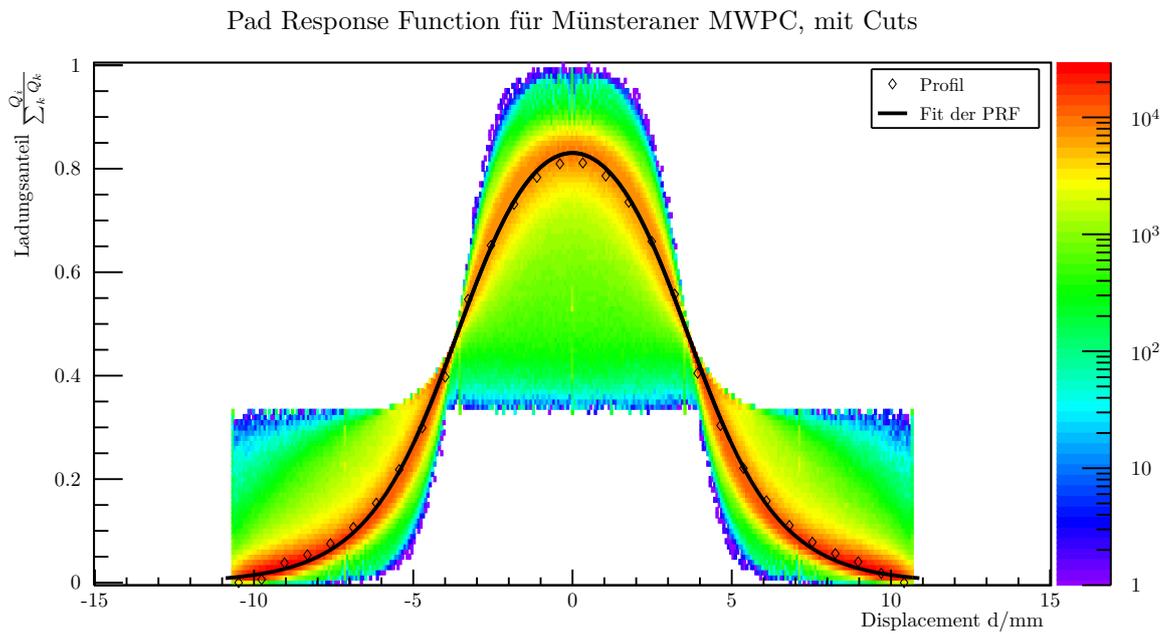


Abbildung 5.16. – Gefilterte PRF mit dem besten verfügbaren Fit für $K_3 = 0,388 \pm 0,008$. Das Profil, das zur Kurvenanpassung verwendet wurde, ist durch die eingezeichneten Rauten gekennzeichnet. Aufgetragen ist der auf einem Pad gemessene Anteil der Clustergesamtladung gegen den Abstand des Pads vom Vertex des ursprünglichen Teilchens. Der Bereich zwischen $d = -3,6$ mm und $d = 3,6$ mm gibt die Ladung auf dem zentralen Pad an, die Bereiche zwischen $d = \pm 10,7$ mm und $d = \pm 3,6$ mm den Ladungsanteil auf den äußeren Pads.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, einen Clusterizer zu entwickeln, der aus dem Nachrichtenstrom des SPADIC die zugrunde liegenden physikalischen Ereignisse rekonstruieren kann. Bei diesen Ereignissen handelt es sich um Ladungscluster, die von durchfliegenden Teilchen in dem verwendeten MWPC-Prototyp erzeugt wurden.

Dieser Clusterizer basiert dabei auf der Annahme, dass den Detektor zu einem bestimmten Zeitpunkt nur wenige Teilchen gleichzeitig passieren. Dadurch wird der Großteil der ausgelesenen Pads durch den FNR-Mechanismus getriggert worden sein, was dazu führt, dass in jedem Zeitfenster nur eine kleine Zahl von Clustern beobachtet wird. Dies erleichtert das anschließende räumliche Clustern anhand der Triggertypen. Dieses Ziel wurde erreicht und mit dem Clusterizer wurden verschiedene Aspekte des Gesamtsystems untersucht.

Zuerst wurde die Ausleuchtung der Padplane untersucht. Da der Detektor nahe der Strahlachse aufgestellt (siehe Abb. 4.1,) und das Eintrittsfenster zum Target ausgerichtet war, konnte davon ausgegangen werden, dass der Teilchenfluss gleichmäßig über die Padplane verteilt sein würde. Die Verteilung der rekonstruierten Cluster zeigte jedoch ausgedehnte Bereiche, in denen kaum Cluster beobachtet wurden. Bei der Untersuchung dieses Phänomens wurde ein Fehler in der Standardkonfiguration des SPADIC gefunden. Dieser Fehler befand sich in der Triggermatrix, die den FNR-Mechanismus konfiguriert, und bestand darin, dass an den Halbchipgrenzen die Kanäle, die sich auf demselben Chip befinden, nicht ausgelöst wurden. Durch die Aktivierung dieser FNR-Trigger, kann dieser Fehler bei zukünftigen Strahlzeiten vermieden werden. Für den Rest der Analyse wurden diese Bereiche maskiert, womit ein korrekt konfigurierter Detektor emuliert werden konnte.

Anschließend wurde eine systematische Untersuchung der Baseline des Detektors durchgeführt. Dabei wurde beobachtet, dass sich, aufgrund des Komparatorbugs in der Triggerlogik, keine lokale Baseline für die einzelnen Nachrichten eines Clusters bestimmen lässt. Dieser Fehler fragmentiert eine Nachricht, deren Signalverlauf zwei Nulldurchgänge aufweist, in zwei Teile. Der erste Teil der fragmentierten Nachricht endet daher meist auf einem Sample, das aus dem steigenden Teil der Impulsantwort stammt. Dadurch eignen sich für den vorderen Teil der fragmentierten Nachricht die letzten Samples nicht zur Bestimmung einer Baseline für diese Nachrichten. Für die fallende Flanke der fragmentierten Nachricht eignet sich das erste Sample nicht zur Bestimmung einer Baseline, da dieses immer zeitlich nah am Maximum der

Impulsantwort liegt. Die Baseline für die beiden Hälften der fragmentierten Nachrichten unterschiedlich zu berechnen, hätte die Vergleichbarkeit der bestimmten Ladungswerte verschlechtert. Daher wurde eine globale Baseline bestimmt, die aus dem jeweils letzten Sample aller normalen Hit-Nachrichten für jeden Kanal einzeln bestimmt wurde.

Diese Baseline ermöglicht es nun, die freigesetzte Ladung, die ein Teilchen in der Kammer verursacht hat, über die Amplitude der Impulsantwort zu bestimmen. Hierzu wird die Baseline vom maximalen ADC-Wert der Samples abgezogen, wodurch die auf dem jeweiligen Pad induzierte Ladung erhalten wird. Da ein die Kammer passierendes Teilchen eine Ladungslawine erzeugt, die, über den Mechanismus in Abschnitt 3.1.1, Bildladungen auf der Padplane verursacht, kann, über die Verteilung dieser Ladung über einen Cluster, der Ort des ursprünglichen Teilchens rekonstruiert werden. Dadurch, dass der Ladungsanteil eines Pads am gesamten Cluster gegen den Abstand von der ursprünglichen Teilchenposition aufgetragen wird, kann eine *Pad-Response-Function* berechnet werden. Anhand dieser können verschiedene Parameter der MWPC bestimmt werden.

Die, aus allen 3-Pad-Clustern, erhaltene PRF zeigte eine breite Streuung der Messwerte, weshalb ein Satz von Cuts entwickelt wurde, durch die eine gefilterte PRF erhalten wurde, die sich zur Bestimmung von K_3 eignet. Dieser geometrische Parameter charakterisiert die Ladungsverteilung innerhalb der Kammer, die mithilfe von Formel (3.1.2) berechnet werden kann, nahezu vollständig. Für die vorliegende MWPC konnte dieser Parameter bestimmt werden zu $K_3 = 0,388 \pm 0,008$, mit dem von Minuit2 angegebenen Fitfehler. Dies ist mit dem erwarteten Wert von $K_3 \approx 0,38 \pm 1\%$ [Ber14] im Rahmen des Fehlers kompatibel. Die Kenntnis dieses Parameters ermöglicht es unter anderem, die Auslegung der Kammer zu überprüfen und die Positionsbestimmung der Teilchen zu verbessern. Da die Verteilung der Ladung über die Padplane mithilfe von K_3 berechnet werden kann, können auch teilweise überlappende Cluster aufgelöst werden, indem die Ladungsverteilung beider Cluster gemeinsam angepasst wird.

Bei der Untersuchung dieser Cuts wurde ein bislang unbeachteter Mechanismus der Clusterfragmentierung beobachtet. Dieser stammt vermutlich aus dem Komparatorbug und tritt bei Clustern mit einer Größe größer 3 Pads auf. Wenn diese Cluster eine leicht asymmetrische Ladungsverteilung aufweisen, kann es dazu kommen, dass der zweite Nulldurchgang, der aufgrund des Komparatorbugs ein neues Triggersignal erzeugt, auf den inneren Pads in unterschiedlichen Takten stattfindet. Dies führt dazu, dass diese Pads, über den FNR-Mechanismus, jeweils eigene 3-Pad Cluster erzeugen. Bei diesen handelt es sich um Ausschnitte aus einem größeren Cluster, weshalb sie teilweise über das atypische Ladungsverhältnis erkennbar sind. Dieser Effekt konnte für die vorliegende Arbeit zum Teil heraus gefiltert werden, er führt aber dennoch zu einer leichten Verfälschung der PRF. Eine Möglichkeit, diesen Effekt vollständig zu kompensieren, wäre es, die fragmentierten Nachrichten wieder zusammenzufügen, was in der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt wurde.

Weiterhin kann der vorgestellte Clusterizer verbessert und beschleunigt werden. Eine Parallelisierung würde beispielsweise den Echtzeit-Einsatz während einer Strahlzeit mit mehreren SPADICs ermöglichen, während eine Verbesserung des räumlichen Clusterizerteils das Auflösungsvermögen im Bezug auf benachbarte Cluster verbessern könnte.

Zusammengefasst wurde ein Clusterizer entwickelt, der aus dem Rohdatenstrom des SPADIC die zugrunde liegenden physikalischen Ereignisse rekonstruieren kann. Dabei wurden kleinere Konfigurationsfehler im SPADIC entdeckt, eine Methode zur Abschätzung einer globalen Baseline entwickelt und die *Pad-Response-Function* des MWPC-Prototypen gemessen. Anhand dieser konnte der geometrische Parameter (K_3) der Kammer bestimmt werden, dessen Wert mit dem von [Ber14] abgeschätzten Wert kompatibel ist. Weiterhin wurde ein Fragmentierungs-Mechanismus für Cluster entdeckt, der aus dem bereits bekannten Komparatorbug im SPADIC 1.0 resultiert und eine Methode aufgezeigt, diesen in zukünftigen Analysen zu kompensieren.

Literatur

- [ABK04] M. Al-Turany, D. Bertini und I. König. *CBM Simulation & Analysis Framework Cbmroot*. VMC Workshop. VMC Workshop. 2004-11. URL: <http://indico.cern.ch/materialDisplay.py?contribId=37&sessionId=3&materialId=paper&confId=048>.
- [AFP10] T. Armbruster, P. Fischer und I. Peric. „SPADIC - A self-triggered pulse amplification and digitization ASIC“. In: *NSS Conference Record, 2010 IEEE, Knoxville, USA* (2010-11), S. 1358–1362. DOI: 10.1109/NSSMIC.2010.5873992. URL: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&tp=&arnumber=5873992&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5873992.
- [Arm13] T. Armbruster. „SPADIC - a Self-Triggered Detector Readout ASIC with Multi-Channel Amplification and Digitization“. Diss. ZITI, Heidelberg University, 2013. URL: <https://www-alt.gsi.de/documents/DOC-2013-Jun-21.html>.
- [Bar+85] L.S. Barabash u. a. „A study of the detection accuracy of proportional chambers with cathode read-out“. In: *Nucl. Instr. Meth. A* 236.2 (1985), S. 271–273. ISSN: 0168-9002. DOI: 10.1016/0168-9002(85)90160-3. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900285901603>.
- [Ber+16] C. Bergmann, P. Kähler u. a. „Combined MWPC prototype test of Münster and Frankfurt using SPADICv1.0 data taking at CERN-SPS/T2-H4 in 2015“. In: *CBM Progress Report 2015*. Hrsg. von V. Friesen*, C. Sturm* und A. Toia*. Darmstadt: GSI, 2016, 155 S. : Ill., graf. Darst. ISBN: 978-3-9815227-3-0. URL: <https://repository.gsi.de/record/186952>.
- [Ber14] Cyrano S.H. Bergmann. „Development, Simulation and Test of Transition Radiation Detector Prototypes for the Compressed Baryonic Matter Experiment at the Facility for Antiproton and Ion Research“. Diss. Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2014. URL: http://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/physik_kp/agwessels/thesis_db/ag_wessels/bergmann_2014_dissertation.pdf.

-
- [BR97] R. Brun und F. Rademakers, Hrsg. *ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework*. AIHENP'96 Workshop. Lausanne: Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. A 389 (1997) 81-86, 1997-09. URL: <http://root.cern.ch/>.
- [Ems13] D. Emschermann. *Pad-plane design*. private communication. 2010-2013. URL: <https://subversion.gsi.de/trac/fairroot/browser/cbmroot/trunk/>.
- [Ems14] David Emschermann. *Padplane Design*. 2014. URL: http://cbm.uni-muenster.de/padplane/more/routing_variants_v03_2014/ (besucht am 31.05.2016).
- [Fri+11] B. Friman, C. Höhne u. a., Hrsg. *The CBM Physics Book*. 1. Aufl. Bd. 814. Lecture Notes in Physics; Springer, 2011, 960 p. URL: <http://www-alt.gsi.de/documents/D0C-2009-Sep-120-1.pdf>.
- [Gat+79] E. Gatti, A. Longoni u. a. „Optimum Geometry for Strip Cathodes on Grids in MWPC for Avalanche Localization Along the Anode Wires“. In: *Nucl. Instr. Meth.* 163 (1979), S. 83–92. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0029-554X\(79\)90035-1](http://dx.doi.org/10.1016/0029-554X(79)90035-1). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X79900351>.
- [GM28] H. Geiger und W. Müller. „Elektronenzählrohr zur Messung schwächster Aktivitäten“. In: *Naturwissenschaften* 16.31 (1928), S. 617–618. ISSN: 1432-1904. DOI: 10.1007/BF01494093. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01494093>.
- [HC09] J. M. Heuser und for the CBM collaboration. „The Compressed Baryonic Matter Experiment at FAIR: Progress with Feasibility Studies and Detector Developments“. In: arXiv:0907.2136 [nucl-ex] (2009). DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2009.09.048. URL: <http://arxiv.org/pdf/0907.2136v3>.
- [KF16] Michael Krieger und Peter Fischer. „Status of SPADIC development“. In: *27th CBM Collaboration Meeting. 27th CBM Collaboration Meeting*. 2016-04-11. URL: http://spadic.uni-hd.de/publications/talks/2016/2016-04-12_spadic_cm.pdf.
- [Kle09] M. Klein-Bösing. „Development of a Transition Radiation Detector and Reconstruction of Photon Conversions in the CBM Experiment“. Diss. Institut für Kernphysik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2009-07. URL: <https://www-alt.gsi.de/documents/D0C-2009-Oct-168.html>.
- [Kri14] Michael Krieger. *SPADIC 1.0 status, plans for 2.0*. TRD Strategy Meeting. GSI. 2014-12-04. (Besucht am 24.07.2016).
- [Leo87] W. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer-Verlag, 1987.

- [LP95] K. Lau und J. Pyrlík. „Optimization of centroid-finding algorithms for cathode strip chambers“. In: *Nucl. Instr. Meth. A* 366.2-3 (1995), S. 298–309. ISSN: 0168-9002. DOI: 10.1016/0168-9002(95)00604-4. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900295006044>.
- [LST72] D.M. Lee, S.E. Sobottka und H.A. Thiessen. „A bifilar helical multiwire proportional chamber for position sensitive detection of minimum ionizing particles“. In: *Nucl. Instr. Meth.* 104.1 (1972), S. 179–188. ISSN: 0029-554X. DOI: 10.1016/0029-554X(72)90315-1. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X72903151>.
- [Mat] E. Mathieson. *Induced charge distribution in proportional detectors*. http://www.inst.bnl.gov/programs/gasnobledeet/publications/Mathieson's_Book.pdf. URL: http://www.inst.bnl.gov/programs/gasnobledeet/publications/Mathieson's_Book.pdf.
- [Ott+99] S. Ottini-Hustache u. a. „CATS, a low pressure multiwire proportionnal chamber for secondary beam tracking at GANIL“. In: *Nucl. Instr. Meth. A* 431.3 (1999), S. 476–484. ISSN: 0168-9002. DOI: 10.1016/S0168-9002(99)00380-0. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900299003800>.
- [Sau77] F. Sauli. *Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers*. Lectures given in the Academic Training Programme of CERN, 1975- 1976. 1977. URL: http://cbm-wiki.gsi.de/pub/TRD/TrdLiterature/Sauli_yellow_report.pdf.
- [Sen09] P. Senger. *Status of the CBM Experiment at FAIR*. Techn. Ber. CBM Progress Report, 2008,2009. URL: <http://www-alt.gsi.de/informationen/wti/library/scientificreport2008/PAPERS/FAIR-EXPERIMENTS-08.pdf>.
- [Tan11] O. Tange. „GNU Parallel - The Command-Line Power Tool“. In: *login: The USENIX Magazine* 36.1 (2011-02), S. 42–47. URL: <http://www.gnu.org/s/parallel>.

A. Anhang

A.1. MPV-Profil

Pad Response Function für Münsteraner MWPC, mit Cuts

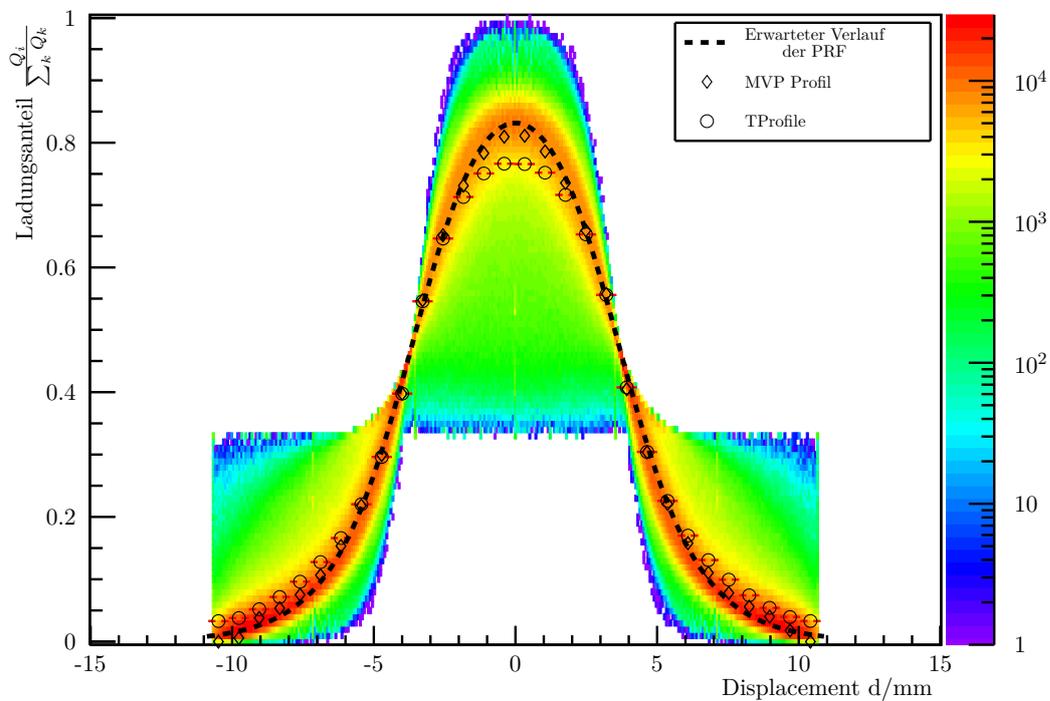


Abbildung A.1. – Vergleich des MPV-Profiles mit dem Standard TProfile von ROOT. Das MPV-Profil nähert den beobachteten Verlauf der Messdaten besser an als das TProfile.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein spezielles Profil für den Fit der PRF verwendet. Dieses Histogramm wird vom Autor als das Most-Probable-Value-Profil bezeichnet und zeichnet den Verlauf des wahrscheinlichsten Wertes nach. Ein Vergleich des MPV-Profiles mit einem TProfile findet sich in Abb. A.1.

Das MPV-Profil nähert den Verlauf der Messdaten deutlich besser an als das TProfile. Dies ist darin begründet, dass das TProfile den gewichteten Mittelwert verwendet, während das MPV-Profil den wahrscheinlichsten Wert verwendet. Da in der PRF eine sehr breite Streuung der

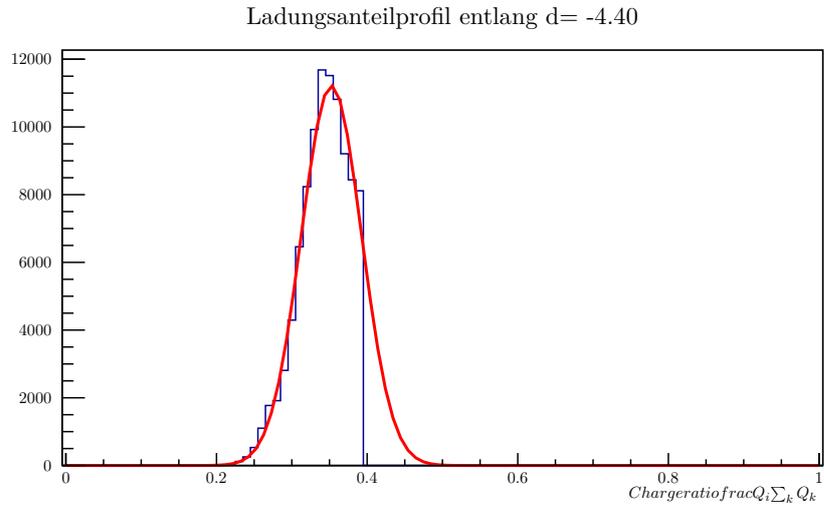


Abbildung A.2. – Berechnung eines einzelnen Bins des MPV-Profiles. Eine Gaußfunktion wird an eine ProjectionY aus einem TH2 angefitet, der Mittelwert der Verteilung wird als Binwert des MPV-Profiles verwendet, die Standardabweichung als der Fehler des Bins.

Messdaten beobachtet wird, kommt es, durch die weiter vom wahrscheinlichsten Wert entfernten Messdaten, zu einer Verschiebung des Mittelwertes gegenüber dem wahrscheinlichsten Wert.

Ein MPV-Profil wird berechnet, indem als Wert der einzelnen Bins der wahrscheinlichste Wert einer an die Daten angepassten Verteilungsfunktion verwendet wird. Im vorliegenden Fall wurde hierzu eine Gaußfunktion verwendet, die an eine ProjectionY pro Bin, oder auch pro Bingruppe falls ein Rebinning erwünscht ist, angefitet wird. Der Mittelwert der Verteilung wird als Binwert des MPV-Profiles verwendet, die Standardabweichung als der eingetragene Fehler des Bins. In Abb. A.2 ist dieses Verfahren für einen einzelnen Bin des MPV-Profiles aus den in Abb. A.1 dargestellten Messdaten abgebildet.

A.2. Padplane

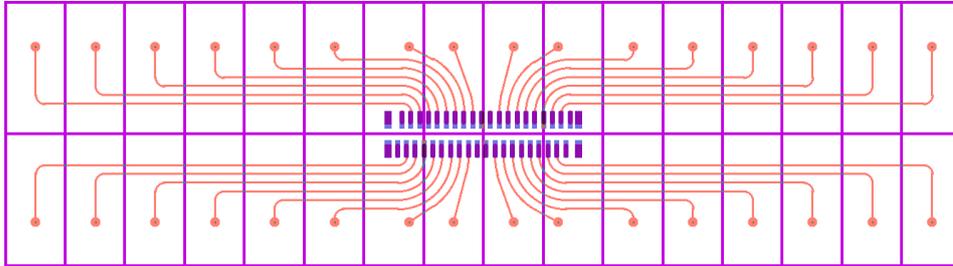


Abbildung A.3. – Im CBM TRD-Prototyp verbautes Padplane-Layout. Die mit der Padplane verbundenen Steckerkontakte sind linear den Spadic-Kanälen zugeordnet. Die Rekonstruktion des Mappings von Pad zu SPADIC-Kanal kann daher durch die Verfolgung der Drähte von den Pads zu den Kontakten erfolgen.[Ems13][Ems14]

Plagiatserklärung des Studenten

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit über die **Ereignis-Rekonstruktion für CBM TRD Testdaten** selbstständig verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind.

_____, Münster den 29. Juli 2016
(Datum, Unterschrift)

Ich erkläre mich mit einem Abgleich der Arbeit mit anderen Texten zwecks Auffindung von Übereinstimmungen sowie mit einer zu diesem Zweck vorzunehmenden Speicherung der Arbeit in eine Datenbank einverstanden.

_____, Münster den 29. Juli 2016
(Datum, Unterschrift)