

# **Aufbau und Test einer Detektorebene mit Galliumarsenidsensor**

**Construction and test of a detector plane with  
galliumarsenid sensor**

**Diplomarbeit**  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Physiker

eingereicht von  
**Sandro Kollowa**  
geboren am 24. November 1980 in Spremberg

**Brandenburgische Technische Universität Cottbus**  
Fakultät 1: Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik  
Institut für Physik und Chemie

Gutachter: Prof. Dr. Wolfgang Lohmann  
Prof. Dr. Jürgen Reif

Zeuthen den 26. Oktober 2011

## **Selbständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt zu haben.

Die dem Verfahren zugrunde liegende Prüfungsordnung für den Studiengang Physik an der Fakultät I – Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus habe ich gelesen.

Zeuthen, den 26.10.2011

Sandro Kollowa

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Vorwärts-Kalorimeter .....	2
1.3 Aufgabenstellung .....	4
<b>2 Aufbau der Detektorebene</b> .....	<b>4</b>
2.1 Galliumarsenidsensoren .....	5
2.1.1 Galliumarsenid als Sensormaterial .....	5
2.1.2 Eigenschaften der Sensoren .....	6
2.1.3 Strom-Spannungs-Kennlinien .....	7
2.2 Fanout. ....	12
2.3 Front-End-ASICs .....	13
2.3.1 Funktionsweise und Eigenschaften der Front-End-ASICs .....	13
2.3.2 Linearitätstests und Kalibrierungsmessungen .....	15
2.3.2.1 Analog-Digital-Wandler .....	15
2.3.2.2 Durchführung und Auswertung der Messungen .....	16
2.4 Die fertige Detektorebene .....	26
<b>3 Messungen im Teststrahl</b> .....	<b>28</b>
3.1 Erzeugung des Elektronenstrahls .....	28
3.2 Teleskop und Trigger .....	29
3.3 Messprogramm .....	30
3.4 Auswertung der Daten .....	32
3.4.1 Integrationsmethoden und die daraus erhaltenen Signalgrößenspektren ...	32
3.4.1.1 Methode 1 .....	33
3.4.1.2 Methode 2 .....	35
3.4.1.3 Vergleich der beiden Methoden .....	37
3.4.1.4 Analyse der Signalgrößenspektren .....	40
3.4.2 Rauschverhalten der Detektorebene. ....	46
3.4.2.1 Signal-Rausch-Verhältnisse .....	46
3.4.2.2 Korreliertes Rauschen .....	51
3.4.2.2.1 Korrelationen in den Grundlinien .....	52
3.4.2.2.2 Korrelationen in den Pedestals .....	55
<b>4 Zusammenfassung</b> .....	<b>60</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>61</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>63</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Mit der Inbetriebnahme des Large Hadron Colliders (LHC) am Europäischen Kernforschungszentrum CERN erhoffen sich Physiker aus aller Welt neue Erkenntnisse in weiten Bereichen der Physik.

Im ringförmigen Teilchenbeschleuniger, mit einem Umfang von 27 km, werden in zwei gegenläufigen Teilchenstrahlen Protonen<sup>1</sup> auf bis zu 7 TeV beschleunigt und schließlich zur Kollision gebracht. Die Eigenschaften der Kollisionsprodukte werden dann in den verschiedenen Experimenten am LHC vermessen und liefern einen tiefen Einblick in den inneren Aufbau der Materie. Wesentliche Aufgaben der Experimente am LHC sind die Suche nach bisher hypothetischen Teilchen, z.B. das Higgs-Boson, supersymmetrische oder bisher völlig unbekanntem Teilchen /1/.

Dazu muss der LHC bei den Teilchenkollisionen weit höhere Schwerpunktsenergien erreichen, als seine Vorgänger. Am 30. März 2010 wurde erstmals eine Schwerpunktsenergie von 7 TeV für Proton-Proton-Kollisionen erreicht /2/. Bei voller Leistung des LHC wird diese dann 14 TeV für Protonen betragen und um eine Größenordnung höher liegen, als die seines leistungsstärksten Vorgängers, dem Tevatron. Das Erreichen hoher Schwerpunktsenergien ist der Vorteil eines Hadronen-Beschleunigers. Der Nachteil ist, dass Hadronen eine innere Struktur besitzen. Bei den Kollisionen wechselwirken ihre Konstituenten, die Quarks und Gluonen. Dies macht eine präzise Messung ausgewählter Prozesse schwierig, da ihre Anfangszustände nicht genau bekannt sind. Aus diesem Grund ist der Bau eines neuen Elektron-Positron-Linearbeschleunigers geplant. Da nach heutigem Wissensstand Elektronen und Positronen keine inneren Strukturen besitzen, können in einem Elektron-Positron-Beschleuniger die Anfangszustände bei deren Kollision sehr genau präpariert werden. Dies soll Präzisionsmessungen der Eigenschaften der Teilchen erlauben, die möglicherweise am LHC entdeckt werden /3/.

Derzeit existieren zwei Konzepte für einen solchen Elektron-Positron-Linearbeschleuniger, der International Linear Collider (ILC) und der Compact Linear Collider (CLIC). Der ILC kann bei Schwerpunktsenergien im Bereich zwischen 200 GeV und 500 GeV arbeiten, mit der Möglichkeit eines Upgrades auf 1 TeV, und eine maximale Luminosität von  $2 \cdot 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  bei 500 GeV erreichen /4/.

Die Studien zur Realisierbarkeit des CLIC zielen auf einen Schwerpunktsenergiebereich zwischen 0.5 TeV und 5 TeV, optimiert für eine Schwerpunktsenergie von 3 TeV. Die erreichbare Luminosität soll in der Größenordnung von  $10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  liegen /5,6/.

---

<sup>1</sup> Neben Protonen können auch Ionen, z.B. Blei, beschleunigt werden. Die Energie pro Nukleon ist dann etwa 1.4 TeV.

Für den ILC wurden Konzepte für zwei verschiedene Detektoren entwickelt, der International Large Detector (ILD)/7/ und der Silicon Detector (SiD)/8/. In beiden Detektoren sind zwei spezielle Vorwärts-Kalorimeter vorgesehen, das BeamCal und das LumiCal.

## 1.2 Vorwärts-Kalorimeter

Abbildung 1.1 zeigt einen Entwurf der Vorwärtsregion des ILD in dem das BeamCal und das LumiCal gekennzeichnet sind. Die rote und die blaue Linie deuten den ein- bzw. auslaufenden Strahl an. Das BeamCal ist direkt vor dem letzten strahlfokussierenden Magneten vor dem Interaktionspunkt positioniert. Der Interaktionspunkt selbst befindet sich rechts außerhalb der Abbildung.

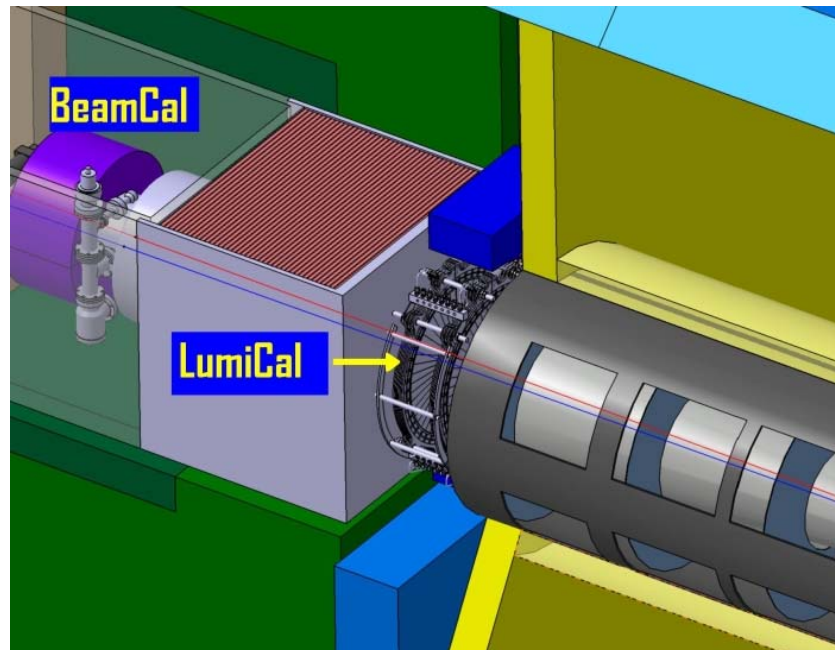


Abb. 1.1: Entwurf der Vorwärtsregion des ILD. /9/

Beide Kalorimeter sind um den auslaufenden Strahl zentriert. BeamCal deckt einen Winkelbereich zwischen 5 und 40 mrad in Bezug zum Interaktionspunkt ab und LumiCal einen Bereich zwischen 31 und 77 mrad /9/.

Sowohl BeamCal als auch LumiCal sind als zylindrische elektromagnetische Sandwich-Kalorimeter konzipiert, mit Wolfram als Absorbermaterial. Beide bestehen aus 30 Absorberscheiben mit dazwischen liegenden Sensoren. Die Abbildung 1.2 zeigt eine schematische Darstellung eines Halbzylinders des BeamCal und Abbildung 1.3 eine schematische Darstellung des LumiCal.

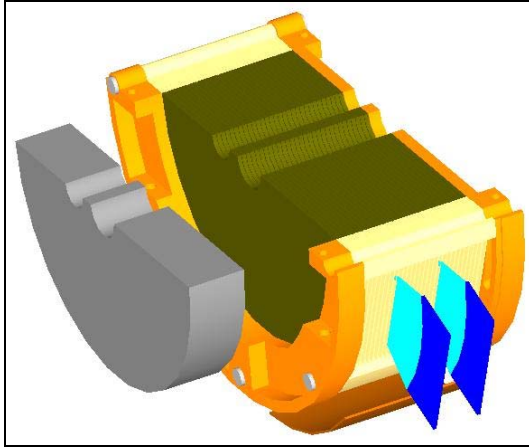


Abb. 1.2: Schematische Darstellung eines Halbzylinders des BeamCal.

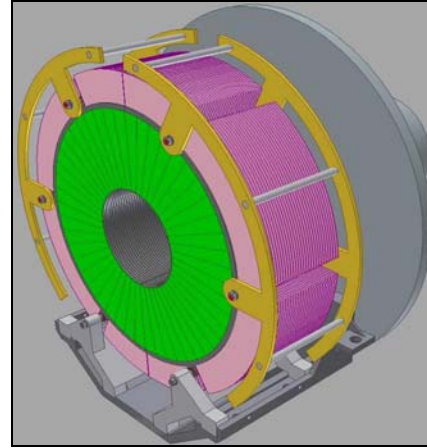


Abb. 1.3: Schematische Darstellung des LumiCal.

Die Aufgabe von BeamCal ist eine schnelle Abschätzung der Luminosität und die Kontrolle der Beamparameter. Dazu wird die Beamstrahlung ausgenutzt, welche beim Aufeinandertreffen zweier Teilchenpakete abgestrahlt wird. Beamstrahlung entsteht, wenn Elektronen und Positronen durch das magnetische Feld der kreuzenden Pakete abgelenkt werden. Die dabei entstehende Bremsstrahlung wird Beamstrahlung genannt. Ein Teil der Beamstrahlung kann nun wiederum im elektrischenmagnetischen Feld der Teilchen des Pakets niederenergetische Elektron-Positron-Paare erzeugen. Ein großer Teil der Paare deponieren ihre Energie im BeamCal. Größe und räumliche Verteilung der Energie im BeamCal dienen der Bestimmung der Luminosität und der Strahlparameter /10/. Die Elektronen und Positronen aus der Beamstrahlung verursachen im BeamCal eine Strahlendosis von etwa 1MGy/a /9/.

Damit BeamCal seine Zielsetzungen erfüllen kann, sind eine schnelle Ausleseelektronik und der Einsatz von strahlungsharten Sensoren vonnöten. Als in Frage kommende Sensormaterialien werden derzeit Galliumarsenid und Diamant untersucht.

Die Aufgabe von LumiCal ist die präzise Messung der Luminosität. Dabei wird die Bhabha-Streuung als Eichprozess genutzt /9/. Die Ausleseelektronik für BeamCal und LumiCal muss sehr große Signale aus elektromagnetischen Schauern verarbeiten können. Andererseits soll sie auch sensitiv für sehr kleine Signale von einzelnen Teilchen sein, um eine genaue Kalibrierung zu ermöglichen. Um dies zu erreichen kann die Ausleseelektronik in verschiedenen Modi arbeiten, mit einer hohen Signalverstärkung für sehr kleine Signale und einer geringen Signalverstärkung für Signale aus elektromagnetischen Schauern.

## 1.3 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit war der Aufbau und Test einer Detektorebene mit Galliumarsenid als Sensor für das BeamCal. Die dabei verwendeten „Front-End-ASICs“ („ASIC“ = Application-Specific Integrated Circuit, engl. für anwendungsspezifische integrierte Schaltung) sind erste Prototypen für die Ausleselektronik sowohl für BeamCal, als auch für LumiCal.

## 2 Aufbau der Detektorebene

Ein vereinfachtes Detektorprinzip ist in der Abbildung 2.1 gezeigt.

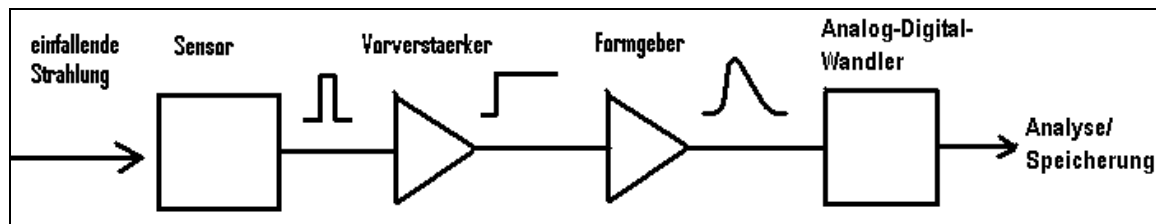


Abb. 2.1: Vereinfachte Darstellung eines Detektorprinzips (in Anlehnung an /11/).

Das einfallende Teilchen ionisiert Atome im Sensor. Durch die Drift der Ladungsträger im elektrischen Feld entsteht ein elektrisches Signal. Die Signalladung wird am ladungsempfindlichen Vorverstärker gesammelt, wodurch ein Spannungsunterschied aufgebaut wird. Der so erzeugte Spannungspuls kann als Stufenfunktion idealisiert werden. Der Formgeber gibt schließlich dem Puls seine endgültige Form. Dabei besteht seine Hauptaufgabe in der Begrenzung der Bandbreite in der Art, dass das Signal gegenüber dem Rauschen bevorzugt und somit das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert wird /11/. Insgesamt wird aus dem ursprünglich sehr kurzen Signalpuls ein breiterer geformt. Für ideale Vorverstärker und Formgeber ist die Amplitude des Ausgangssignals proportional zur Amplitude des Eingangssignals. Das analoge Ausgangssignal wird zur Analyse und/oder Speicherung digitalisiert.

Für die in dieser Arbeit aufgebaute Detektorebene wurde ein Galliumarsenidsensor verwendet. Untersuchungen haben gezeigt, dass Galliumarsenidsensoren eine gute Strahlungshärte aufweisen (z.B. /12/). Somit kommen diese als Kandidaten für BeamCal in Frage und bieten eine Alternative zu Diamantsensoren, die zwar strahlungshärter als Galliumarsenidsensoren sind, jedoch weit kostenintensiver in der Herstellung.

Vorverstärker und Formgeber sind als integrierte Schaltungen realisiert, den „Front-End-ASICs“. Zur Vervollständigung der Ausleselektronik für BeamCal und LumiCal ist vorgesehen, Analog-Digital-Wandler ebenfalls als integrierte Schaltungen zu realisieren. Da diese zum Zeitpunkt der vorliegenden Arbeit noch nicht zur Verfügung standen,

wurden die Ausgangssignale der Front-End-ASICs durch einen externen Analog-Digital-Wandler digitalisiert.

Leiterbahnen verbinden den Sensor mit den Eingangskanälen der Front-End-ASICs. Die Gesamtheit dieser Leiterbahnen wird im Weiteren mit „Fanout“ bezeichnet.

Das Bestücken einer vorgefertigten Leiterplatte (im Weiteren Ausleseplatine genannt) mit dem Sensor, den Front-End-ASICs und dem Fanout komplettiert die Detektorebene.

Die Ausleseplatine dient einerseits der mechanischen Befestigung der einzelnen Detektorkomponenten, andererseits erlauben die sich darauf befindlichen elektronischen Schaltungen und Leiterbahnen erst den Betrieb der Detektorebene. Entsprechende Schaltungen regulieren die extern angeschlossene Spannungsversorgung für die Betriebs- und Regelspannungen der Front-End-ASICs. Eine Metallschicht auf die der Sensor aufgeklebt wird und entsprechende Leiterbahnen dienen dem Anschluss der Bias-Spannung für den Sensor. Des Weiteren werden die Ausgangssignale der Front-End-ASICs durch eine auf der Ausleseplatine befindlichen Verstärkerstufe noch einmal verstärkt, bevor sie vom Analog-Digital-Wandler ausgelesen werden.

Vor dem Zusammenbau<sup>2</sup> der Detektorebene wurde das Fanout konzipiert und Messungen an den Front-End-ASICs und dem Sensor zu deren Charakterisierung vorgenommen. In den folgenden Kapiteln wird jeweils eine Einführung gegeben, in denen die jeweiligen Komponenten näher erläutert werden.

## 2.1 Galliumarsenidsensoren

### 2.1.1 Galliumarsenid als Sensormaterial

Galliumarsenid (GaAs) ist ein III-V-Verbindungshalbleiter mit einem direkten Übergang. Der Bandabstand beträgt 1.42 eV bei 300 K /13/.

Halbleiterdetektoren fungieren als Festkörperionisationskammern /11/. Geladene Teilchen geben Energie an das Halbleitermaterial ab, wodurch sie entlang ihres Weges Elektron-Loch-Paare erzeugen. Durch Anlegen einer äußeren Spannung kann das Rekombinieren der Elektronen und Löcher verhindert werden. Diese driften dann unter dem Einfluss des elektrischen Feldes zu den jeweils entgegengesetzt geladenen Elektroden, wobei sie einen elektrischen Strom induzieren. Eine Integration dieses Stroms über die Signaldauer liefert eine Signalladung. Da die Anzahl der erzeugten Elektron-Loch-Paare proportional zur vom Halbleiter absorbierten Energie ist, ist auch die Signalladung proportional zu dieser.

---

<sup>2</sup> Die einzelnen technischen Schritte, insbesondere das Aufkleben des Sensors, das Aufkleben und Bonden der Front-End-ASICs sowie die Fertigung und das Bonden des Fanouts, wurden durch Fachkräfte durchgeführt und nicht durch den Autor selbst.



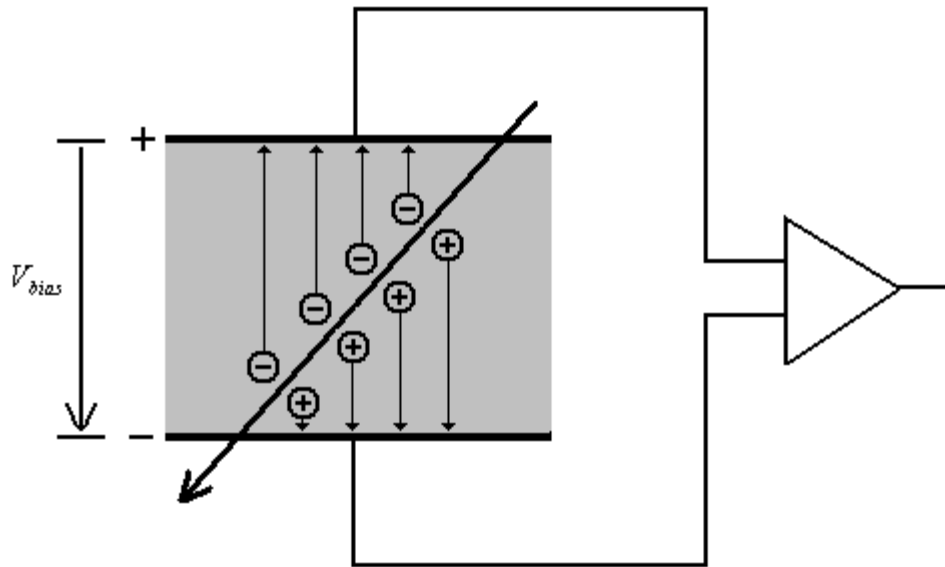


Abb. 2.2: Schematische Darstellung des Prinzips eines Halbleitersensors.  
(in Anlehnung an /11/)

## 2.1.2 Eigenschaften der Sensoren

In dieser Arbeit wurden fünf Sensoren getestet, welche aus so genanntem halbisolierendem (semi-insulating, SI-) GaAs bestehen und nach dem Liquid-Encapsulated-Czochralski-Verfahren hergestellt wurden. Man spricht von halbisolierendem GaAs, wenn dessen spezifischer elektrischer Widerstand nahe dem des intrinsischen elektrischen Widerstandes eines perfekten GaAs-Kristalls von  $3 \times 10^9 \Omega \text{cm}$  (bei 300 K) liegt /14/. Durch Verunreinigungen in der Schmelze und natürlichen Defekten, ist es bisher nicht möglich GaAs ohne zusätzliche Donator- und Akzeptorniveaus herzustellen. Diese kompensieren sich teilweise, indem die Akzeptoren von den Donatoren abgegebene Elektronen aufnehmen. Halbisolierendes Verhalten kann erreicht werden, indem der im Material dominierende flache Dotand durch tiefe Zentren des entgegengesetzten Typs überkompensiert wird /14/. Als tiefe Zentren werden Donator- und Akzeptorniveaus nahe der Mitte der Bandlücke bezeichnet. Mit „flach“ werden Donatoren bezeichnet, deren Energieniveaus in der Nähe des Leitungsbands liegen, bzw. Akzeptoren, deren Energieniveaus sich nah am Valenzband befinden. Die hier untersuchten GaAs-Sensoren sind mit Tellur als flacher Donator in einer Konzentration von  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  bis  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  dotiert, überkompensiert durch die Dotierung mit Chrom als tiefer Akzeptor in der Konzentration von  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Abbildung 2.3 zeigt das Foto eines Sensors.

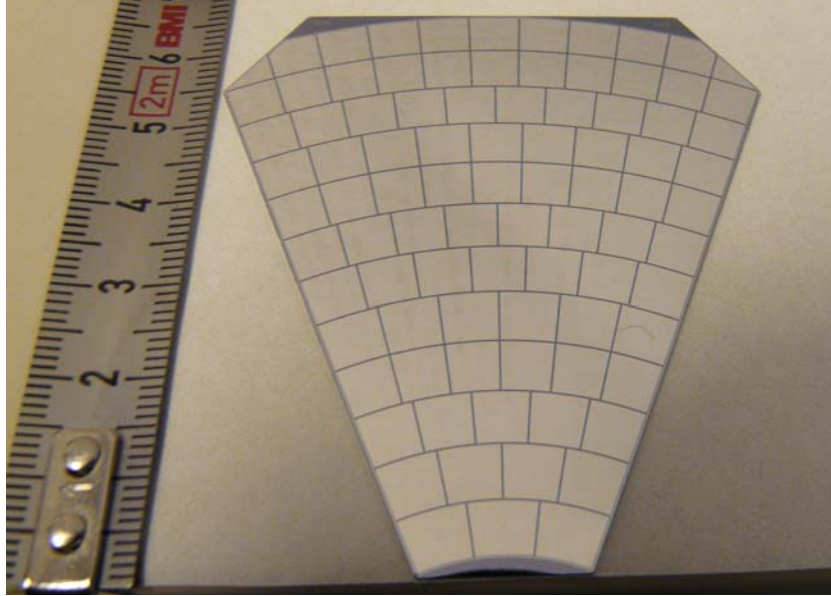


Abb. 2.3: Foto eines GaAs-Sensors.

Die Sensoren sind etwa 500  $\mu\text{m}$  dick und von beiden Seiten metallisiert, um eine äußere Spannung anlegen zu können. Die Vorderseite weist eine Segmentierung auf, um den Ort der detektierten Teilchen erhalten zu können. Ein einzelnes Segment wird als Pad bezeichnet. Die Padgrößen betragen etwa 0.5 cm x 0.5 cm.

### 2.1.3 Strom-Spannungs-Kennlinien

Für die in Kapitel 3 beschriebenen Messungen im Teststrahl wurden 32 Pads ausgewählt, die bestrahlt werden sollten, da zunächst 4 Front-End-ASICs mit jeweils 8 Auslesekanälen zur Verfügung standen. Dabei wurden jeweils 8 Pads zu einer Region zusammengefasst. Zur Unterscheidung erhielten die Pads Bezeichnungen. Die Pads werden von links nach rechts und die Ringe von oben nach unten gezählt. Beispielsweise wird das erste Pad des ersten Rings mit „Ring01Pad01“ („R01P01“) bezeichnet, das vierte Pad des sechsten Rings mit „Ring06Pad04“ („R06P04“) usw. Die Systematik der Bezeichnungen, die für die Messungen am Teststrahl ausgewählten Pads und die Einteilung in Regionen werden noch einmal in Abbildung 2.4 deutlich gemacht.

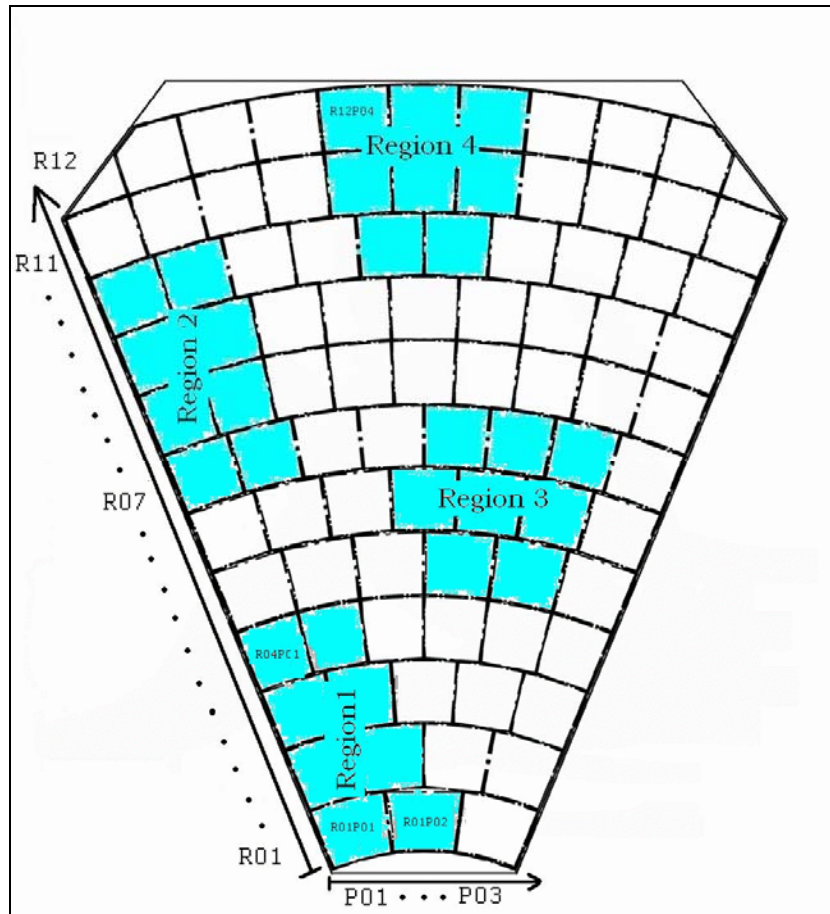
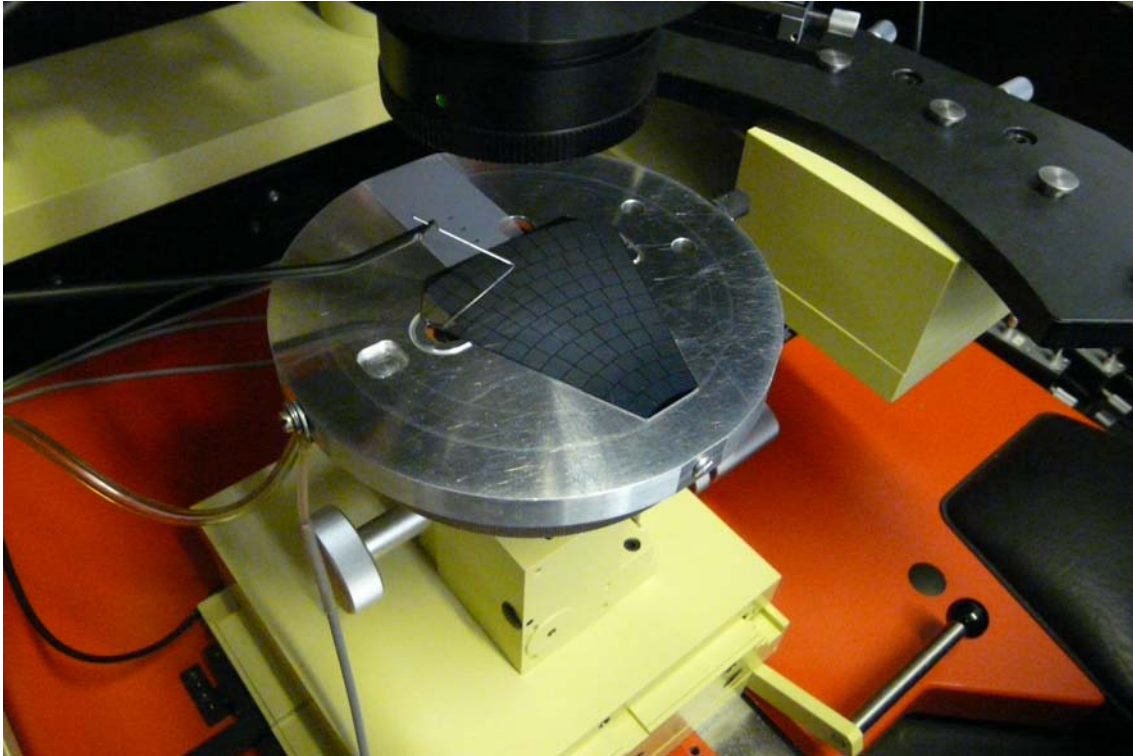


Abb. 2.4: Die Einteilung in Ringe (von unten nach oben), die Nummerierung der Pads (von links nach rechts), die ausgewählten Pads (farbig gekennzeichnet) und die Einteilung in Regionen.

Zur Unterscheidung der Sensoren wurden die Bezeichnungen des Herstellers übernommen. Diese sind „AG-66 No.7“, „AG-66 No. 21“, „AG-66 No.26“, „AG-66 No.34“ und „AG-84 No.5.“

Um die Sensoren zu charakterisieren, wurden Strom-Spannungs-Kennlinien, im Weiteren IV-Kennlinien genannt, der ausgewählten Pads aufgenommen. Die Messungen der IV-Kennlinien wurden mit Hilfe einer Probe-Station durchgeführt. Die Rückseite des Sensors wurde durch eine Metallplatte (der so genannten „Backplane“ der Probe-Station) kontaktiert. Die Kontaktierung des Pads auf der Vorderseite wurde durch Aufsetzen einer Messnadel hergestellt, wie dies in Abb. 2.5 gezeigt ist. Anschließend wurden in 2,5-Volt-Schritten Spannungen zwischen 0 Volt und 350 Volt zwischen Messnadel und Backplane angelegt und in jedem Schritt der Strom durch das Pad gemessen.



*Abb. 2.5: Foto des Messaufbaus für die Messungen der IV-Kennlinien.*

Die resultierenden Kennlinien zeigen für alle fünf Sensoren ein qualitativ ähnliches Verhalten. Repräsentativ sollen an dieser Stelle die Ergebnisse für den Sensor „AG-66 No.7“ gezeigt werden.<sup>3</sup> Die Abbildung 2.6 zeigt die IV-Kennlinien für alle 32 gemessenen Pads, geordnet nach den vier Regionen. Alle Kurven zeigen einen ähnlichen Verlauf. Zwischen Null Volt und etwa 30 Volt steigt der Strom zunächst relativ stark an, um dann bis 350 Volt in einen annähernd linearen Verlauf überzugehen. Hier zeigt sich das halbisolierende Verhalten der GaAs-Sensoren. Ihre IV-Charakteristik ähnelt mehr der eines ohmschen Widerstandes denn dem eines Halbleiters.

Die Messungen dienten auch als Ausgangspunkt, um einen der fünf Sensoren für den Bestrahlungstest auszuwählen. So können ungewöhnliche Verläufe der Kennlinien auf beschädigte Pads hindeuten, wie es in Abbildung 2.7 zu sehen ist. Das Pad „R01P01“ des Sensors AG66-No.34 zeigt bei einer angelegten Spannung größer 200 Volt eine starke Abweichung vom linearen Verlauf. Messwiederholungen nach Neuaufsetzen der Messnadel lieferten dasselbe Resultat. Dieser Sensor wurde nicht für den Bestrahlungstest verwendet.

---

<sup>3</sup> Die IV-Kennlinien der übrigen 4 Sensoren befinden sich im Anhang

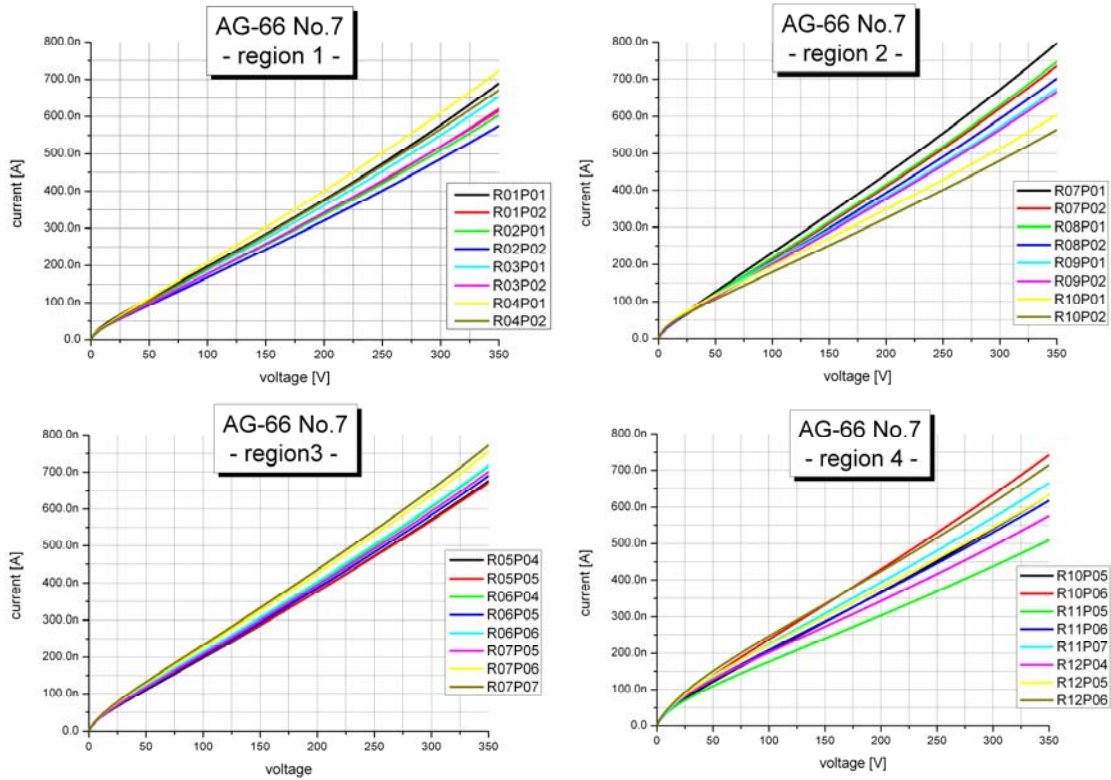


Abb. 2.6: IV-Kennlinien von 32 Pads des AG-66 No.7.

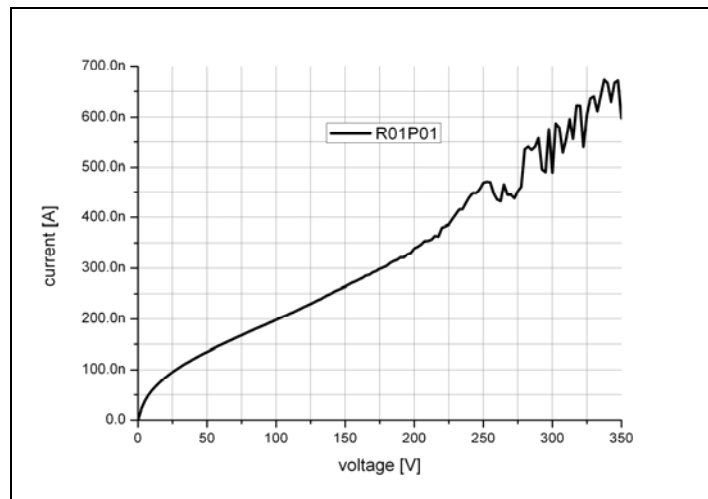


Abb. 2.7: IV-Kennlinie des Pads „R01P01“ des  
Sensors AG-66 No.34

Neben der Unversehrtheit der Pads, diene der Strom als weiteres Auswahlkriterium. Dieser sollte möglichst gering sein und nicht zu stark von Pad zu Pad variieren. Große Unterschiede im Wert des Stromes bei gleicher Spannung weisen auf Inhomogenitäten im Sensormaterial hin. Als Vergleichskriterium dient der gemessene Strom durch die einzelnen Pads, bei einer angelegten Spannung von 350 Volt. Dieser wurde auf die

Fläche des jeweiligen Pads normiert. Die Tabelle 2.1 zeigt die arithmetischen Mittelwerte des normierten Stroms und die jeweiligen Standardabweichungen für die einzelnen Sensoren.

Sensor- bezeichnung	Mittelwert	Standardabweichung
	[nA/mm <sup>2</sup> ]	[nA/mm <sup>2</sup> ]
AG-66 No.7	22.57	2.63
AG-66 No.21	17.47	2.53
AG-66 No.26	17.26	2.19
AG-66 No.34	18.05	4.05
AG-84 No.5	35.15	3.02

Tabelle 2.1: Mittelwert und Standardabweichung des normierten Stroms bei einer Spannung von 350 V

Auffällig sind vor allem die gemessenen Werte für den Sensor AG-84 No.5. Der Mittelwert des gemessenen Stroms pro Fläche ist mit 35.15 nA/mm<sup>2</sup> etwa doppelt so groß, wie die der Sensoren AG-66 No. 21 und AG-66 No.26.

Mit einem Wert von 18.05 nA/mm<sup>2</sup> liegt der Sensor AG-66 No. 34 zwar dicht bei den Werten der Sensoren AG-66 No. 21 und AG-66 No.26, jedoch ist die Standardabweichung weit höher. Dies bedeutet, dass der Strom pro Fläche zwischen den einzelnen Pads des Sensors stärker variiert.

Die in der Abbildung 2.8 dargestellten Boxplots dienen der besseren Veranschaulichung der erhaltenen Messwerte.

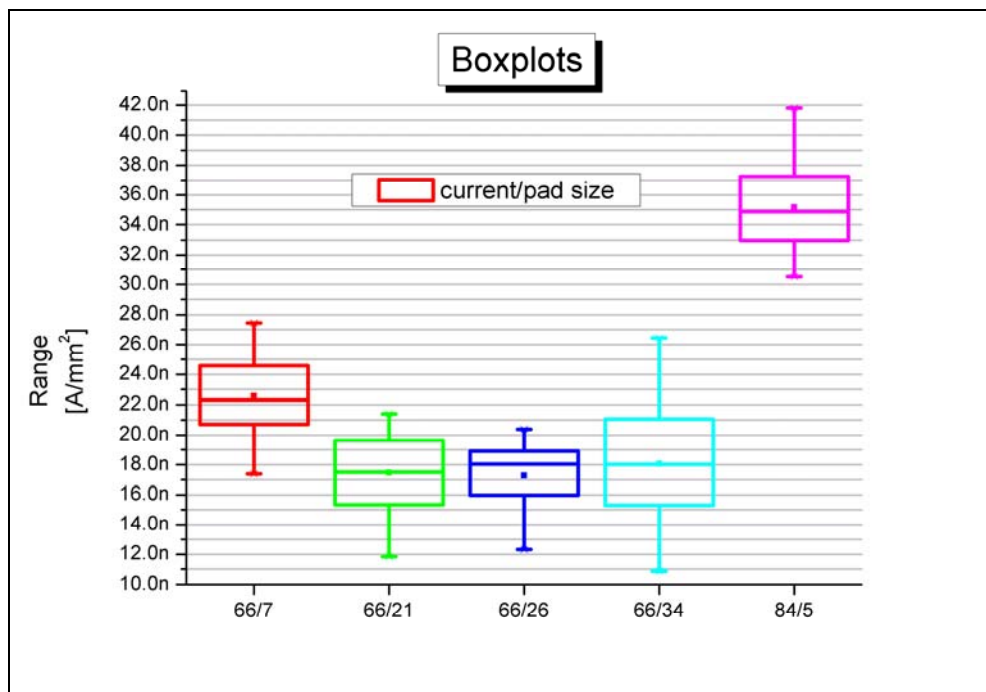


Abb. 2.8: Boxplots für den Strom bei einer angelegten Spannung von 350 V, normiert auf die jeweilige Padfläche .



Die X-Achse bezeichnet die einzelnen Sensoren. Die Y-Achse die Spannweite des Stroms pro Fläche bei einer Spannung von 350 Volt. Man erkennt, dass der Sensor AG-66 No.26 sowohl den kleinsten Mittelwert aufweist, als auch die kleinste Spannweite der Werte besitzt.

Der Sensor AG-66 No.26 weist also bei beiden Vergleichskriterien die besten Ergebnisse auf und wurde somit für den Bestrahlungstest verwendet.

## 2.2 Fanout

Das Fanout verbindet die einzelnen Pads des Sensors mit den Front-End-Kanälen der ASICs. Da jeder ASIC acht Kanäle hat, und somit die Signale von acht Pads verarbeiten kann, wurden beim Entwurf des Fanout jeweils acht Leiterbahnen zu einer Gruppe zusammengefasst. Jede Gruppe sollte dann einem Front-End-ASIC zugeordnet werden. Die Abbildung 2.9 zeigt den Entwurf des Fanouts.

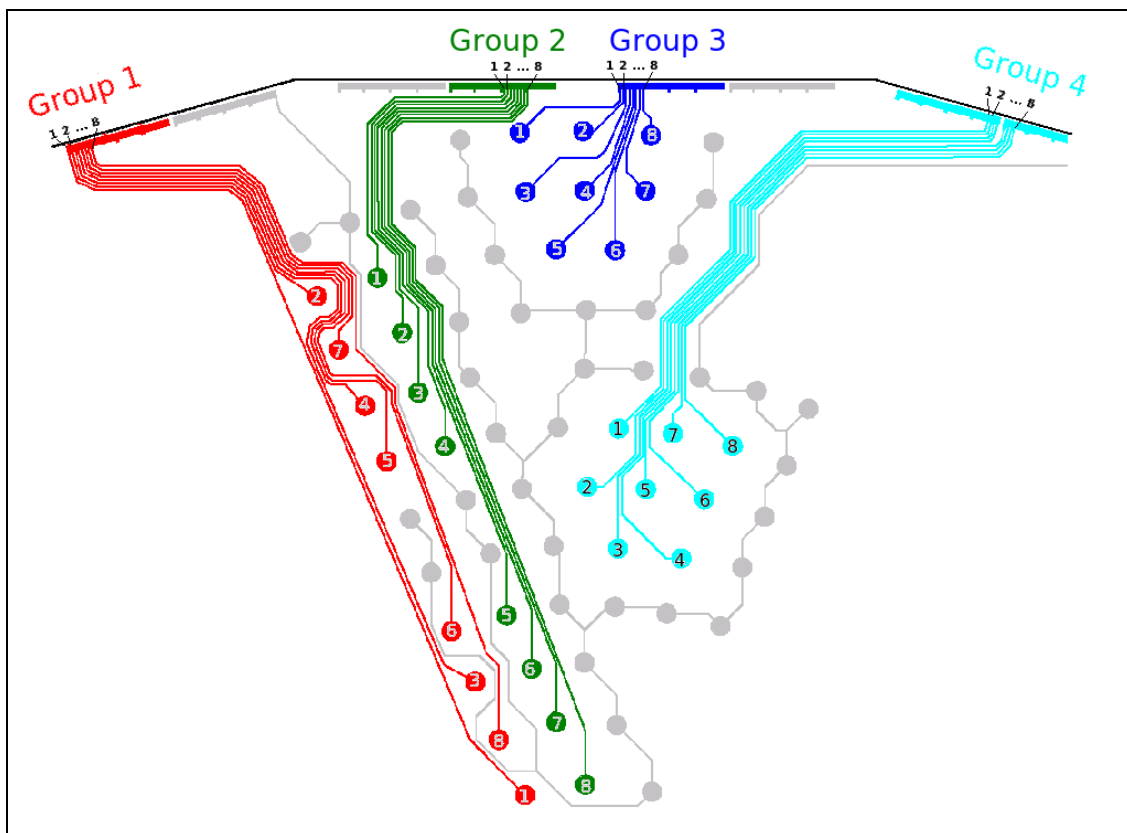


Abb. 2.9: Entwurf des Fanouts.

Es wurden verschiedene Konzepte verfolgt, um die Leiterbahnen zu gruppieren. Der Grund hierfür war, dass für den Fall dass es bei den Messungen im Teststrahl zu Überschneiden von Leiterbahn zu Leiterbahn kommt, eventuell Unterschiede zwischen den einzelnen Konzepten in der Größe der übergesprochenen Signale zu sehen sind.

Während die Gruppen 3 und 4 jeweils eine Region auslesen, lesen die Gruppen 1 und 2 jeweils 4 Pads der einen und 4 Pads einer anderen Region aus. Der Grund hierfür ist, dass im späteren Einsatz des BeamCal weit mehr Teilchendurchgänge im unteren Teil des Detektors erwartet werden, da sich dieser näher am Strahl befinden wird. Die Anordnung der Leiterbahnen von Gruppe 1 und 2 zielt nun darauf ab, dass nicht ein Chip allein den größten Teil aller Signale ausliest. Fällt dieser aus, ist der Detektor im gesamten unteren Bereich blind.

Des Weiteren besteht ein konzeptioneller Unterschied in den Gruppen in der Art, wie die Leiterbahnen zu den Chips geführt werden. Während in der Gruppe 2 benachbarte Pads durch Leiterbahnen ausgelesen werden die ebenfalls benachbart sind, wurden für die Gruppen 1, 3 und 4 verschiedene Zuordnungen getroffen, wodurch sich eine Minimierung des Übersprechens von Leiterbahn zu Leiterbahn erhofft wurde.

## 2.3 Front-End-ASICs

### 2.3.1 Funktionsweise und Eigenschaften der Front-End-ASICs

Die hier getesteten Front-End-ASICs sind die ersten Prototypen für die Ausleseelektronik sowohl für das BeamCal, als auch für das LumiCal. Sie wurden an der AGH University of Science and Technology in Krakau entwickelt [15]. Die ASICs sind integrierte Schaltungen mit mehreren Front-End-Kanälen. Ein Front-End-Kanal verarbeitet Eingangssignale nach dem in Abbildung 2.1 gezeigten Prinzip mit Hilfe eines ladungsempfindlichen Vorverstärkers und einer weiteren Verstärkerstufe als Formgeber. Die Abbildung 2.10 zeigt das Blockdiagramm eines einzelnen Front-End-Kanals.

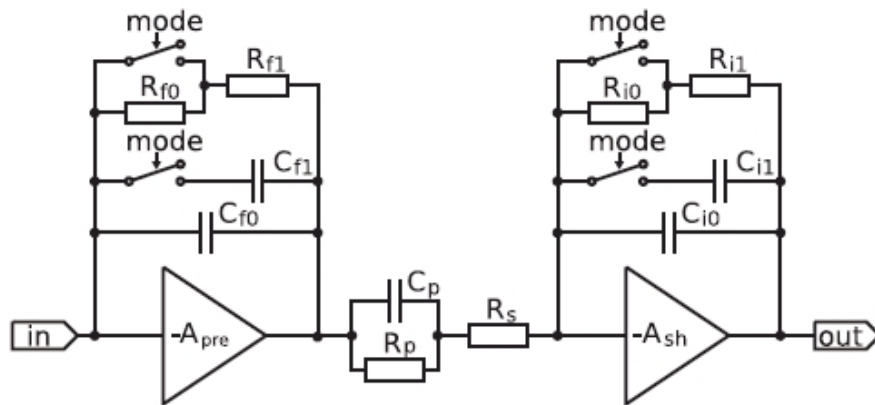


Abb. 2.10: Blockdiagramm eines Front-End-Kanals.

Dabei sind  $A_{pre}$  der Vorverstärker („pre“ steht für preamplifier) und  $A_{sh}$  der Formgeber („sh“ steht für shaper). Die Bauelemente  $R_f$  und  $C_f$  bilden den Gegenkopplungsschaltkreis für den Vorverstärker,  $R_i$  und  $C_i$  den für den Formgeber. Durch die im Blockdiagramm mit „mode“ bezeichneten Schalter lassen sich die Gesamtkapazitäten und -widerstände der Gegenkopplungsschaltkreise erhöhen oder



verringern. Die größere Kapazität führt zu einer geringeren Verstärkung und die kleinere zu einer höheren. Mit der hohen Verstärkung sind die Front-End-Kanäle empfindlich gegenüber besonders kleinen Eingangssignalen. Die Einstellung mit der geringen Verstärkung bietet den Vorteil, dass diese linear über einen weiten Bereich an größeren Eingangssignalen bleibt.

Im Folgenden wird die Einstellung mit der hohen Verstärkung „High“-Modus und die mit der geringen Verstärkung mit „Low“-Modus bezeichnet. Die Kombination der Einstellungsmöglichkeiten für Vorverstärker und Formgeber dementsprechend mit „HighHigh“-, „HighLow“-, „LowHigh“- und „LowLow“-Modus.

Zudem wurden zu Testzwecken zwei verschiedene Gegenkopplungsarten umgesetzt, eine aktive und eine passive. Das Blockdiagramm zeigt ein Front-End-Kanal mit passiver Gegenkopplung, in denen die Bauelemente  $R_f$  und  $R_i$  elektrische Widerstände sind. Für Front-End-Kanäle mit aktiver Gegenkopplung werden dagegen MOSFETs (engl. Abkürzung für **M**etal **O**xide **S**emiconductor **F**ield-**E**ffect **T**ransistor, zu Deutsch: Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor) genutzt /15/.

Auf jedem ASIC sind vier Front-End-Kanäle mit aktiver und vier Front-End-Kanäle mit passiver Gegenkopplung vorhanden.

Durch geeignete Wahl der Widerstände und Kapazitäten (siehe dazu /15/) ist die Signalformung durch einen Front-End-Kanal äquivalent zu der eines Hochpass-Tiefpass-Pulsformgebers (Kurzschreibweise: CR-RC-Formgeber) mit gleichen Zeitkonstanten.

Die Abbildung 2.11 zeigt das Funktionsprinzip eines solchen Formgebers.

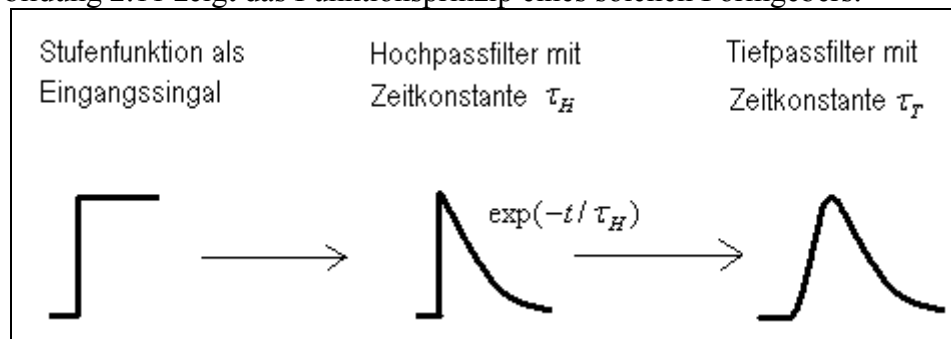


Abb. 2.11: Funktionsprinzip eines CR-RC-Formgebers.

Der Hochpassfilter dämpft Frequenzen unterhalb seiner Grenzfrequenz und setzt die Dauer des Pulses durch die Abklingzeit  $\tau_H$  fest. Der Tiefpassfilter mit der Zeitkonstanten  $\tau_T$  dämpft Frequenzen oberhalb seiner Grenzfrequenz und verlängert die Anstiegszeit.

Für eine ideale Stufenfunktion  $V_{in}(t) = \begin{cases} V_0 & (t > 0) \\ 0 & (t \leq 0) \end{cases}$  als Eingangssignal und gleichen

Zeitkonstanten für Hoch- und Tiefpassfilter ( $\tau = \tau_H = \tau_T$ ), lässt sich die resultierende Pulsform  $V_{aus}(t)$  gut durch die Funktion

$$V_{aus}(t) = V_0 \frac{t}{\tau} \exp(-t/\tau) \quad (2.1)$$

beschreiben /11/.

Der Flächeninhalt  $F$  der Funktion ist  $F = V_0 \tau$  und die Amplitude  $A$  ist  $A = V_0 \exp(-1)$ .

Somit sind sowohl Flächeninhalt, als auch Amplitude der Ausgangsfunktion direkt proportional zur Amplitude der Eingangsfunktion.

In realen Anwendungen ist das Eingangssignal des Formgebers keine ideale Stufenfunktion, sondern die Amplitude klingt langsam mit der Zeit ab. Dies führt zu so genannten „Undershoots“ in der resultierenden Signalform. Die Abbildung 2.12 zeigt eine vereinfachte Darstellung eines solchen Undershoots.

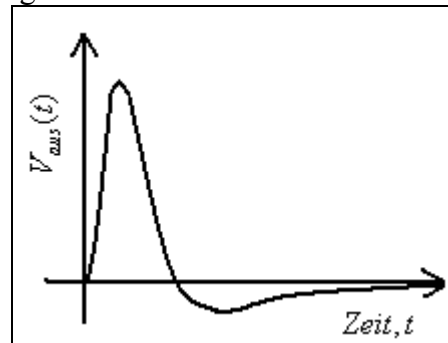


Abb. 2.12: Vereinfachte Darstellung eines Undershoots

Mit Hilfe eines so genannten „pole-zero cancellation circuit“ (engl. für Schaltkreis mit Pol-Nullstellen-Aufhebung) kann der Effekt durch die Abklingzeit des Eingangssignals aufgehoben und somit Undershoots vermieden werden/11/.

Ein solcher pole-zero cancellation circuit ist durch Bauelemente  $C_p$ ,  $R_p$  und  $R_s$  im Blockdiagramm für die hier untersuchten Front-End-ASICs realisiert worden.

### 2.3.2 Linearitätstests und Kalibrierungsmessungen

Nachdem die Ausleseplatine mit den Front-End-ASICs (im Weiteren „Chips“ genannt) bestückt wurde, wurde ihre Linearität getestet und Kalibrierungsmessungen mit Analog-Digital-Wandlern durchgeführt. Ein Chip konnte jedoch nicht korrekt gebondet werden. Somit standen nur drei der vier Chips zur Verfügung. Diese wurden nach ihrem Platz auf der Ausleseplatine mit „Chip1“, „Chip3“ und „Chip5“ benannt.

#### 2.3.2.1 Analog-Digital-Wandler

Um die analogen Signale der Ausleseelektronik speichern und weiterverarbeiten zu können, müssen diese digitalisiert werden. Dies geschieht mit Hilfe eines Analog-Digital-Wandlers (im Englischen Analog-to-Digital Converter, kurz **ADC**). Für die Tests der Front-End-ASICs im Labor wurde ein ladungsintegrierender ADC (C.A.E.N. v265) verwendet. Dieser integriert ein Eingangssignal über ein vorher festgelegtes Zeitfenster und gibt einen diskreten Wert als Ausgangssignal zurück. Das Ausgangssignal in ADC-channel ist für den ladungsintegrierenden ADC das Maß für Ladung. Der ADC kann bis zu acht Eingangssignale gleichzeitig bearbeiten.

Um auch die Pulsform der Ausgangssignale der Front-End-ASICs sehen zu können und so eine genauere Analyse zu ermöglichen, wurde für die späteren Messungen im Teststrahl ein Sampling-ADC (C.A.E.N. v1721) verwendet. Dieser speichert die

diskreten Werte der Amplitude am Eingang alle zwei Nanosekunden in einem Puffer. Somit wird das Eingangssignal sowohl in der Signalthöhe als auch in der Zeit digitalisiert. Der diskrete Wert der Signalthöhe wird in ADC-channel, der der diskreten Zeiteinheiten in Samples angegeben. Eine Aufsummierung der ADC-channel über die Sample, entspricht einer Integration des Eingangssignals über der Zeit. Der Wert dieses Integrals ist äquivalent einer Ladung und wird in dieser Arbeit in a.u. (engl. Abkürzung für **arbitrary unit**, zu Deutsch: willkürliche Einheit) angegeben.

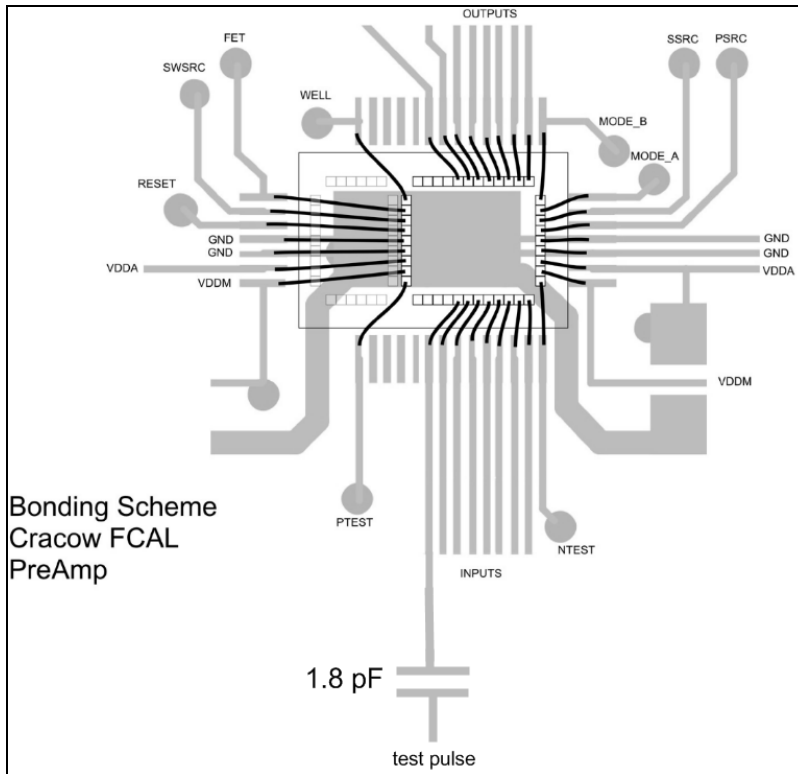
Der Sampling-ADC verfügt ebenfalls über acht Kanäle. Erhält er das Signal dazu (im Weiteren Trigger genannt), liest dieser ein festgelegtes Zeitfenster für alle acht Kanäle gleichzeitig vom Puffer aus. Die Position des Auslesefensters im Puffer kann relativ zum Trigger gewählt werden, so weit es die Pufferkapazität zulässt. Auf diese Weise kann das Auslesefenster so gewählt werden, dass sich das aufgezeichnete Signal an einer bestimmten Stelle im Auslesefenster befindet.

### **2.3.2.2 Durchführung und Auswertung der Messungen**

Für die nachfolgenden Messungen wurde der ladungsintegrierende ADC „C.A.E.N. V265“ verwendet.

Um die Funktion der Chips auch ohne Sensor testen zu können, bietet die Ausleseplatine zwei Testeingänge. Über diese können Testpulse direkt zu den Eingängen der Chips gesandt werden. Diese wurden verwendet, um einerseits die Linearität der Verstärkung der Chips zu messen und andererseits, um eine Kalibrierung für den ADC zu erhalten. Letzteres wird benötigt, um die Einheiten des ADC (ADC-channel) in Ladung am Verstärkereingang umrechnen zu können. Hierfür ist es nötig, die Einkopplungskapazität für die Testpulse zu kennen. Diese wird für die Testpulseingänge der Ausleseplatine mit 0.5 pF angegeben /15/.

Um diesen Wert zu überprüfen wurde ein Kondensator mit einer bekannten Kapazität von 1.8 pF direkt an Kanal 0 von Chip 1 gebondet.



*Abb. 2.13: Schematisch Darstellung eines Front-End-ASICs mit einem Kondensator bekannter Kapazität am Eingang des Kanals 0.*

Über diesen wurden Testpulse verschiedener Amplitude und Vorzeichen eingekoppelt. Dabei lieferte ein Pulsgenerator Pulse mit +1 Volt bzw. -1 Volt, die mit einem Dämpfungsregler in 3dB- bzw. 6dB-Schritten variiert wurden. Da der ADC nur negative Eingangssignale verarbeiten kann, wurde für die positiven Testpulse zusätzlich ein Konverter zwischen Ausleseplatine und ADC geschaltet. Außerdem gehörte zum Messaufbau ein Oszilloskop zur Darstellungen der Ausgangspulse der Chips, um eventuelle Änderungen in der Pulsform bei verschieden hohen Eingangssignalen sehen zu können.

Die Abbildung 2.14 zeigt die Ergebnisse für alle vier möglichen Modi.

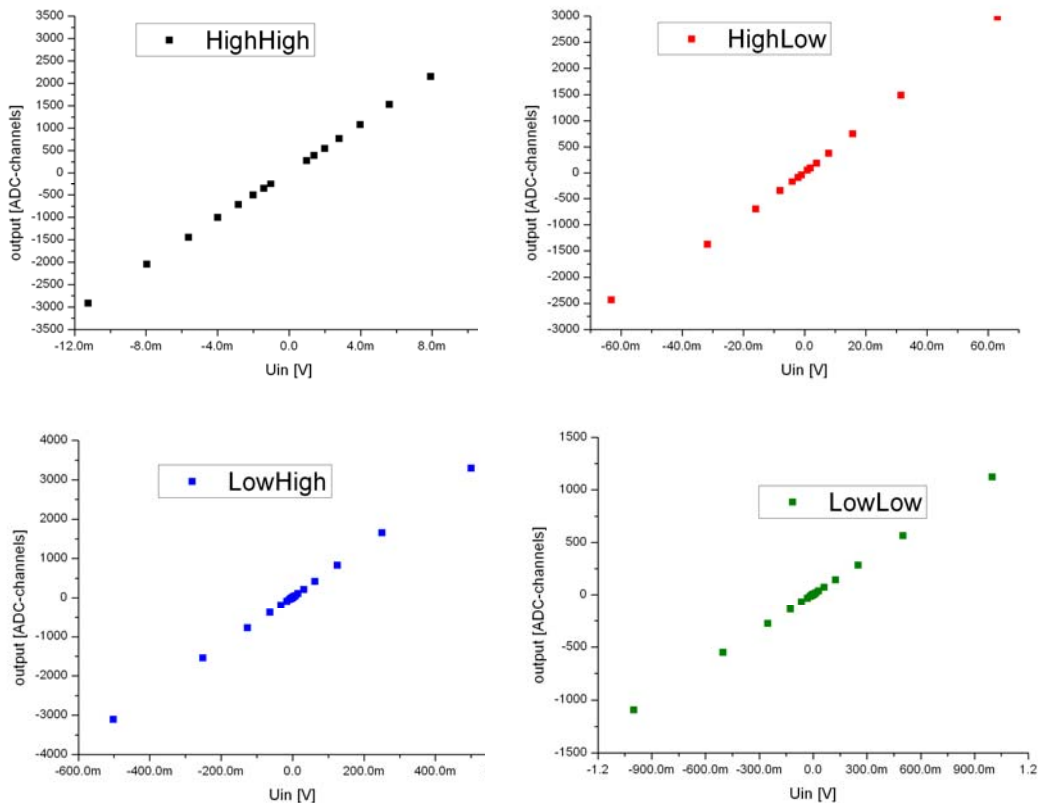


Abb. 2.14: Ergebnisse der Linearitätsmessungen für Kanal 0 des Chips 1

Alle vier Verstärkermodi zeigen ein sehr gutes lineares Verhalten. Lediglich der Wert bei  $-63 \text{ mV}$  für die Verstärkereinstellung „HighLow“ weicht davon ab. Am Oszilloskop konnten Änderungen in der Pulsform für die Modi „HighHigh“ und „HighLow“ bei größeren Eingangssignalen beobachtet werden, was diese Abweichung vom linearen Verhalten erklärt. Für den Modus „HighLow“ begann sich die Pulsform bei einer Eingangsamplitude von  $\pm 32 \text{ mV}$  zu verändern und für den „HighHigh“-Modus bereits bei  $\pm 8 \text{ mV}$ . Die Abweichungen von der Idealform des Ausgangspulses waren nur gering, was sich darin widerspiegelt, dass in Abb. 2.14 die Kurve für den „HighHigh“-Modus linear ist.

Um nun die Einkopplungskapazität der Testpulseingänge zu ermitteln, wurde die vorhergehende Messung für einige Messpunkte mit der Verstärkereinstellung „LowHigh“ wiederholt, mit dem Unterschied, dass nun die Testpulse über die Eingänge der Ausleseplatine gesendet wurden. Der Anstieg der Messkurve für den externen Kondensator und der Anstieg der Messkurve für den internen Kondensator stehen im selben Verhältnis wie die bekannte Kapazität des externen Kondensators und die gesuchte Einkopplungskapazität.

Die Abbildung 2.15 zeigt die beiden Messkurven und das Ergebnis für ihre jeweiligen linearen Anpassungen.

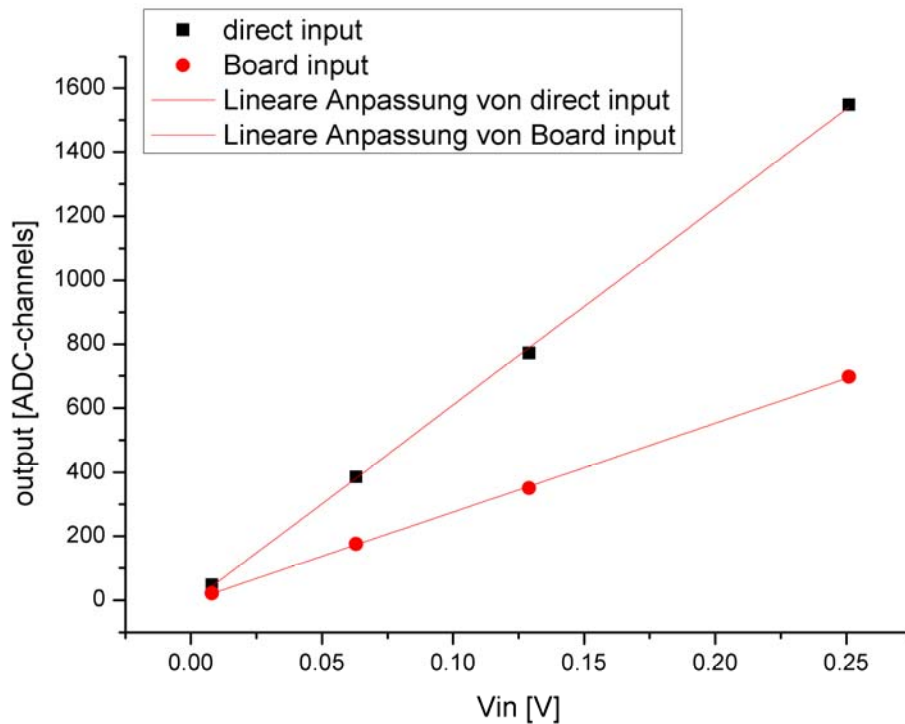


Abb.2.15: Messkurven für die Einspeisung der Testpulse über den Kondensator mit bekannter Kapazität („direct input“) und über Testpulseingänge mit gesuchter Kapazität („Board input“)

Die lineare Anpassung für die Kurve mit externem Kondensator gibt einen Anstieg von  $6165.6 \pm 74.6$  ADC-channel/Volt. Für den Anstieg der Kurve für die interne Kopplung ergibt sich  $2775.8 \pm 25.1$  ADC-channel/Volt.

Somit errechnet sich die gesuchte Einkopplungskapazität mit  $2775.8/6165.6 \cdot 1.8 \text{ pF}$  zu  $0.81 \text{ pF}$ . Für den Kanal 0 von Chip 1 liegt der gemessene Wert also höher, als der angegebene Wert von  $0.5 \text{ pF}$ .

Um eine vollständige Kalibrierung des ADC für alle drei Chips zu erhalten, wurde der oben beschriebene Messaufbau mit negativen Pulsen und einer Dämpfung von  $42 \text{ dB}$  verwendet, also Pulse mit einer Amplitude von etwa  $-7.9 \text{ mV}$ . Mit einer Einkopplungskapazität von  $0.8 \text{ pF}$  ergibt sich somit eine Ladung von rund  $6 \text{ fC}$ . Diese ist in der Größenordnung der zu erwartenden Ladung, die ein minimal-ionisierendes Teilchen im Detektormaterial von einigen hundert Mikrometern Dicke erzeugen würde. Gemessen wurden jeweils alle acht Kanäle aller drei Chips in den Verstärkermodi „HighHigh“, „HighLow“ und „LowHigh“.

Die Tabelle 2.2 zeigt die Messwerte.

Chipkanal	Ausgangssignale [ADC-channel]								
	"HighHigh"-Modus			"HighLow"-Modus			"LowHigh"-Modus		
	Chip1	Chip3	Chip5	Chip1	Chip3	Chip5	Chip1	Chip3	Chip5
0	1715.2	984.6	1190.5	288.5	171.8	194.5	39.3	24.8	27.9
1	1021.8	986.2	1004.4	171.6	166.3	166.5	24.0	23.0	23.4
2	992.3	927.7	991.1	166.6	157.0	162.6	21.9	22.0	23.0
3	1010.3	934.7	993.8	167.4	184.8	164.6	24.1	21.9	23.1
4	442.1	460.5	450.6	74.4	77.8	74.5	22.2	23.2	22.5
5	473.1	474.6	467.9	80.2	80.2	76.7	23.9	23.2	23.6
6	454.5	449.6	459.6	75.7	77.4	73.8	19.3	22.8	23.0
7	654.9	499.3	516.3	110.3	83.8	84.7	33.0	23.7	25.9

Tabelle 2.2: Messwerte der Kalibrierungsmessung für den ladungsintegrierenden ADC

Für eine vergleichende Auswertung sind die Signalgrößen für alle drei Chips in der Abbildung 2.16 als Histogramme dargestellt, wobei die Histogrammüberschriften die drei Verstärkermodi bezeichnen.

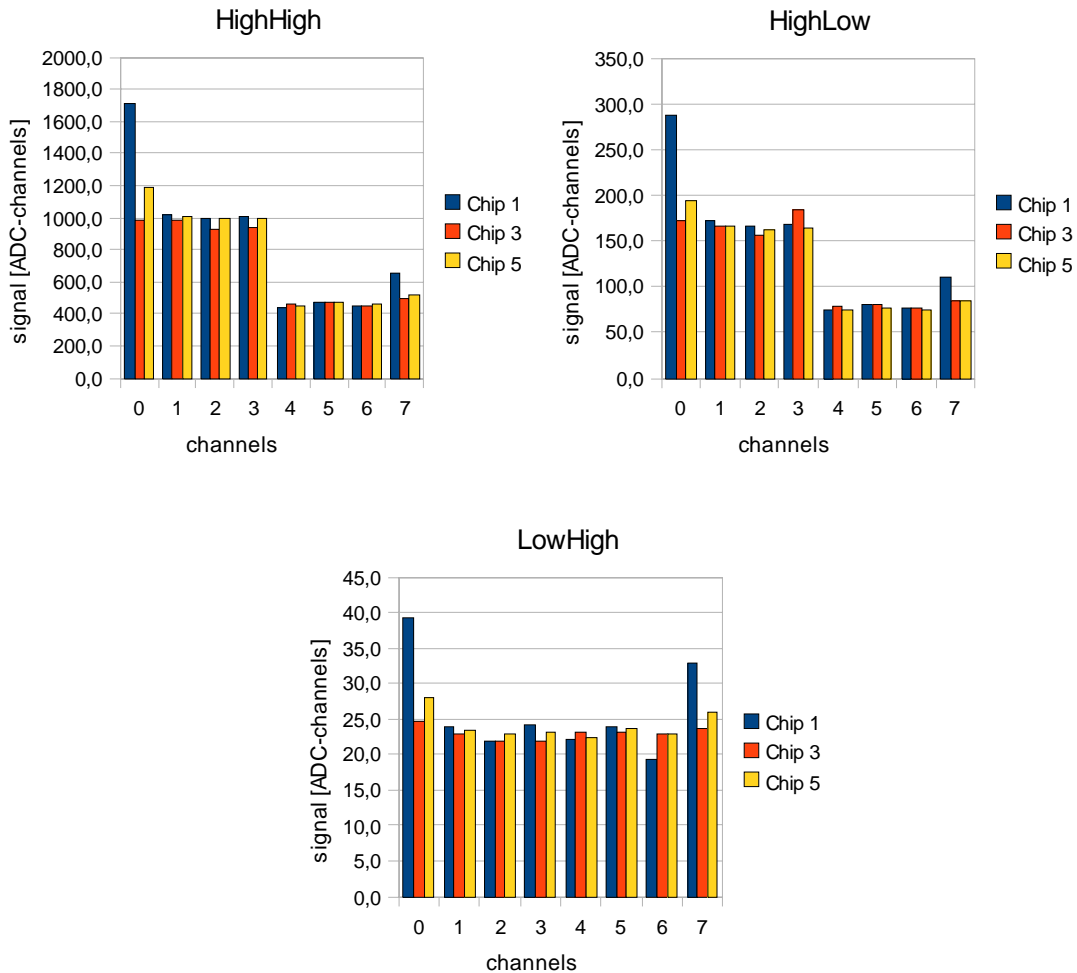


Abb. 2.16: Histogramme mit den Messwerten der Kalibrierungsmessung für den ladungsintegrierenden ADC

Die X-Achsen bezeichnen die Kanäle, die Y-Achsen die Signalgrößen in ADC-channel und die Farben stehen für die jeweiligen Chips.

Es fällt auf, dass sowohl im „HighHigh“- als auch im „HighLow“-Modus ein genereller Unterschied zwischen den Signalgrößen für Kanäle mit aktiver (Kanäle 0 bis 3) und denen mit passiver Gegenkopplung (Kanäle 4 bis 7) besteht. Schließt man zunächst die außenliegenden Kanäle 0 und 7 aus den Betrachtungen aus, so sind die Signale in diesen beiden Modi für die Kanäle mit aktiver Gegenkopplung etwa doppelt so groß gegenüber denen mit passiver. Wohingegen sich in der „LowHigh“-Einstellung die beiden Gegenkopplungsarten nicht in der Signalgröße bemerkbar machen.

Vergleicht man des Weiteren die drei Chips kanalweise untereinander für die jeweiligen Kanäle 1 bis 6 im selben Verstärkermodus, so betragen, bis auf zwei Ausnahmen, die Unterschiede in der Signalgröße weniger als zehn Prozent (im Verhältnis zum jeweils größten Messwert). Die erste Ausnahme sind die Messwerte für die Kanäle 3 in der „HighLow“-Einstellung. Hier beträgt der Unterschied zwischen Chip 3 und den beiden anderen etwa 11 %. Die zweite Ausnahme sind die Messwerte für die Kanäle 6 in der „LowHigh“-Einstellung mit einer Abweichung von etwa 16 % zwischen Chip 1 und den beiden übrigen.

Ein weitaus auffälligerer Unterschied besteht jedoch zwischen den außenliegenden Kanälen 0 und 7 zu den innenliegenden Kanälen 1 bis 6, vor allem für Chip 1. Vergleicht man Kanal 0 mit Kanal 1 des Chips 1 miteinander, so beträgt der Unterschied in der Signalgröße im „HighHigh“-Modus 40.4%, im „HighLow“-Modus 40.5% und im „LowHigh“-Modus 38.9%. Das Verhältnis der Signalgrößen der beiden Kanäle ist also in allen drei Verstärkermodi in etwa gleich.

Die Tabelle 2.3 zeigt Verhältnisse von Kanal 0 zu Kanal 1 des jeweils gleichen Chips und von Kanal 7 zu Kanal 5 für alle drei Chips in allen drei Verstärkermodi.

	Kanal_0 / Kanal_1			Kanal_7 / Kanal_5		
	"HighHigh"	"HighLow"	"LowHigh"	"HighHigh"	"HighLow"	"LowHigh"
Chip 1	1.68	1.68	1.64	1.38	1.38	1.38
Chip 3	1.00	1.03	1.08	1.05	1.04	1.02
Chip 5	1.19	1.17	1.19	1.10	1.10	1.10

*Tabelle 2.3: Signalgrößenverhältnisse zwischen außen- und innenliegenden Chipkanälen*

Sowohl Chip 1 als auch Chip 5 zeigen erkennbare Unterschiede in den Signalgrößen zwischen den außenliegenden und den innenliegenden Kanälen, wobei sie bei Chip 1 deutlich größer ausfallen. Für Chip 3 sind die Unterschiede dagegen sehr gering.

Es gibt zwei Gründe warum sich für verschiedene Kanäle die Signalgrößen bei gleicher Testpulsamplitude deutlich unterschieden können:

1. Die Verstärkung ist eine andere.
2. Sie unterscheiden sich in der Einkopplungskapazität für die Testpulse.

Den ersten Fall würde man für Kanäle mit unterschiedlicher Gegenkopplung erwarten, während sich die Verstärkung für Kanäle mit gleicher Gegenkopplung im gleichen Verstärkermodus nicht stark unterscheiden sollte. Somit lässt sich vermuten, dass die Einkopplungskapazität der außenliegenden Kanäle 0 und 7 zumindest für Chip 1 und Chip 5 eine andere ist, als für die Kanäle 1 bis 6. Dafür spricht, dass die Verhältnisse der



Signalgrößen der außenliegenden Kanäle zu denen der innenliegenden mit gleicher Gegenkopplung in allen drei Verstärkermodi etwa gleich bleiben.

Als Konsequenz für die Kalibrierung ergibt sich aus obigen Überlegungen, dass die verschiedenen Einkopplungskapazitäten bestimmt werden müssen. Diese werden im Folgenden berechnet, ausgehend von der gemessenen Einkopplungskapazität von 0.81 pF des Kanals 0 von Chip 1. Dabei werden folgende Annahmen gemacht:

- Eventuelle Unterschiede in den Verstärkungsfaktoren zwischen Kanälen mit gleicher Gegenkopplung sind bei gleichem Verstärkermodus gering und statistisch verteilt.
- Alle innenliegenden Kanäle (die jeweiligen Kanäle 1 bis 6) haben die gleichen Einkopplungskapazitäten.

Für die Signalgröße  $S$  gilt

$$S \sim D \cdot \Delta Q = D \cdot \Delta U \cdot C, \quad (2.2)$$

wobei  $D$  der Verstärkungsfaktor,  $\Delta Q$  die eingekoppelte Ladung,  $\Delta U$  die Testpulsamplitude und  $C$  die Einkopplungskapazität ist.

Da die Testpulsamplitude für die hier betrachteten Messwerte stets die gleiche war, gilt für die Kanäle  $i$  und  $j$  bei gleichem Verstärkungsfaktor

$$\frac{S_i}{S_j} = \frac{C_i}{C_j}. \quad (2.3)$$

Über diese Verhältnisgleichung werden zunächst die Einkopplungskapazitäten für die Kanäle mit gleicher Gegenkopplung wie die des Kanals 0 von Chip 1 bestimmt. Beispielsweise ergibt sich für Kanal 0 von Chip 5 im „HighHigh“-Modus

$$C_{5,0} = \frac{S_{5,0}^{HH} * C_{1,0}}{S_{1,0}^{HH}} = \frac{1190.5 * 0.81 \text{ ADC-ch.} * pF}{1715.2 \text{ ADC-ch.}} = 0.56 pF. \quad (2.4)$$

Dabei bezeichnet der jeweils erste untere Index den Chip, der zweite den Kanal und der obere Index „HH“ steht für den Verstärkermodus „HighHigh“.

Die Tabelle 2.4 zeigt die auf diese Weise berechneten Werte der Einkopplungskapazität für die Kanäle 0 bis 3.

		Einkopplungskapazitäten:		
Modus	Kanal	Chip 1 [pF]	Chip 3 [pF]	Chip 5 [pF]
HighHigh	0		0.46	0.56
HighHigh	1	0.48	0.47	0.47
HighHigh	2	0.47	0.44	0.47
HighHigh	3	0.48	0.44	0.47
HighLow	0		0.48	0.55
HighLow	1	0.48	0.47	0.47
HighLow	2	0.47	0.44	0.46
HighLow	3	0.47	0.52	0.46
LowHigh	0		0.51	0.58
LowHigh	1	0.49	0.47	0.48
LowHigh	2	0.45	0.45	0.47
LowHigh	3	0.50	0.45	0.48

*Tabelle 2.4: Berechnete Einkopplungskapazitäten für die Chipkanäle 1 bis 3*

Sowohl für Kanal 0 von Chip 3 als auch für Kanal 0 von Chip 5 wurde nun der Mittelwert aus den drei Werten der verschiedenen Verstärkermodi berechnet.

Für Kanal 0 von Chip 3 erhält man 0.48 pF und für Kanal 0 von Chip 5 0.56 pF.

Für die übrigen Kanäle 1 bis 3 wurde der Mittelwert aus allen Werten für alle drei Chips und alle drei Verstärkermodi gebildet. Dieser ist 0.47 pF und liegt sehr nahe am angegebenen Wert von 0.5 pF.

Um die Einkopplungskapazitäten des jeweiligen Kanal 7 der Chips 1, 3 und 5 zu berechnen, wurden zunächst die Mittelwerte der Signalgrößen der Kanäle 4 bis 6 aller drei Chips in den jeweiligen Verstärkermodi berechnet. Für den „HighHigh“-Modus ergibt sich ein Mittelwert von 459.2 ADC-channel, für den „HighLow“-Modus 76.7 ADC-channel und für den „LowHigh“-Modus 22.6 ADC-channel. Mit Formel 2.4 und einem Wert von 0.47 pF für die Einkopplungskapazität der Kanäle 4 bis 6, wurden dann die Einkopplungskapazitäten der Kanäle 7 berechnet. Die Tabelle 2.5 zeigt das Resultat.

Modus	Chip1 [pF]	Chip3 [pF]	Chip5 [pF]
HighHigh	0.67	0.51	0.53
HighLow	0.68	0.51	0.52
LowHigh	0.69	0.49	0.54

*Tabelle 2.5: Berechnete Einkopplungskapazitäten für die Chipkanäle 7*

Anschließend wurde jeweils der Mittelwert über die drei Werte der verschiedenen Verstärkermodi gebildet, so dass sich insgesamt folgende Einkopplungskapazitäten ergeben:

Kanal	Chip1 [pF]	Chip3 [pF]	Chip5 [pF]
0	0.81	0.48	0.56
1 bis 6	0.47	0.47	0.47
7	0.68	0.50	0.53

Tabelle 2.6: Mittelwerte der berechneten Einkopplungskapazitäten

Diese wurden verwendet um die Kalibrierungsfaktoren zu berechnen. Beispielsweise ergibt sich der Kalibrierungsfaktor für Kanal 0 von Chip 1 im „HighHigh“-Modus zu

$$K_{1,0}^{HH} = \frac{C_{1,0} \cdot \Delta U \cdot e}{S_{1,0}^{HH} \cdot e} = \frac{0.81 \cdot 10^{-12} \cdot 7.94 \cdot 10^{-3}}{1715.2 \cdot 1.602 \cdot 10^{-19}} \frac{F \cdot V \cdot e}{ADC - ch \cdot C} = 23.41 \frac{e}{ADC - ch} \quad (2.5)$$

Die auf diese Weise berechneten Kalibrierungsfaktoren für die acht Kanäle der drei Chips sind in den Tabellen 2.7 bis 2.9 für alle drei Verstärkermodi dargestellt.

Chip1	Kalibrierungsfaktoren [e/ADC-ch.]		
Kanal	HighHigh	HighLow	LowHigh
0	23.41	139.15	1021.53
1	22.80	135.75	970.61
2	23.48	139.82	1063.68
3	23.06	139.16	966.58
4	52.69	313.10	1049.31
5	49.24	290.46	974.67
6	51.25	307.72	1206.98
7	51.46	305.56	1021.30

Tabelle 2.7: Kalibrierungsfaktoren für Chip 1 (ladungintegrierende ADC)

Chip3	Kalibrierungsfaktoren [e/ADC-ch.]		
Kanal	HighHigh	HighLow	LowHigh
0	24.16	138.48	959.28
1	23.62	140.08	1012.81
2	25.11	148.37	1058.85
3	24.92	126.05	1063.68
4	50.59	299.42	1004.08
5	49.08	290.46	1004.08
6	51.81	300.96	1021.69
7	49.63	295.72	1045.63

Tabelle 2.8: Kalibrierungsfaktoren für Chip 3 (ladungintegrierende ADC)

Chip5	Kalibrierungsfaktoren [e/ADC-ch.]		
Kanal	HighHigh	HighLow	LowHigh
0	23.31	142.70	994.81
1	23.19	139.91	995.50
2	23.50	143.26	1012.81
3	23.44	141.52	1008.43
4	51.70	312.68	1035.32
5	49.79	303.71	987.06
6	50.68	315.65	1012.81
7	50.88	310.13	1014.22

*Tabelle 2.9: Kalibrierungsfaktoren für Chip5  
(ladungintegrierende ADC)*

Somit ist eine Umrechnung der Einheiten des ladungsintegrierenden ADC in die Anzahl von Elektronen am Eingang des Vorverstärkers möglich.

Für den Sampling-ADC wurden ebenfalls Kalibrierungsmessungen für den „HighLow“-Modus durchgeführt, da diese Einstellung für die Messungen am Teststrahl verwendet wurde.<sup>4</sup> Die Ergebnisse sind in Tabelle 2.10 dargestellt:

Kanal	Kalibrierungsfaktoren [e/au]		
	Chip 1	Chip 3	Chip 5
0	45.3	79.4	70.2
1	83.9	82.8	81.2
2	80.2	83.8	82.0
3	81.8	82.9	81.5
4	179.6	162.8	177.7
5	160.0	166.0	175.6
6	186.0	161.5	177.7
7	124.5	148.1	157.9

*Tabelle 2.10: Kalibrierungsfaktoren für den Sampling-ADC,  
mit der Annahme die Einkopplungskapazitäten betragen 0.5 pF.*

Diese Kalibrierungsfaktoren wurden ebenfalls mit Formel 2.5 berechnet, jedoch mit

$C = 0.5 \text{ pF}$  als Einkopplungskapazitäten. Deshalb wurden sie mit dem Faktor  $\frac{C_{Chip,Kanal}^{ber.}}{0.5 \text{ pF}}$

korrigiert, wobei  $C_{Chip,Kanal}^{ber.}$  die oben berechneten Einkopplungskapazitäten der jeweiligen Kanäle des entsprechenden Chips sind. Die so korrigierten Kalibrierungsfaktoren sind in Tabelle 2.11 gezeigt.

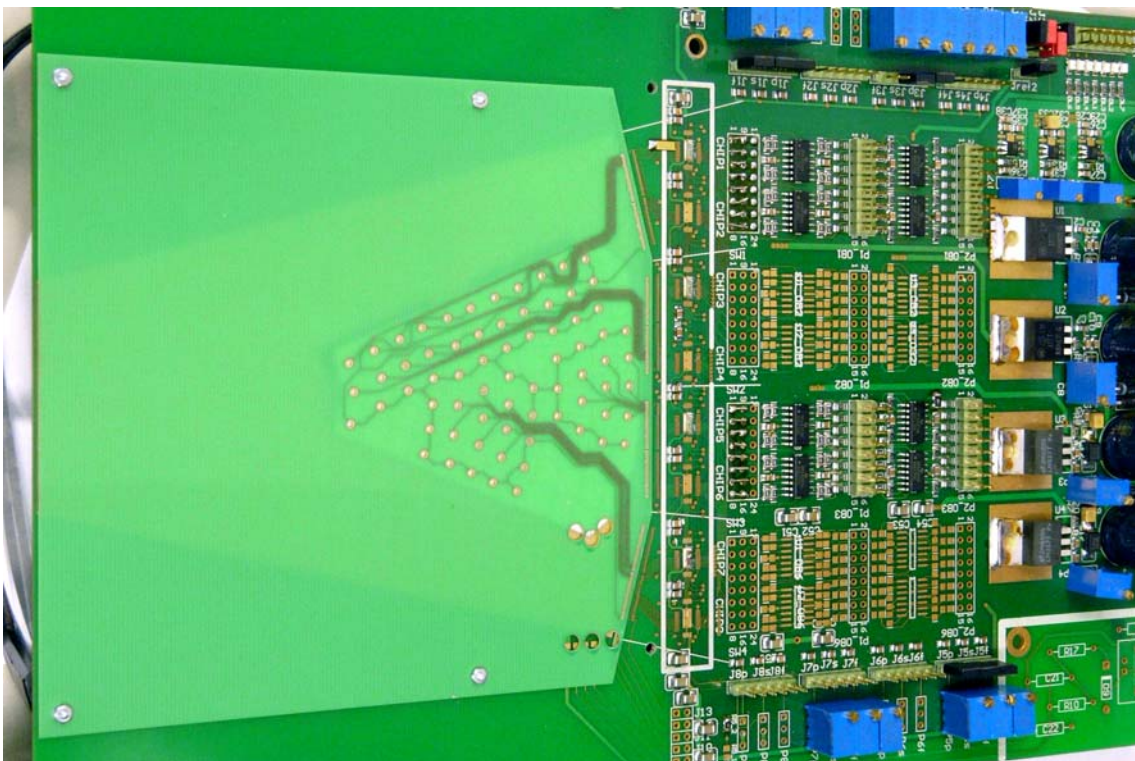
<sup>4</sup> Durchgeführt von M. Chrzaszcz und I. Levy im Rahmen des DESY Sommerstudentenprogramms.

Kanal	Kalibrierungsfaktoren [e/au]		
	Chip 1	Chip 3	Chip 5
0	73.4	76.2	78.6
1	78.9	77.8	76.3
2	75.4	78.8	77.1
3	76.9	77.9	76.6
4	168.8	153.0	167.0
5	150.4	156.0	165.1
6	174.8	151.8	167.0
7	169.3	148.1	167.4

*Tabelle 2.11: Korrigierte Kalibrierungsfaktoren  
Für den Sampling-ADC*

## 2.4 Die fertige Detektorebene

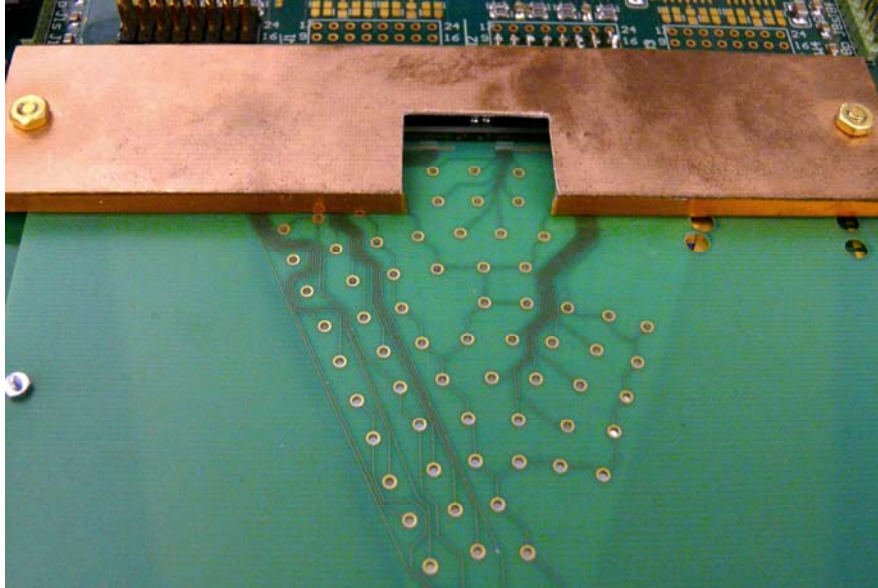
Die Abbildung 2.17 zeigt die fertige Detektorebene.



*Abb. 2.16: komplette Detektorebene*

Gut zu erkennen ist das Fanout mit seinen Leiterbahnen an deren einem Ende sich Löcher befinden. Durch Bonds durch diese Löcher hindurch, sind die Leiterbahnen mit den Pads des unter dem Fanout befindlichen Sensors verbunden. Das andere Ende der

Leiterbahnen des Fanouts ist, ebenfalls durch Bonds, mit Leiterbahnen der Ausleseplatine verbunden, die wiederum zu den Eingangskanälen der Chips führen. Zur besseren Abschirmung der Chips wurden diese noch mit einer Metallabdeckung versehen, wie dies in der Abbildung 2.17 gezeigt wird.



*Abb. 2.17: Metallabdeckung für die Front-End-ASICs*

## 3 Messungen im Teststrahl

### 3.1 Erzeugung des Elektronenstrahls

Die Messungen im Teststrahl wurden am DESY in Hamburg durchgeführt. Das dort betriebene Synchrotron beschleunigt in seinen beiden Ringen DESY II und DESY III Elektronen bzw. Positronen. Diese werden dann in die beiden Speicherringe DORIS III und PETRA III eingespeist, die als Synchrotronstrahlungsquellen für verschiedene Experimente dienen. Zusätzlich wird der DESY-II-Ring genutzt, um Elektronen- oder Positronenstrahlen zu generieren, die in vier Arealen Nutzern die Möglichkeit bieten, ihre Anwendungen im Strahl zu testen. Die Abbildung 3.1 zeigt schematisch, wie diese Strahlen erzeugt werden.

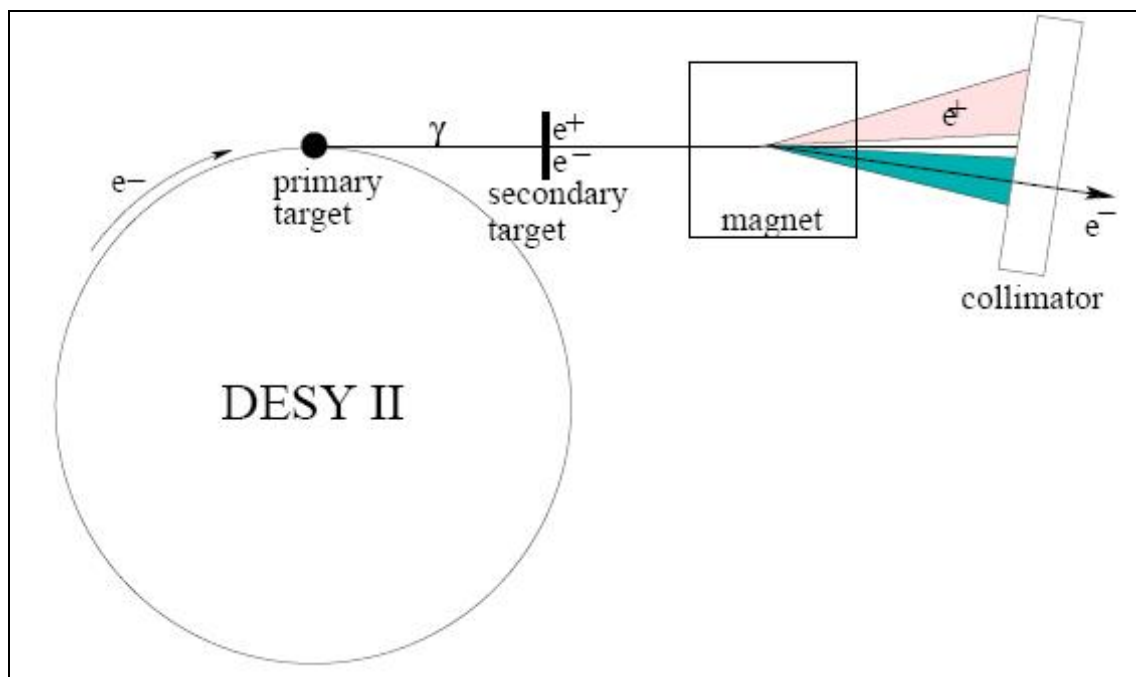


Abb. 3.1: Schematische Darstellung der Erzeugung des Teststrahls /16/.

Zunächst wird durch ein Kohlefasertarget („primary target“) mit einem Durchmesser von  $7 \mu\text{m}$  aus den im DESY-II-Ring zirkulierenden Elektronen Bremsstrahlung erzeugt. Diese trifft dann auf eine Metallplatte („secondary target“) und die Photonen der Bremsstrahlung konvertieren in Elektron-Positron-Paare. Ein Dipolmagnet sorgt einerseits für eine Aufspaltung in einen Elektronen- und einen Positronenstrahl und fächert diese andererseits nach den Impulsen, und somit den Energien, der Teilchen auf. Die aufgefächerten Strahlen treffen dann auf Kollimatoren, die einen Grossteil der Teilchen absorbieren und nur solche passieren lassen, deren Bahnen annähernd parallel

zu den Bohrungen der Kollimatoren verlaufen. Auf diese Weise entstehen Teilchenstrahlen mit einem parallelen Strahlenverlauf und engem Energiebereich. Durch Einstellen der Stärke des Magnetfeldes des Dipolmagneten wird bestimmt, wie stark die Ablenkung der Teilchen ist und somit der Energiebereich des Teilchenstrahls festgelegt. Der verfügbare Bereich liegt zwischen 1 bis 6 GeV /16/.

### 3.2 Teleskop und Trigger

Um die Trajektorien der Teilchen im Strahl zu rekonstruieren, wurde für die Messungen im Teststrahl das so genannte „Zeus MVD Teleskop“ benutzt, welches in Abbildung 3.2 gezeigt ist. Das Teleskop besteht aus drei Modulen. Jedes Modul wiederum besteht aus zwei Silizium-Streifensensoren. Diese sind so angeordnet, dass die Streifen senkrecht zueinander stehen und so eine Ortsmessung in X- und Y-Richtung ermöglichen. Der zu testende Detektor wird zwischen zwei der Module platziert. Szintillatoren vor dem ersten und hinter dem letzten Modul lösen den Trigger aus, wenn alle gleichzeitig einen Teilchendurchgang registrieren. Dann werden die Streifen der Siliziumsensoren des Teleskops und die acht Kanäle des ADC der die Messdaten der Detektorebene digitalisiert ausgelesen. Solange die Siliziumsensoren ausgelesen werden, wird ein „Busy“-Signal an den ADC geschickt, das verhindert, dass dieser getriggert wird, solange das Teleskop nicht für eine weitere Spurmessung bereit ist.

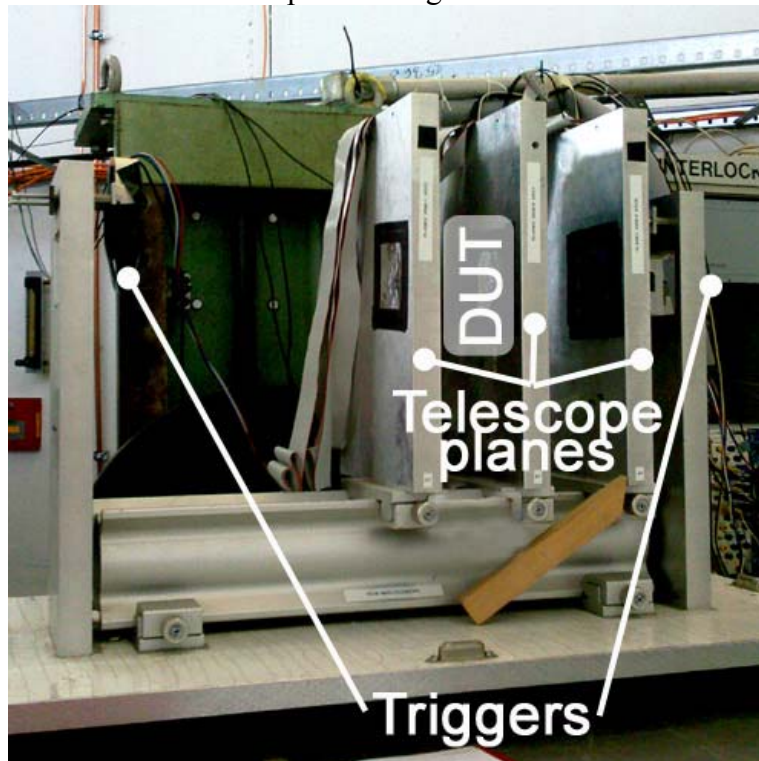


Abb. 3.2: Zeus MVD Telescope



### 3.3 Messprogramm

Im Zuge der Abreisevorbereitungen für die Messungen im Teststrahl waren die Bonds des Fanouts zu den Pads der Regionen 1 und 3 gerissen. Damit standen nur zwei Regionen für den Test zur Verfügung. Für die Messungen im Teststrahl erhielten die Pads neue systematische Bezeichnungen. Die Regionen 2 und 4 heißen nun Cluster 2 und 4. Ihre jeweiligen Pads wurden von 0 bis 7 durchnummeriert. Dies ist in Abbildung 3.3 gezeigt.

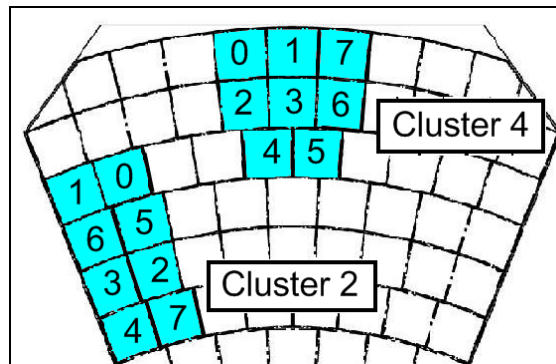


Abb. 3.3: Bezeichnungen der Pads für die Messungen im Teststrahl.

Somit liest sich die neue Bezeichnung etwa „PadX des ClustersY“. In Abbildung 3.4 sind die Zuordnungen der Padnummern zu den Chipkanälen und zu den ADC-Kanälen gezeigt.

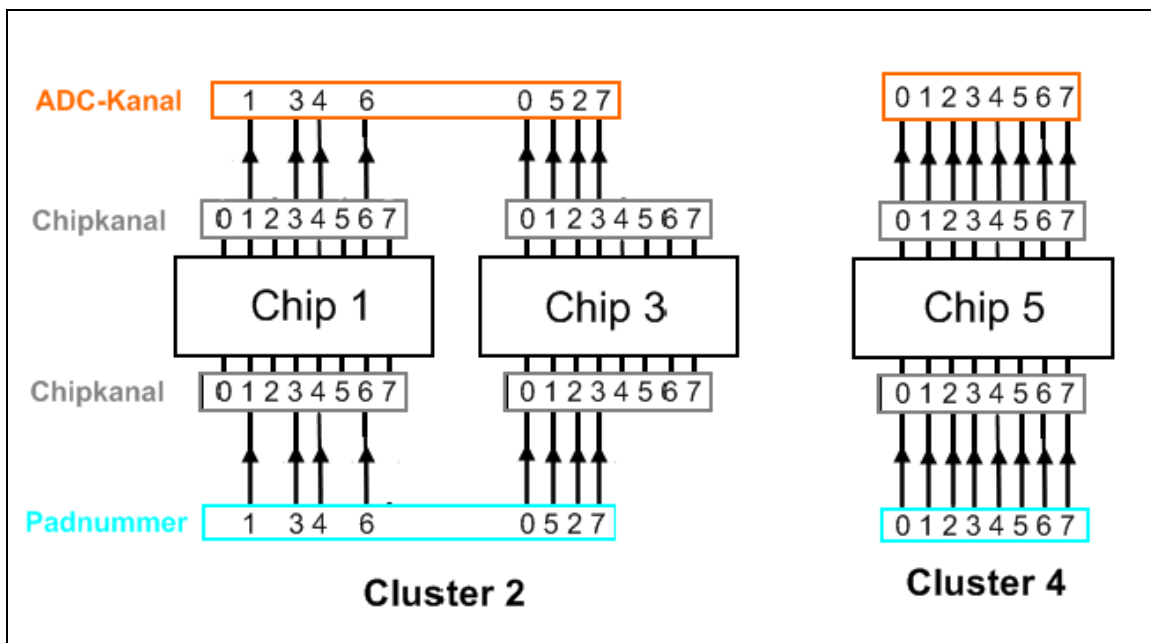


Abb. 3.4: Zuordnungsschema der Padnummern, Chipkanäle und ADC-Kanäle.

Für Cluster 4 sind alle Zuordnungen gleich, während das für Cluster 2 nur für die Zuordnungen der Padnummern zu den ADC-Kanälen zutrifft.

Im Teststrahl wurden folgende Messungen durchgeführt:

- Bestrahlung jedes einzelnen Pads um das Signal-Rausch-Verhältnis und die Ladungssammeleffizienz (Charge Collection Efficiency) zu messen
- Bestrahlung zwischen den einzelnen Pads zur Analyse des „Charge Sharing“

In dieser Arbeit werden die Messdaten der Bestrahlung der einzelnen Pads, ohne Teleskopdaten, in Hinblick auf das Rauschverhalten der Detektorebene analysiert. Die Messdaten wurden im „ROOT“-Format gespeichert. ROOT /17/ ist ein Toolkit, welches die effiziente Speicherung großer Datenmengen und vor allem ihre analytische Auswertung durch eine Vielzahl von Funktionen ermöglicht. Durch Einbinden der entsprechenden Bibliotheken, können die ROOT-Funktionen auch in C++-Programmen verwendet werden. Zur Darstellung und Auswertung der Messdaten wurden Programme („Scripte“) geschrieben und angewendet.

Insgesamt wurden für die Bestrahlung der einzelnen Pads die Messdaten von etwa 200 000 Triggern pro bestrahlten Pad in 4 ROOT-Dateien aufgezeichnet. Dabei enthält jede ROOT-Datei die Messdaten von etwa 50 000 Triggern. Die einzige Ausnahme ist die Bestrahlung von Pad 1 des Cluster 4. Hier wurden in den ersten beiden ROOT-Dateien die Messdaten von etwa 100 000 Triggern und in den anderen beiden etwa 50 000 Triggern, also von insgesamt etwa 300 000 Triggern, aufgezeichnet.

## 3.4 Auswertung der Daten

### 3.4.1 Integrationsmethoden und die daraus erhaltenen Signalgrößenspektren

Die Abbildung 3.5 zeigt ein typisches Signal, wie es vom ADC während des Bestrahlungstests aufgezeichnet wurde.

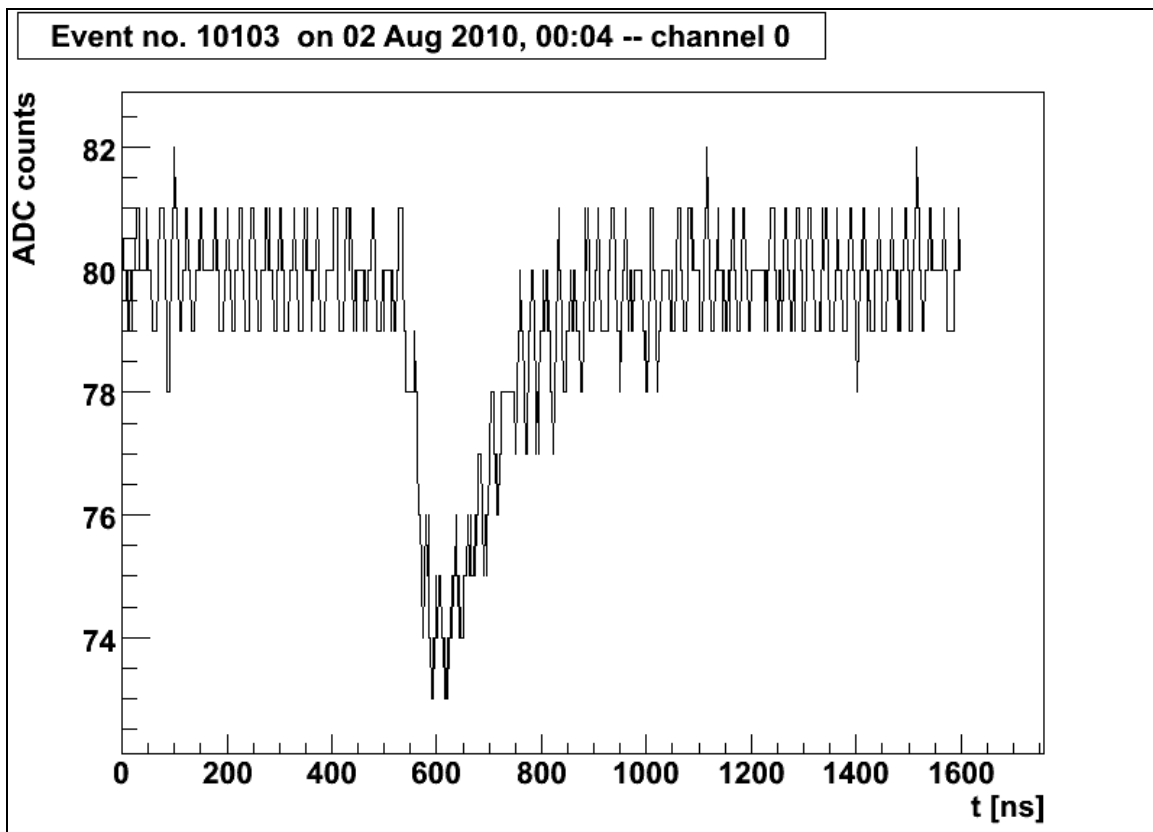


Abb. 3.5: Signalamplitude als Funktion der Zeit, wie sie vom ADC ausgelesen wird.

Um eine ladungsäquivalente Größe des Signals zu erhalten, wird nun das Signal über die Zeit bzw. die Samples integriert. Dabei entsprechen einem Sample zwei Nanosekunden. Zur Integration wurden zwei verschiedene Methoden verwendet, die im Folgenden erläutert werden.

### 3.4.1.1 Methode 1

Bei der ersten Methode werden zwei Zeitfenster für jedes Ereignis definiert. Das erste Fenster sind die ersten 100 Samples (200 ns) des Ereignisses und das zweite Fenster beinhaltet die Samples 200 bis 600 (400 ns bis 1200 ns). Dies ist in der Abbildung 3.6 dargestellt.

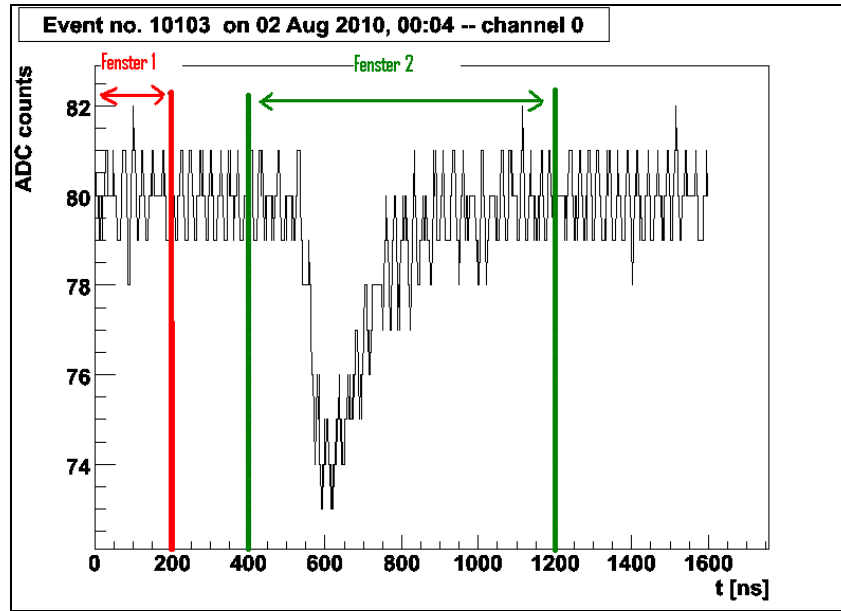


Abb. 3.6: Signalamplitude mit Zeitfenster für Integrationsmethode 1

Das erste Fenster wird nun benutzt, um die Grundlinie für dieses Ereignis zu bestimmen. Dazu wird der Mittelwert der ADC-counts über die 100 Samples gebildet.

Über das zweite Fenster wird nun integriert. Dazu werden die ADC-counts für jedes Sample im Fenster von der Grundlinie abgezogen. Somit erhält man einen positiven ladungsäquivalenten Wert für jedes Signal, wenn dieses negativ ist und einen negativen Wert, wenn das Signal positiv ist. Dies wurde so gewählt, weil die Signale negativ sind.

Die Werte der Integrale von jedem Ereignis einer Messserie werden anschließend in einem zwei-dimensionalen Histogramm aufgetragen, um das Spektrum der Messserie zu erhalten. Dabei entstehen zwei Peaks im Spektrum, einer um Null und ein weiterer um einen positiven Wert. Der positive Peak ist das Signal, der Peak um Null ist das Pedestal. Das Pedestal wird durch die Ereignisse gebildet, in denen zwar ein Trigger ausgelöst wurde, jedoch kein Signal im Integrationsfenster vorhanden war.

Für die Verteilung der Signale erwartet man eine Landauverteilung, welche den Energieverlust von hochenergetischen Teilchen in Materie statistisch gut beschreibt.

Für die Verteilung des Pedestal erwartet man dagegen eine Gaußverteilung, da es das statistische Schwanken der Grundlinie, also das Rauschen, repräsentiert. Nun wirkt sich das Rauschen auch auf die Signale aus. Diesem Sachverhalt wurde Rechnung getragen, indem die Anpassung der Verteilung der Signale durch eine Verteilungsfunktion, die aus einer Faltung einer Landaufunktion mit einer Gaußfunktion besteht, vorgenommen wurde. Die Anpassung der Gesamtverteilung des Spektrums wird also durch eine

Verteilungsfunktion vorgenommen, die aus der Summe einer Gaußfunktion für das Pedestal und einer Faltung aus Landau- und Gaußfunktion für die Signale gebildet wird. Diese Funktion wird im Weiteren als Gauß-Landau-Gauß-Funktion (GLG-Funktion) bezeichnet.

Die Abbildung 3.7 zeigt ein Spektrum für eine Messserie mit etwa 200 000 Ereignissen, wie man es mit oben beschriebener Integrationsmethode erhält.

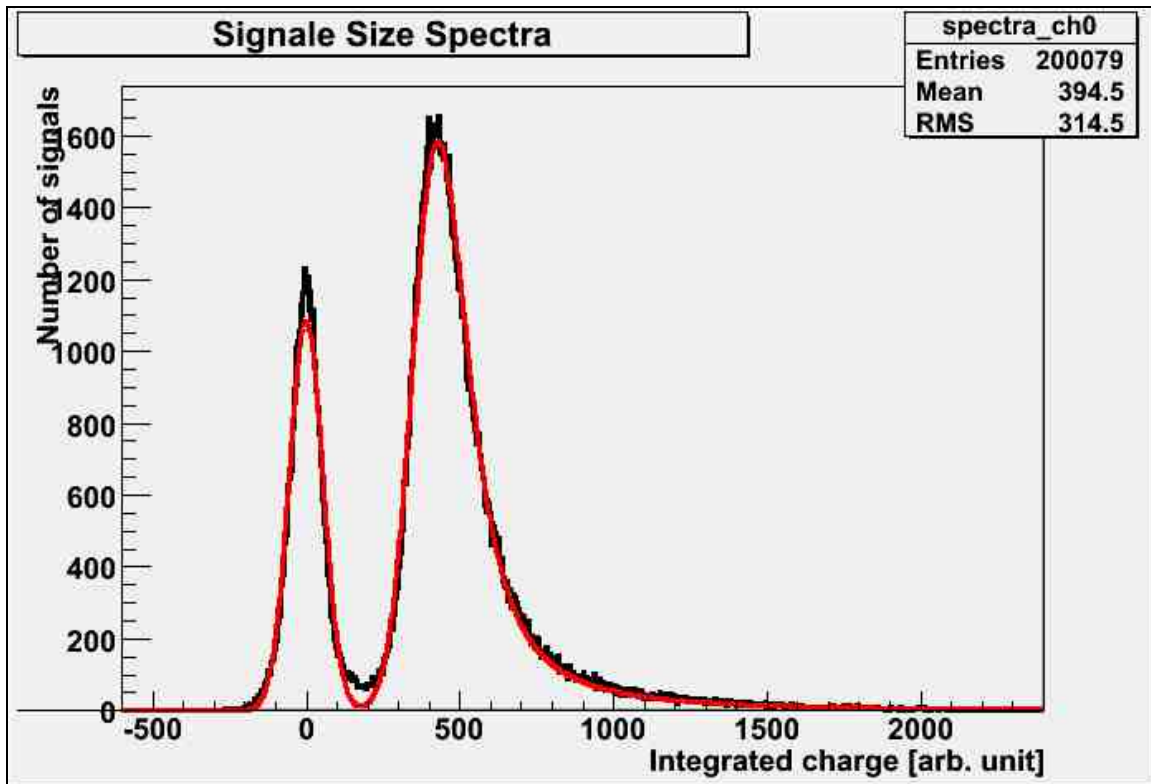


Abb. 3.7: Durch Integrationsmethode 1 erhaltenes Signalgrößenspektrum des „Pads 0 Cluster 4“. An die Messwerte (schwarz) wurde die GLG-Funktion (rot) angepasst.

Die schwarze Kurve ist das tatsächliche Spektrum für diese Messserie. Die Rote Kurve ist die Anpassung durch die GLG-Funktion. Die durchschnittliche Signalgröße der Messserie in [au] erhält man durch abziehen des Erwartungswertes (EW) der Gaußverteilung des Pedestals vom MPV (engl. für Most Probably Value, zu Deutsch: wahrscheinlichste Wert) der Landauverteilung aus der Landau-Gauß-Faltung der Signalverteilung.

### 3.4.1.2 Methode 2

Für die zweite Integrationsmethode werden die Berechnungen drei Fenster in jedem Ereignis benötigt. Diese sind in der Abbildung 3.8 dargestellt.

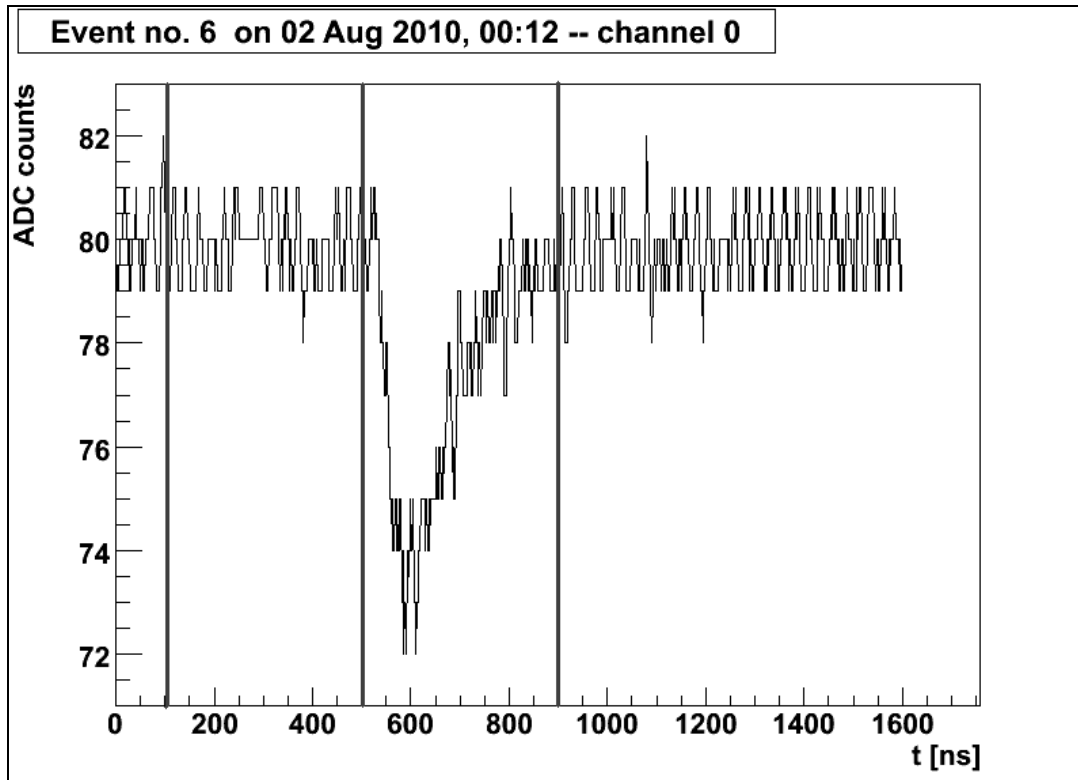


Abb. 3.8: ADC-Spektrum mit Zeitfenster für Integrationsmethode 2

Das erste Fenster umfasst die ersten 50 Samples [100 ns] des Ereignisses, das zweite die Samples 50 bis 250 [100 ns bis 500 ns] und das dritte Fenster die Samples 250 bis 450 [500 ns bis 900 ns]. Im ersten Fenster wird wie in Methode 1 die Grundlinie für dieses Ereignis bestimmt. Hier jedoch als Mittelwert von 50 Samples. Über das zweite und dritte Fenster wird integriert. Dabei werden wieder jeweils die ADC-counts der einzelnen Samples im jeweiligen Fenster von der Grundlinie abgezogen.

Um das Spektrum einer Messserie zu erhalten, werden die Werte der Integrale vom dritten Fenster wieder in einem Histogramm aufgetragen. Zusätzlich werden die Werte der Integrale über das zweite Fenster ebenfalls in einem Histogramm aufgetragen. Das zweite Histogramm ist ein Spektrum der integrierten Grundlinie und dient als Pedestal für die Messserie. Das erste Histogramm wird wieder mit einer GLG-Funktion angepasst, das zweite mit einer Gauß-Funktion. Dies ist in den Abbildungen 3.8 und 3.9 für dieselbe Messserie dargestellt, die auch als Beispiel für Methode 1 diente.

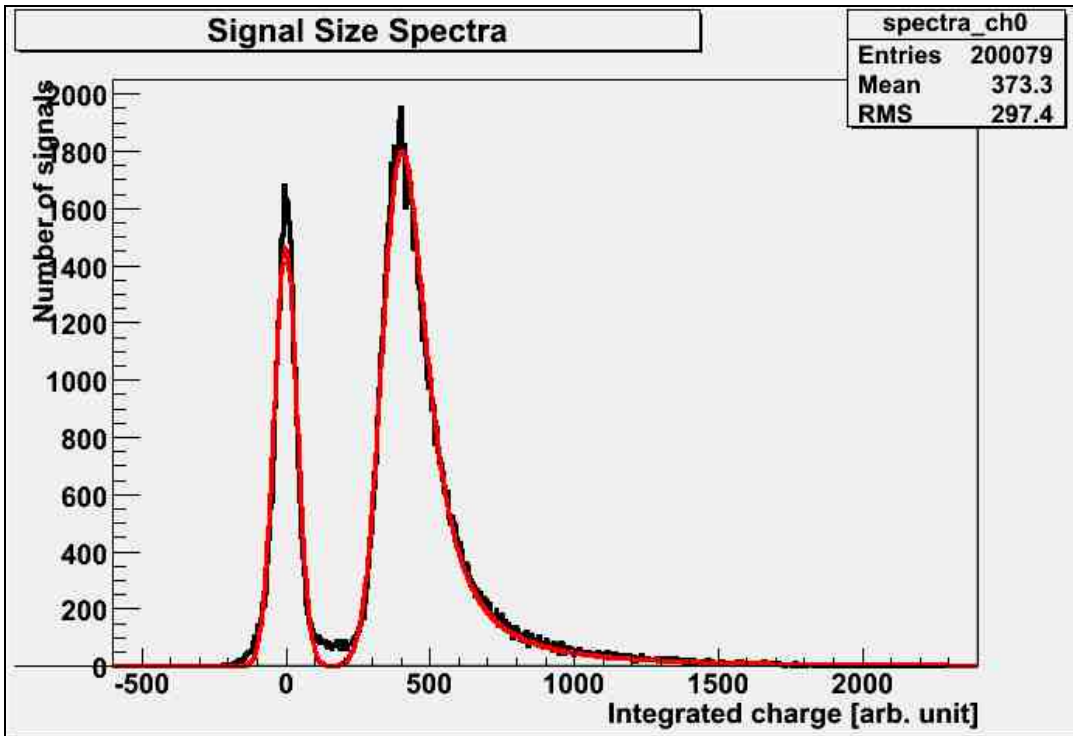


Abb. 3.8: Durch Integrationsmethode 2 erhaltenes Signalgrößenspektrum des „Pads 0 Cluster 4“

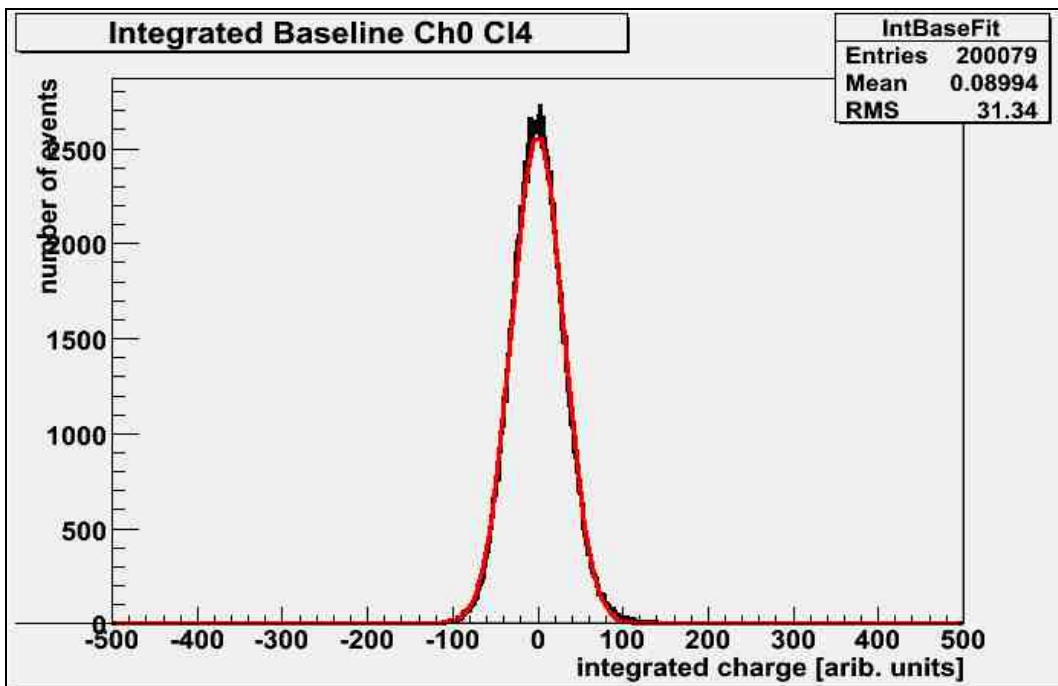


Abb. 3.9: Durch Integrationsmethode 2 erhaltenes Pedestal des „Pads 0 Cluster 4“

Die durchschnittliche Signalgröße der Messreihe wird bei dieser Methode bestimmt, indem der Erwartungswert der Gaußverteilung der integrierten Grundlinie vom MPV der Landauverteilung aus der Landau-Gauß-Faltung der Signalverteilung abgezogen wird.

### 3.4.1.3 Vergleich der beiden Integrationsmethoden

Die Vor- und Nachteile der beiden Methoden sollen im Folgenden diskutiert werden. Dabei sollen durch Methode 1 berechnete Werte den Index „M1“ erhalten und dementsprechend durch Methode 2 berechnete Werte den Index „M2“.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Methoden liegt in der Breite des Integrationsfensters, in denen die Signale der einzelnen Ereignisse liegen. Während man bei Methode 1 sicher sein kann, dass über das ganze Signal integriert wird, besteht bei Methode 2 die Gefahr, dass ein kleiner Teil abgeschnitten wird.

In diesem Unterabschnitt werden die durchschnittlichen Signalgrößen mit beiden Methoden berechnet und analysiert.

Die beiden nachstehenden Tabellen zeigen für Methode 1 die Erwartungswerte der Gaußverteilungen für die jeweiligen Pedestals, die MPVs der Signalpeak und die daraus berechneten durchschnittlichen Signalgrößen.

Cluster 2		Alle Einheiten in au		
Pad	Gegenkoppl.	EW (M1)	MPV (M1)	Signal (M1)
0	aktiv	-7.4	380.3	387.7
1	aktiv	-9.7	388.0	397.7
2	aktiv	-9.0	387.5	396.5
3	aktiv	-10.4	398.8	409.2
4	passiv	-1.7	187.6	189.3
5	aktiv	-13.0	357.5	370.5
6	passiv	-6.5	180.8	187.3
7	aktiv	-2.5	380.1	382.6

*Tabelle 3.1: Durch Integrationsmethode 1 erhaltene Erwartungswerte der Gaußverteilungen, MPVs der Landauverteilungen und daraus berechnete durchschnittliche Signalgrößen für Cluster 2*



Cluster 4		Alle Einheiten in au		
Pad	Gegenkoppl.	EW (M1)	MPV (M1)	Signal (M1)
0	aktiv	-1.2	403.1	404.3
1	aktiv	-10.4	387.1	397.5
2	aktiv	-5.7	385.7	391.4
3	aktiv	-12.5	393.3	405.8
4	passiv	-2.8	188.3	191.1
5	passiv	-4.0	179.1	183.1
6	passiv	-4.1	181.0	185.1
7	passiv	-1.5	184.3	185.8

*Tabelle 3.2: Durch Integrationsmethode 1 erhaltene Erwartungswerte der Gaußverteilungen, MPVs der Landauverteilungen und daraus berechnete durchschnittliche Signalgrößen für Cluster 4*

Zusätzlich wurden in die Tabellen noch die beiden verschiedenen Gegenkopplungsarten der Verstärker der jeweiligen zugehörigen Auslesekanäle eingetragen.

Für die Kanäle mit aktiver Gegenkopplung ist der kleinste Wert der durchschnittlichen Signalgröße 370.5 au (Pad 5 des Clusters 2) und der größte 409.2 au (Pad 3 des Clusters 2). Der Mittelwert beträgt 394.3 au.

Für die Kanäle mit passiver Gegenkopplung ist der kleinste Wert 183.1 au (Pad 5 des Clusters 4) und der größte 191.1 au (Pad 4 des Clusters 4). Der Mittelwert beträgt 187.0 au.

Somit sind die durchschnittlichen Signalgrößen bei Kanälen mit aktiver Gegenkopplung im Mittel mehr als doppelt so groß gegenüber denen mit passiver Gegenkopplung. Dies bestätigt noch einmal, dass die Verstärkungsfaktoren für die beiden Gegenkopplungsarten im „HighLow“-Modus verschieden sind, wie dies bereits bei den Messungen mit Testpulsen beobachtet werden konnte.

Die beiden Tabellen 3.3 und 3.4 zeigen die Erwartungswerte der Gaußverteilungen für die jeweiligen Pedestals, die MPVs der Signalpeaks und die daraus berechneten durchschnittlichen Signalgrößen für Methode 2.

Cluster 2		Alle Einheiten in au		
Pad	Gegenkoppl.	EW (M2)	MPV (M2)	Signal (M2)
0	aktiv	0.3	374	373.7
1	aktiv	-1.8	359.9	361.7
2	aktiv	0.8	383.7	382.9
3	aktiv	-0.1	386.3	386.4
4	passiv	0.3	184.4	184.1
5	aktiv	1.0	392.7	391.7
6	passiv	-0.3	173.1	173.4
7	aktiv	1.2	376.9	375.7

*Tabelle 3.3: Durch Integrationsmethode 2 erhaltene Erwartungswerte der Gaußverteilungen, MPVs der Landauverteilungen und daraus berechnete durchschnittliche Signalgrößen für Cluster 2*

Cluster 4		Alle Einheiten in au		
Pad	Gegenkoppl.	EW (M2)	MPV (M2)	Signal (M2)
0	aktiv	-0.2	382.5	382.7
1	aktiv	-0.7	371.4	372.1
2	aktiv	-0.7	372	372.7
3	aktiv	-0.4	386.2	386.6
4	passiv	-0.1	182.8	182.9
5	passiv	0.0	174.3	174.3
6	passiv	-0.1	175.1	175.2
7	passiv	0.2	177.7	177.5

*Tabelle 3.4: Durch Integrationsmethode 2 erhaltene Erwartungswerte der Gaußverteilungen, MPVs der Landauverteilungen und daraus berechnete durchschnittliche Signalgrößen für Cluster 4*

Hier beträgt der kleinste Wert der durchschnittlichen Signalgröße für Kanäle mit aktiver Gegenkopplung 361.7 au (Pad 1 des Clusters 2) und der größte 391.7 au (Pad 5 des Clusters 2). Der Mittelwert beträgt 378.6 au.

Für die Kanäle mit passiver Gegenkopplung ist der kleinste Wert 173.4 au (Pad 6 des Clusters 2) und der größte 184.1 au (Pad 4 des Clusters 2). Der Mittelwert beträgt 177.9 au.

Wie für Methode 1 sind auch hier die durchschnittlichen Signalgrößen für aktiv gegengekoppelte Kanäle im Mittel mehr als doppelt so groß gegenüber den passiv gegengekoppelten.

Der Mittelwert über die durchschnittlichen Signalgrößen für aktiv gegengekoppelte Kanäle ist für Methode 2 um etwa 4 % kleiner als für Methode 1 und für RC-gegengekoppelte Kanäle um etwa 5 %.

Somit ist der Unterschied in der durchschnittlichen Signalgröße zwischen beiden Methoden sehr gering.

Der Vorteil der Methode 2 besteht darin, ein Pedestal unabhängig vom Integrationsfenster für die Signale zu erhalten. Da das Pedestal das Rauschverhalten des Detektors charakterisiert, sollte es von anderen Effekten, wie zum Beispiel Übersprechen, unbeeinflusst bleiben. Dass aber im Integrationsfenster für die Signale noch weitere Effekte eine Rolle spielen, wird weiter unten gezeigt. Eine Auswirkung dieser Effekte ist bereits an dieser Stelle erkennbar. Die Erwartungswerte der Gaußverteilungen für Methode 1 sind alle negativ und betragsmäßig deutlich größer, als die für Methode 2. Dies deutet stark auf einen systematischen Effekt hin. Daraus resultiert, dass Methode 2 zu bevorzugen ist. Im Weiteren wird, falls nicht explizit anders erwähnt, stets Methode 2 zur Integration verwendet. Da für einige Analysen der Messdaten das Pedestal aus dem Signalintegrationsfenster von Methode 2 und das Pedestal aus den integrierten Grundlinien miteinander verglichen werden, soll an dieser Stelle eine Kurzschreibweise für beide eingeführt werden. Dabei erhält das Pedestal aus dem Signalgrößenspektrum die Bezeichnung „S-Pedestal“ und das Pedestal aus den integrierten Grundlinien die Bezeichnung „IG-Pedestal“.

### 3.4.1.4 Analyse der Signalgrößenspektren

Betrachtet wird die Messserie der Bestrahlung von Pad 0 des Clusters 4. Die Abbildung 3.10 zeigt die jeweiligen Signalgrößenspektren von Pad 0 und der angrenzenden Pads 1, 2 und 3. Dabei wurde für die jeweilige Y-Achse der Histogramme für die Pads 1,2 und 3 eine logarithmische Skala gewählt.

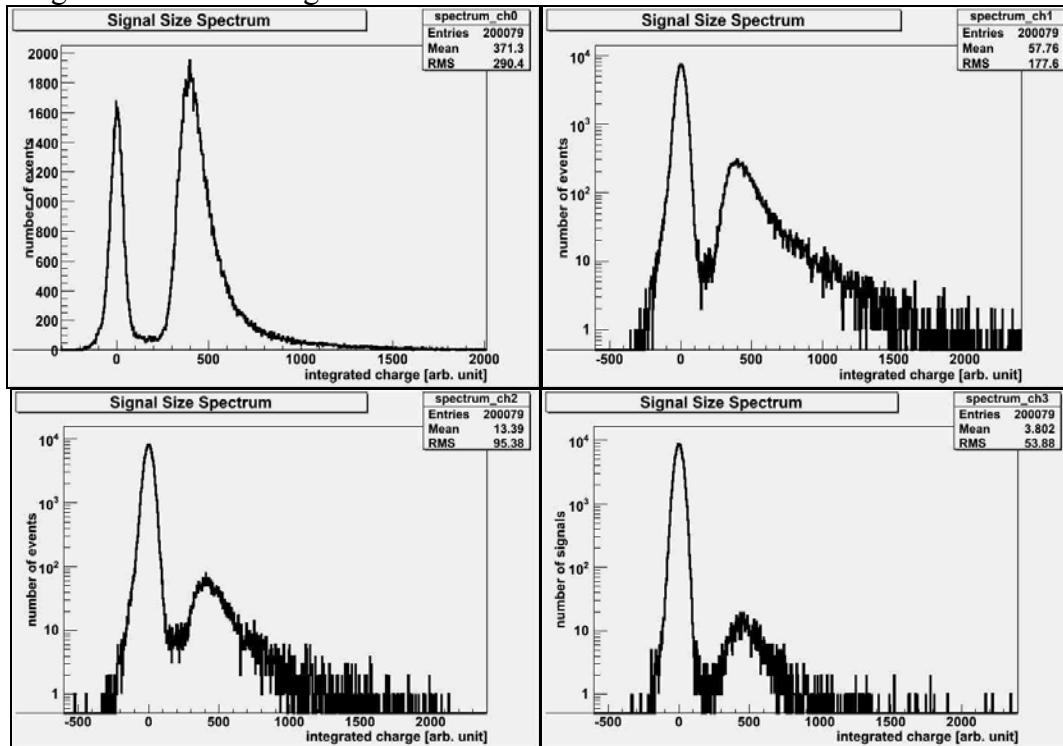


Abb. 3.10: Signalgrößenspektren des Pad 0 Cluster 4 (links oben), Pad 1 Cluster 4 (rechts oben), Pad 2 Cluster 4 (links unten) und Pad 3 Cluster 4 (rechts unten) bei Bestrahlung des Pad 0 Cluster 4.

Wie aus den Histogrammen ersichtlich, sind in den benachbarten Pads von Pad 0 ebenfalls Signale zu sehen, wenn auch mit einer viel geringeren Häufigkeit. Dies bedeutet, dass der Durchmesser des Strahls größer als der Durchmesser des bestrahlten Pads war. Wenn aber in den benachbarten Pads ebenfalls Signale erzeugt werden, besteht auch die Möglichkeit, dass diese in den Auslesekanal von Pad 0 übersprechen.

Die Abbildungen 3.11 und 3.12 zeigen die Histogramme der beiden verschiedenen Pedestale und ihre jeweiligen Anpassungen für die Messserie der Bestrahlung von Pad 0 des Clusters 4. Bei der Abbildung 3.11 handelt sich um einen Ausschnitt des Spektrums, in dem das S-Pedestal liegt.

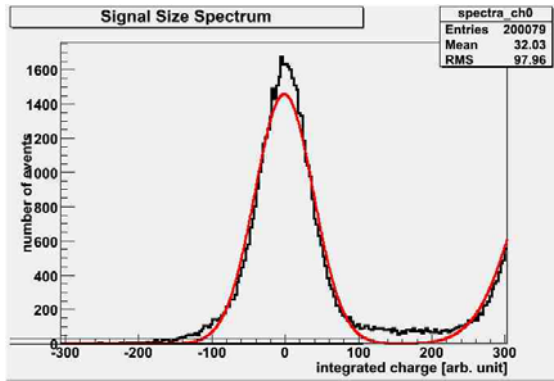


Abb. 3.11: S-Pedestal des Pads 0  
Cluster 4

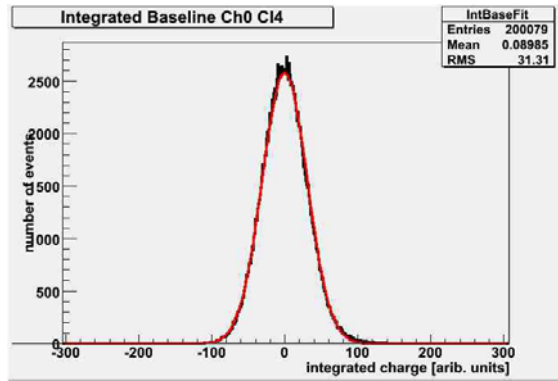


Abb. 3.12: IG-Pedestal des Pads 0  
Cluster 4

Ein Vergleich der beiden Pedestale zeigt einige Unterschiede. Während das IG-Pedestal eine nahezu perfekte Gaußverteilung darstellt, weicht das S-Pedestal davon ab. Des Weiteren ist das IG-Pedestal schmäler als das S-Pedestal. So lassen sich im Histogramm für das S-Pedestal einige Werte deutlich kleiner als -100 au finden, im Histogramm des IG-Pedestal dagegen nicht. Auffällig im Signalgrößenspektrum ist außerdem, dass es im positiven Bereich der X-Achse eine Verteilung zwischen der Gauß-Verteilung des Pedestal und der Landau-Gauß-Verteilung der Signale gibt. Um die Abweichungen des S-Pedestal von der Gauß-Verteilung zu untersuchen, wurden einzelne Ereignisse der Messserie untersucht, deren Integrale über das Signalfenster für Pad 0 Werte kleiner als -100 au ergaben, bzw. deren Werte zwischen +100 au und +200 au lagen.

Die Abbildungen 3.13 und 3.14 zeigen ein Ereignis dessen Integral für Pad 0 kleiner als -100 au war.

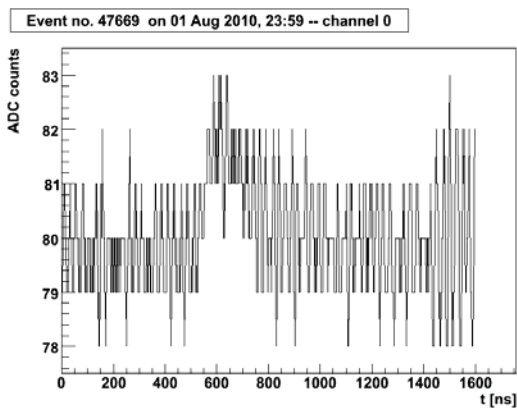


Abb. 3.13

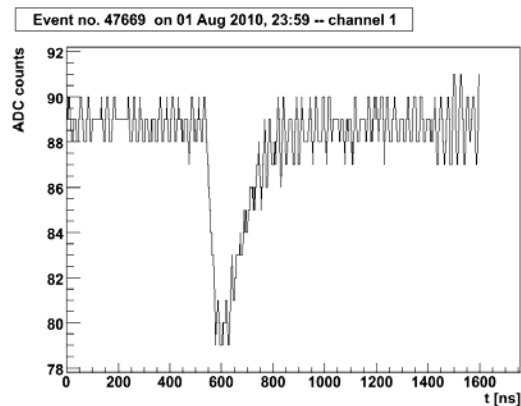


Abb. 3.14

Die Abbildung 3.13 zeigt die Aufzeichnung dieses Ereignisses durch den ADC-Kanal 0, welcher Pad 0 ausliest. Während die Abbildung 3.14 die Aufzeichnung desselben Ereignisses durch den ADC-Kanal 1, welcher Pad 1 ausliest, zeigt. In Kanal 1 ist ein typisches negatives Signal zu sehen, wie es für einen Teilchendurchgang zu erwarten ist. Dagegen ist in Kanal 0 ein positives Signal mit deutlich geringerer Amplitude zu sehen. Dieses kann nicht durch einen Teilchendurchgang erzeugt worden sein, da die Amplitude negativ wäre. Die positive Amplitude lässt nur den Schluss zu, dass es sich entweder um Übersprechen handelt oder aber um ein ungewöhnliches Rauschsignal. Da die Amplitude

aber genau im Signalfenster liegt und Kanal 1 ein Teilchendurchgang registriert hat, ist davon auszugehen, dass es sich um Übersprechen handelt.

Betrachten wir nun ein Ereignis derselben Messserie dessen Integral über das Signalfenster für Pad 0 einen Wert zwischen 100 au und 200 au ergab.

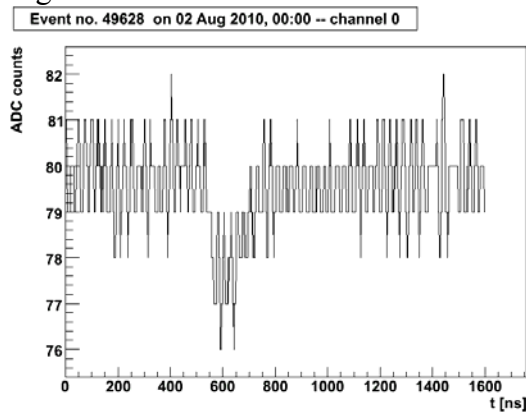


Abb.3.15

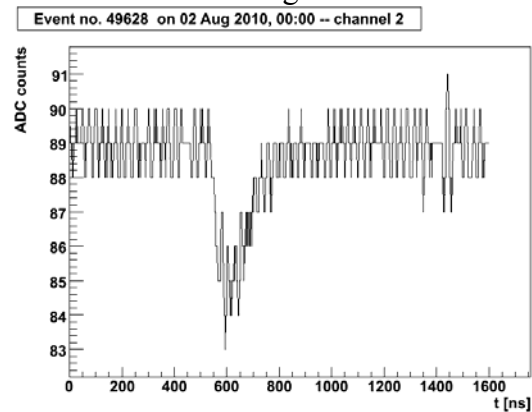


Abb. 3.16

Die Abbildung 3.15 zeigt ein kleines negatives Signal in Kanal 0. Für dasselbe Ereignis ist in Kanal 2 ebenfalls ein negatives Signal zu sehen, wie die Abbildung 3.16 zeigt. Beide Signale liegen im Integrationsfenster für Signale. Hierfür kommen mehrere Erklärungen in Frage. Da Übersprechen sowohl positiv wie auch negativ sein kann, kann es sich auch hierbei um Übersprechen handeln. Es könnte sich aber auch um ein Ereignis handeln, in dem tatsächlich zwei Teilchendurchgänge registriert wurden. Dann hätte allerdings das in Pad 0 registrierte Teilchen weit weniger Energie im Detektormaterial deponiert, als der Durchschnitt der Teilchen des Teilchenstrahls. Denn mit einem integralen Wert von kleiner als 200 au, liegt es deutlich unter den durchschnittlichen Signalgrößen von etwa 400 au für dieses Pad.

Eine wahrscheinlichere Erklärung wäre das so genannte „Charge Sharing“. Dabei erfolgt der Teilchendurchgang zwischen zwei benachbarten Pads und erzeugt dadurch Ladungsträger in beiden. Die Folge ist ein gleichzeitiges Signal in beiden Pads. Die Summe der registrierten Ladungen in beiden Pads, entspricht dann der Gesamtladung, die das Teilchen im Sensormaterial erzeugt hat. Damit würde Charge Sharing eine gute Erklärung für die Verteilung zwischen Pedestal und der Landau-Gauß-Verteilung im Signalgrößenspektrum liefern.

Ob es sich tatsächlich um Charge Sharing handelt, kann nur in Kombination mit den Teleskopdaten und den daraus zu gewinnenden Teilchenbahnrekonstruktion entschieden werden. Dies ist aber nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

Die Abbildung 3.17 zeigt ein weiteres Ereignis der Messserie, in dem der Wert des Integrals für Pad 0 zwischen 100 und 200 au lag.

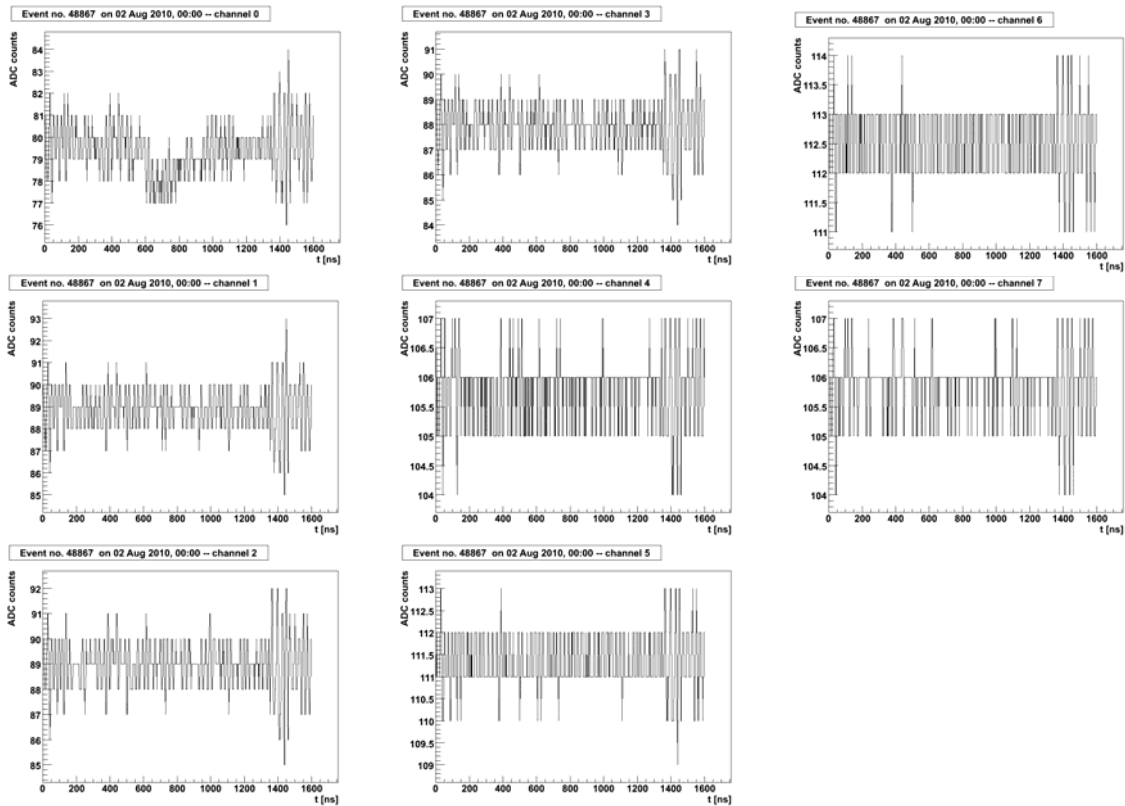


Abb. 3.17: ADC-Spektren aller acht Kanäle für dasselbe Ereignis.

Dargestellt sind die Aufzeichnungen desselben Ereignisses in allen acht ADC-Kanälen. Im Signalfenster des Kanal 0 ist ein negatives Signal mit kleiner Amplitude zu sehen, während in den Signalfenstern der übrigen sieben Kanäle keine Signale zu erkennen sind. Hierbei könnte es sich um den Durchgang eines Teilchens mit geringem Energieverlust im Detektormaterial handeln oder um Charge Sharing mit einem Nachbarpad, welches nicht ausgelesen wurde.

Während die kontinuierliche Verteilung zwischen S-Pedestal und Landau-Gauß-Verteilung verschiedene Ursachen haben kann, scheint der Grund für die Abweichung des S-Pedestal von einer Gauß-Verteilung für negative Werte recht klar. Dass es sich dabei tatsächlich um Übersprechen handelt, sollen folgende Analysen untermauern.

Die Abbildung 3.18 zeigt das Signalgrößenspektrum für die zuvor betrachtete Messserie für Pad 0 des Clusters 4, wenn nur Ereignisse in das Histogramm eingetragen werden, in denen die Signalgröße in einen der drei benachbarten Pads mehr als 300 au betrug. Die Abbildung 3.18 zeigt also das Signalgrößenspektrum für Pad 0 für die Ereignisse, in denen ein Signal in mindestens einem der Nachbarpads registriert wurde. Die rote Kurve ist die Gaußanpassung für das S-Pedestal dieser Ereignisse.

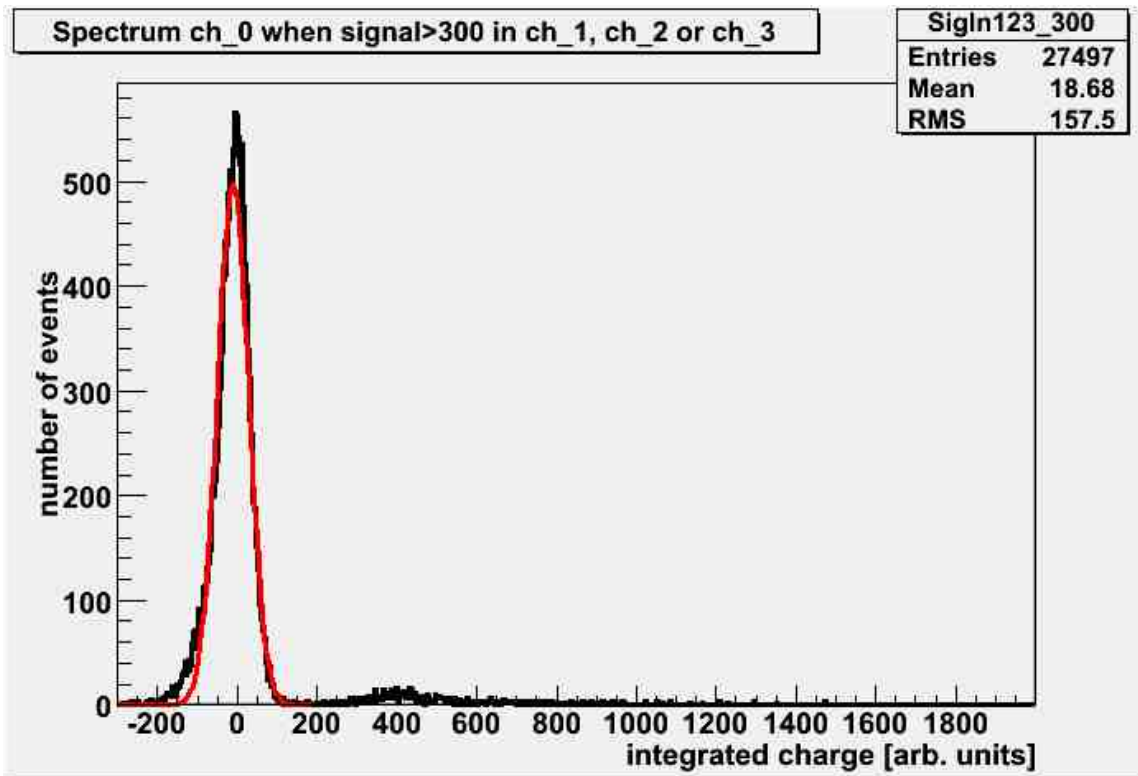


Abb. 3.18: Signalgrößenspektrum des Pads 0 Cluster 4 für Ereignisse, in denen ein Signal in mindestens einen der Nachbarpads (Pads 1,2 und 3) registriert wurde.

Wie deutlich zu sehen ist, weicht das S-Pedestal für negative Werte von der Gaußanpassung ab.

Die Abbildung 3.19 zeigt das Signalgrößenspektrum für Pad 0 der Messserie, wenn nur Ereignisse in das Histogramm eingetragen werden, in denen keine der Signalgrößen in den Nachbarpads 300 au überschritten. Es wird also das Signalgrößenspektrum für Pad 0 für solche Ereignisse gezeigt, in denen kein Signal in einem der Nachbarpads registriert wurde. Die rote Kurve ist wieder die Gaußanpassung des S-Pedestal für diese Ereignisse.

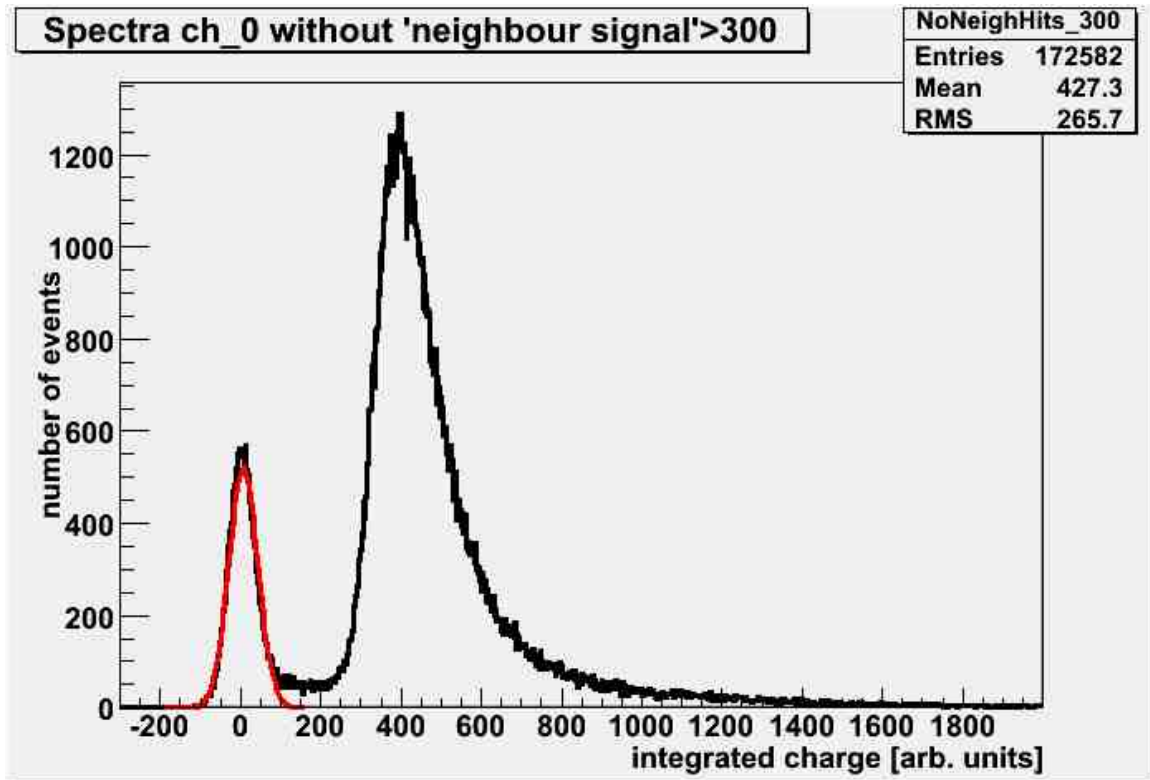


Abb. 3.19: Signalgrößenspektrum des Pads 0 Cluster 4 für Ereignisse, in denen kein Signal in einem der Nachbarpads (Pads 1,2 und 3) registriert wurde.

Hier werden die negativen Werte des S-Pedestal sehr gut durch eine Gaußverteilung angepasst. Des Weiteren gibt es deutlich weniger Werte, die kleiner als -100 au sind. Wählt man für das Signalgrößenspektrum also nur Ereignisse in denen keine Signale in den benachbarten Pads registriert wurden, verschwinden die sonst auftretenden Werte kleiner als -100 au fast völlig aus dem Signalgrößenspektrum. Dies ist ein eindeutiger Hinweis darauf, dass diese Werte durch Übersprechen verursacht werden.

Die Verteilung zwischen S-Pedestal und Landau-Gauß-Verteilung zeigt ein genau entgegengesetztes Verhalten. Sie verschwindet fast völlig, wenn das Signalgrößenspektrum nur aus Ereignissen besteht, in denen ein großes Signal in einem der Nachbarpads registriert wurde (Abbildung 3.18). Dies ist ein Indiz dafür, dass es sich hierbei tatsächlich um Charge Sharing handelt. In jedem Fall, kann es sich bei dem Großteil der Ereignisse, die diese Verteilung verursachen, nicht um Übersprechen handeln.

Insgesamt folgt aus den obigen Betrachtungen, dass es Ereignisse in der Messserie gibt, in denen Übersprechen zu beobachten ist. Dabei ist die Amplitude des durch Übersprechen erzeugten Signals stark gedämpft gegenüber der Amplitude eines Signals, das durch einen Teilchendurchgang erzeugt wurde und hat außerdem ein umgekehrtes Vorzeichen. Hierbei ist die Dämpfung so stark, dass die Verteilung der integrierten Werte für diese Signale sich mit dem S-Pedestal überschneidet, und dieses somit effektiv verbreitert.



### 3.4.2 Rauschverhalten der Detektorebene

Im Weiteren soll zunächst das allgemeine Rauschverhalten des Detektorsystems anhand der Teststrahlmessdaten analysiert werden. Im Anschluss wird das Detektorsystem näher auf korreliertes Rauschen untersucht.

#### 3.4.2.1 Signal-Rausch-Verhältnisse

Das Signal-Rausch-Verhältnis (engl.:Signal-to-Noise-Ratio oder kurz „S/N“) ist eine dimensionslose Zahl, die angibt, wie gut ein Nutzsignal von dem ihm überlagerten Rauschen zu unterscheiden ist. Dabei gilt, je größer diese Zahl ist, desto besser ist das Signal vom Rauschen zu unterscheiden. Somit sind die Signal-Rauschverhältnisse ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Detektorebene.

Zur Berechnung des Signal-Rausch-Verhältnisses aus dem erhaltenen Signalgrößenspektrum einer Messserie und dem zugehörigen IG-Pedestals, wird folgende Definition zu Grunde gelegt:

$$"S / N" \stackrel{\text{def.}}{=} \frac{\text{Signal}}{\sigma_{\text{Pedestal}}}. \quad (3.1)$$

Dabei ist „Signal“ die durchschnittliche Signalgröße und  $\sigma_{\text{Pedestal}}$  die Standardabweichung der Gaußanpassung des IG-Pedestals. In dieser Definition wird also die Standardabweichung des IG-Pedestals als Maß für das Rauschen verwendet. Im Intervall von  $\pm 3\sigma_{\text{Pedestal}}$  liegen 99.73% aller Werte des Pedestals. Somit sind bereits bei einem Signal-Rausch-Verhältnis von mehr als drei, durchschnittliche Signalgrößen gut vom Rauschen zu unterscheiden.

Die Tabellen 3.5 und 3.6 zeigen noch einmal die in Unterabschnitt 3.4.1.3 berechneten Werte der durchschnittlichen Signalgrößen der einzelnen Messserien, zusammen mit den Standardabweichungen der Gaußanpassungen der zugehörigen IG-Pedestals und den nach Formel 3.1 berechneten Signal-Rausch-Verhältnissen.

Cluster2				
Pad	Gegenkoppl.	Signal (M2) [au]	Sigma (M2) [au]	S/N
0	aktiv	373.7	35.7	10.5
1	aktiv	361.7	32.4	11.2
2	aktiv	382.9	33.6	11.4
3	aktiv	386.4	34.6	11.2
4	passiv	184.1	15.7	11.7
5	aktiv	391.7	33.6	11.7
6	passiv	173.4	23.2	7.5
7	aktiv	375.7	31.7	11.9

Tabelle 3.5: Signal-Rausch-Verhältnis Cluster 2

Cluster 4				
Pad	Gegenkoppl.	Signal (M2) [au]	Sigma (M2) [au]	S/N
0	aktiv	382.7	30.7	12.5
1	aktiv	372.1	27.9	13.3
2	aktiv	372.7	27.0	13.8
3	aktiv	386.6	25.5	15.2
4	passiv	182.9	16.0	11.4
5	passiv	174.3	16.6	10.5
6	passiv	175.2	18.2	9.6
7	passiv	177.5	17.8	10.0

Tabelle 3.6: Signal-Rausch-Verhältnis Cluster 4

Für Cluster 2 liegen die Werte der Signal-Rausch-Verhältnisse zwischen 7.5 für Pad 6 und 11.9 für Pad 7. Dabei ist der Wert für Pad 6 deutlich niedriger als die Werte für die übrigen Pads dieses Clusters, welche alle Signal-Rausch-Verhältnisse größer als zehn aufweisen. Die Abbildungen 3.20 und 3.21 zeigen das Signalgrößenspektrum für die Messserie bei Bestrahlung von Pad 6 des Clusters 2 bzw. das Histogramm des zugehörigen IG-Pedestals mit ihren jeweiligen Anpassungen. Zum Vergleich zeigen die Abbildungen 3.22 und 3.23 das Signalgrößenspektrum und das Histogramm des IG-Pedestals für die Bestrahlung von Pad 4. Beide Pads werden durch Kanäle des Chips mit gleicher Gegenkopplung ausgelesen.

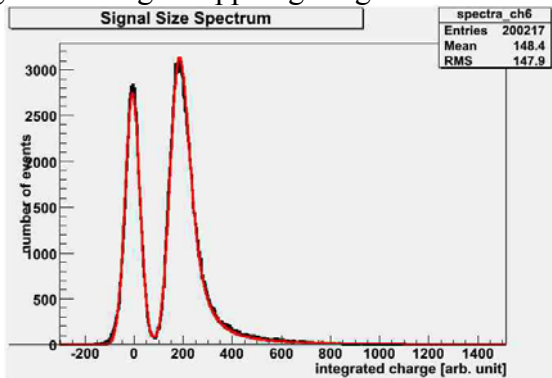


Abb. 3.20: Signalgrößenspektrum des Pads 6 Cluster 2

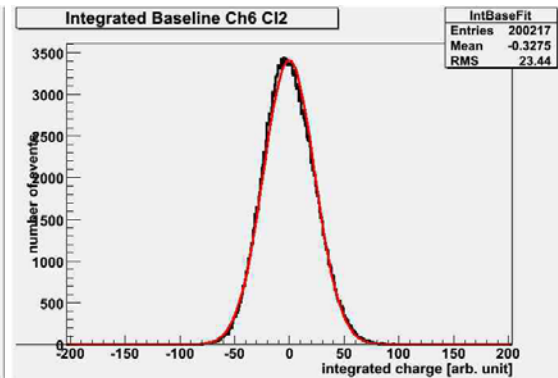


Abb. 3.21: Pedestal des Pads 6 Cluster 2

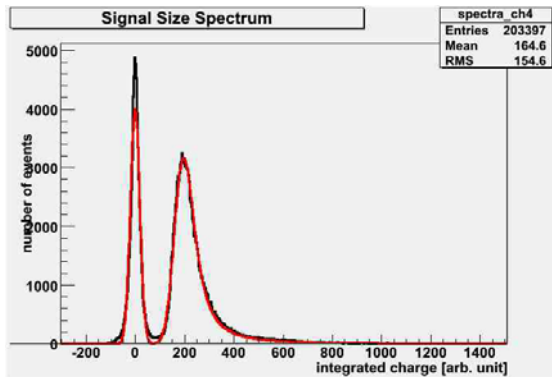


Abb. 3.22: Signalgrößenspektrum des Pads 4 Cluster 2

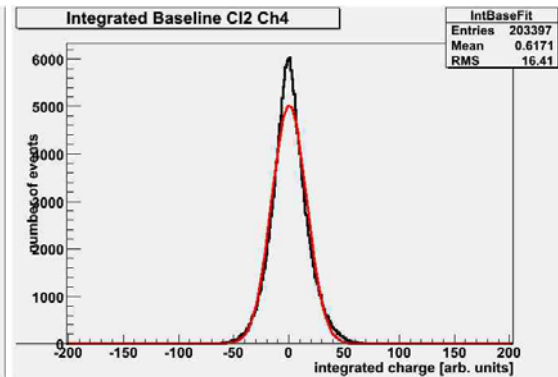


Abb. 3.23: Pedestal des Pads 4 Cluster 2

Ein Vergleich der beiden Histogramme der IG-Pedestal zeigt, dass das IG-Pedestal für Pad 6 deutlich breiter ist, was für ein stärkeres Rauschen spricht. Dennoch ist eine klare Trennung der Landau-Gauß-Verteilung der Signalgrößen vom S-Pedestal im Signalgrößenspektrum der Messserie der Bestrahlung von Pad 6 des Clusters 2 möglich. Dies ist aber gerade die Messserie mit dem kleinsten Signal-Rausch-Verhältnis. Somit zeigt die Detektorebene insgesamt ein sehr gutes Signal-Rausch-Verhalten.

Für Cluster 4 liegen die Werte der Signal-Rausch-Verhältnisse zwischen 9.6 für Pad 6 und 15.2 für Pad 3. Insgesamt ist für dieses Cluster ein Unterschied zwischen den beiden Gegenkopplungsarten in den Signal-Rausch-Verhältnissen erkennbar. Die Signal-Rausch-Verhältnisse der Pads, die durch aktiv gegengekoppelten Kanäle ausgelesen werden, liegen zwischen 12.5 und 15.2. Der Mittelwert ist 13.7. Die der Pads, die durch passiv gegengekoppelte Kanäle ausgelesen werden, sind mit Werten zwischen 9.6 und 11.4 und einem Mittelwert von 10.4 kleinerer. Somit zeigen die aktiv gegengekoppelten Kanäle des Chips 5, welcher Cluster 4 ausliest, nicht nur bessere Signal-Rausch-Verhältnisse gegenüber den passiv gegengekoppelten Kanälen desselben Chips, sondern auch generell ein besseres Signal-Rausch-Verhalten gegenüber den Chips 1 und 3 die Cluster 2 auslesen.

Die Abbildung 3.24 zeigt das IG-Pedestal mit Gaußanpassung für Pad 1 des Clusters 4 bei Bestrahlung desselben. Zum Vergleich zeigt die Abbildung 3.25 das IG-Pedestal für die Bestrahlung von Pad 1 des Clusters 2. Beide Pads wurden von aktiv gegengekoppelten Kanälen ausgelesen.

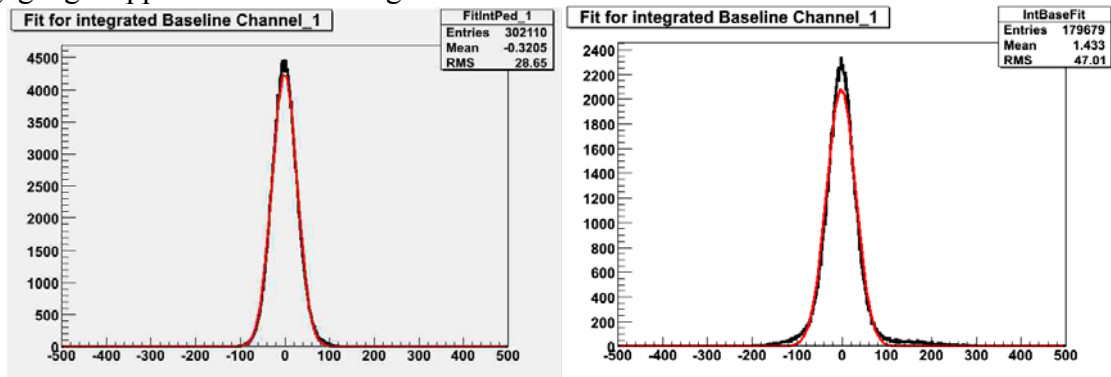


Abb. 3.24: Pedestal des Pads 1 Cluster 4. Abb. 3.25: Pedestal des Pads 1 Cluster 2

Das IG-Pedestal für Pad 1 des Clusters 4 kann besser durch eine Gaußverteilung angepasst werden als das des Pads 1 des anderen Clusters. Im Histogramm für Pad 1 des Clusters 2 sind sowohl einige Werte deutlich kleiner als -100 au als Werte deutlich größer als +100 au zu sehen, die von der Gaußverteilung abweichen. Abbildung 3.26 zeigt die ADC-Aufzeichnung eines Ereignisses dessen Wert der integrierten Grundlinie +290 au ergab und Abbildung 3.27 ein Ereignis mit einem Wert von -190 au.

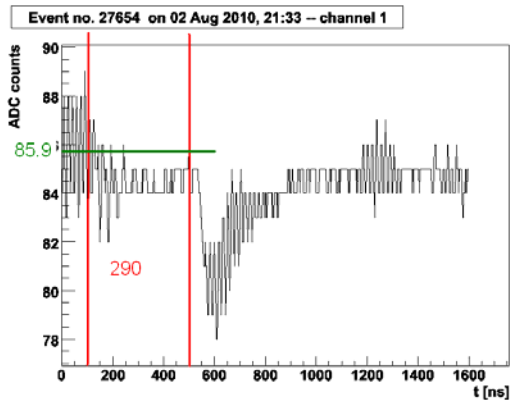


Abb. 3.26

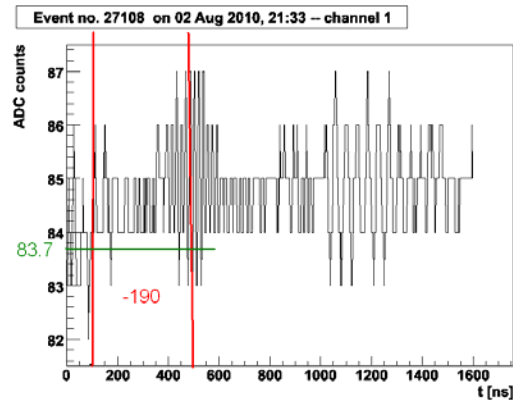


Abb. 3.27

In beiden Abbildungen sind sowohl die Fenster die zur Berechnung der Grundlinien verwendet wurden, als auch die Integrationsfenster zur Berechnung der IG-Pedestal dargestellt (rote Linien). Die grünen Linien sind die für diese Ereignisse berechneten Grundlinien. In beiden Bildern ist in den jeweils ersten Fenstern deutliches Rauschen zu sehen. Die Mittelung über die ADC-Werte in diesen Fenstern führte im ersten Fall zu einem zu hohen und im zweiten Fall zu einem zu niedrigen Wert für die Grundlinien der jeweiligen Ereignisse. Somit liefert die anschließende Integration mit Bezug zu den jeweiligen Grundlinien ebenfalls zu hohe oder zu niedrige Werte. Ändert man z.B. die Lage der Fenster für das in Abbildung 3.26 dargestellte Ereignis so, dass die Berechnung der Grundlinie aus den ADC-Werten zwischen 400 ns und 500 ns erfolgt, und anschließend über die ADC-Werte zwischen 0 ns und 400 ns mit Bezug zu dieser Grundlinie integriert wird, erhält man einen Wert von -25 au für das Integral. Dies ist in der Abbildung 3.28 dargestellt.

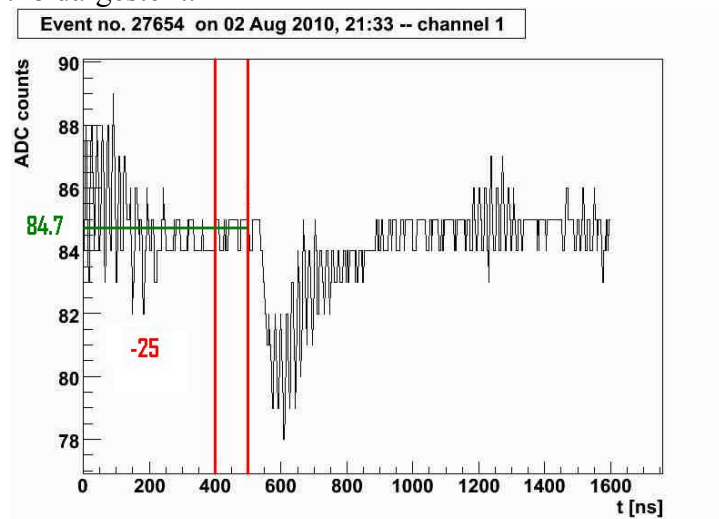


Abb. 3.28

Für den Wert des Integrals bedeutet es also einen deutlichen Unterschied, ob starkes Rauschen im Fenster für die Grundlinienberechnung oder dasselbe Rauschen im Integrationsfenster auftritt. In beiden Fällen ist der Wert des Integrals ein Maß für dieses Rauschen, jedoch unterscheiden sich diese Masse qualitativ voneinander. Treten beide

Fälle in einer Messserie auf, weicht das IG-Pedestal von einer reinen Gaußverteilung ab, wie dies in Abbildung 3.25 zu sehen ist.

Um die Unterschiede in den Signal-Rauschverhältnissen genauer zu untersuchen, wurde die Stabilität der Pedestal über den gesamten Zeitraum der Datennahme des jeweiligen Clusters untersucht. Dazu wurde jeweils für jede ROOT-Datei die Pedestal für alle acht Pads gebildet und die Mittelwerte und Standardabweichungen aus den Gaußanpassungen gegen die Messserien (als Ordnungsindex) aufgetragen. Die Abbildungen 3.29 und 3.30 zeigen das Ergebnis für die Mittelwerte.

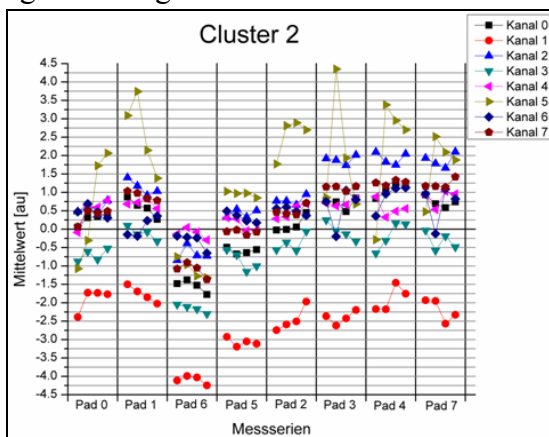


Abb. 3.29: Mittelwerte der Gaußanpassungen der Pedestal für Cluster 2

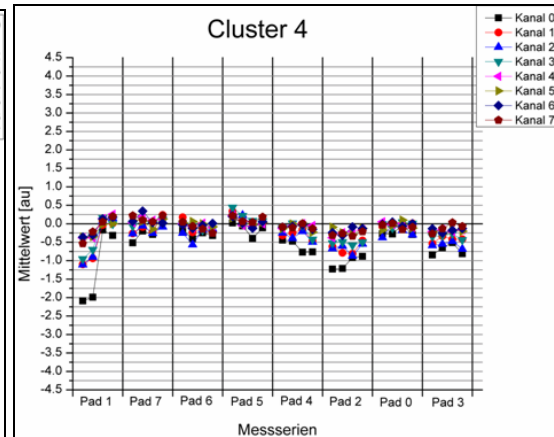


Abb. 3.30: Mittelwerte der Gaußanpassungen der Pedestal für Cluster 4

Die Y-Achsen haben in beiden Darstellungen die gleiche Skala. Man erkennt deutlich, dass die Mittelwerte bei Cluster 4 nicht so stark von Null abweichen, wie bei Cluster 2.

Ähnliches gilt auch für die Standardabweichungen, die in den Abbildungen 3.31 und 3.32 dargestellt sind.

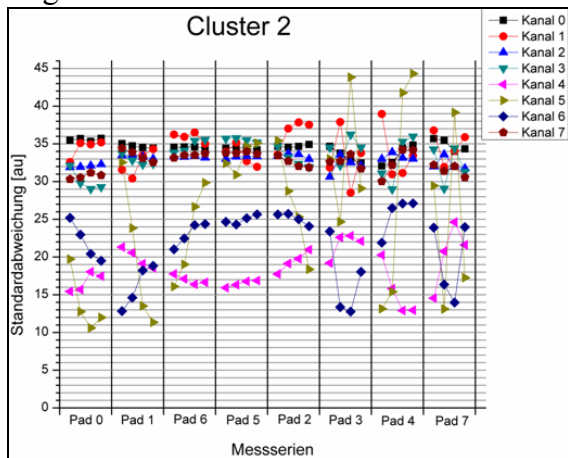


Abb. 3.31: Standardabweichungen der Gaußanpassungen der Pedestal für Cluster 2

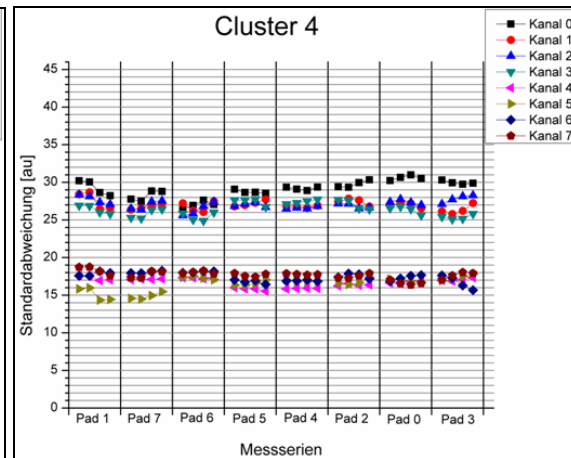


Abb. 3.32: Standardabweichungen der Gaußanpassungen der Pedestal für Cluster 4

Auch hier haben wieder die Y-Achsen die gleiche Größe. Während für Cluster 4 die Standardabweichungen stabil über den gesamten Zeitraum der Datennahme waren, sieht man bei Cluster 2 deutliche Schwankungen. Besonders auffällig ist hier der Kanal 5.

Die Ursache für die starken Schwankungen der Pedestals von Cluster 2 könnte darin begründet sein, dass die entsprechenden Front-End-Kanäle der Chips noch mit den Fanout-Leiterbahnen verbunden waren, bei denen die Bonds gerissen sind. Diese könnten als Antennen für Rauschen gewirkt, und somit zu den starken Schwankungen in den Pedestals geführt haben. Als Resultat sollte man die Signal-Rausch-Verhältnisse von Cluster 2 nicht als Beurteilungskriterium für die Detektorebene heranziehen.

### 3.4.2.2 Korreliertes Rauschen

Als Korrelation bezeichnet man in der Statistik einen erkennbaren Zusammenhang zwischen zwei oder mehreren statistischen Variablen. Man unterscheidet zwischen positiver (je größer der Wert der einen Variablen, desto größer der Wert der anderen) und negativer Korrelation (je größer der Wert der einen Variablen, desto kleiner der Wert der anderen). Bedingt eine Variable eine andere kausal, so sind sie auch korreliert. Der Umkehrschluss gilt jedoch nicht. Weisen zwei Variablen eine Korrelation auf, kann die Ursache ebenso eine oder mehrere andere Variablen sein, von denen die beiden betrachteten abhängen. Es ist sogar möglich, dass sich überhaupt kein kausaler Zusammenhang zwischen beiden finden lässt. Eine Korrelation liefert einen starken Hinweis auf einen direkten oder indirekten kausalen Zusammenhang. Sie ist jedoch kein Beweis für einen solchen und muss immer im Kontext mit den zugrunde liegenden Daten interpretiert werden. Vermutet man eine lineare Korrelation zwischen zwei Messreihen, liefert der lineare Korrelationskoeffizient ein Maß für deren Stärke.

Dieser ist gegeben durch

$$Kor_e(x, y) = r_{xy} \stackrel{def.}{=} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.2)$$

Dabei bezeichnen  $x$  und  $y$  die beiden Messreihen, deren Korrelationskoeffizient bestimmt werden soll,  $x_i$  und  $y_i$  sind die Messwerte der Reihen,  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  sind die arithmetischen Mittelwerte der Messreihen und  $n$  ist die Anzahl der Messwerte einer Reihe.

Der lineare Korrelationskoeffizient liefert eine dimensionslose Zahl zwischen -1 und +1. Dabei bedeutet +1 eine perfekte positive lineare Korrelation, -1 eine perfekte negative lineare Korrelation und 0 gar keine lineare Korrelation zwischen den Messreihen  $x$  und  $y$ .

Da korreliertes Rauschen ein bekanntes Phänomen in der Detektorphysik ist /11/, soll auch der hier getestete Detektor darauf hin untersucht werden. Es zeigt sich darin, dass eine Störung in allen betroffenen Auslesekanälen gleichzeitig gesehen wird.

Um nun nach korreliertem Rauschen in den verschiedenen Messserien zu suchen, bieten sich die Untersuchungen der Grundlinie und des IG-Pedestals an. Wird das korrelierte Rauschen nicht durch andere Effekte überdeckt, sollte es sich als Korrelationen in den Grundlinien bzw. den IG-Pedestals zwischen den einzelnen Kanälen widerspiegeln.

### 3.4.2.2.1 Korrelationen in den Grundlinien

Zunächst wurde nach Korrelationen in den Grundlinien zwischen den einzelnen Kanälen gesucht. Hierbei wurde die Grundlinie eines Kanals für ein bestimmtes Ereignisses, wie in Integrationsmethode 1 beschrieben, bestimmt. Der Grund hierfür ist der kleinere statistische Fehler, der bei der Mittelung über 100 Werte statt über 50, gemacht wird. Für das jeweils gleiche Ereignis, wurde dann der Wert der Grundlinie von Kanal „x“ gegen den Wert der Grundlinie von Kanal „y“ in einem zweidimensionalen Histogramm aufgetragen. Abbildung 3.33 zeigt das Resultat für die Kanäle 2 und 3 in Cluster 4. Der Teststrahl war auf Pad 0 gerichtet.

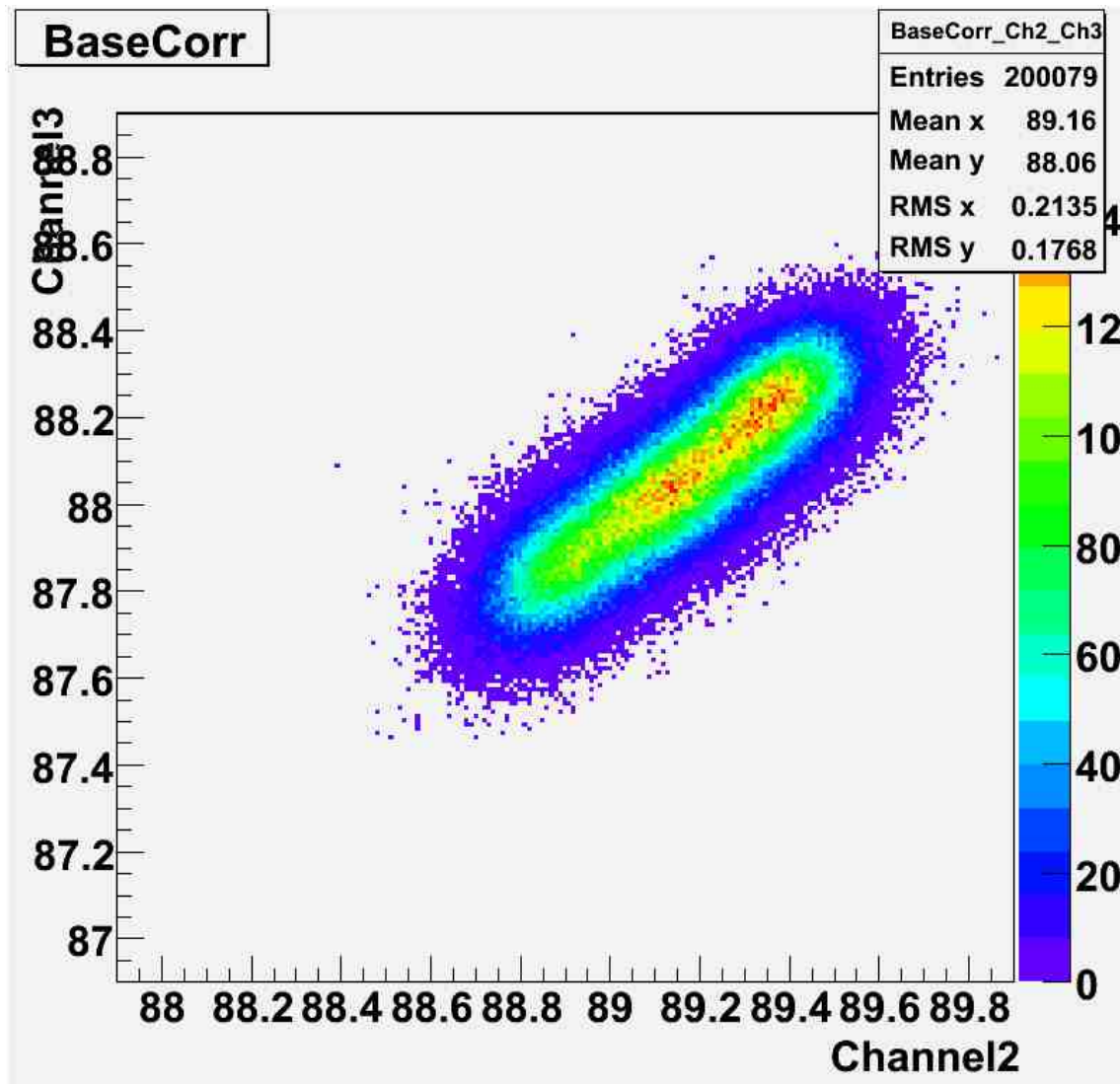
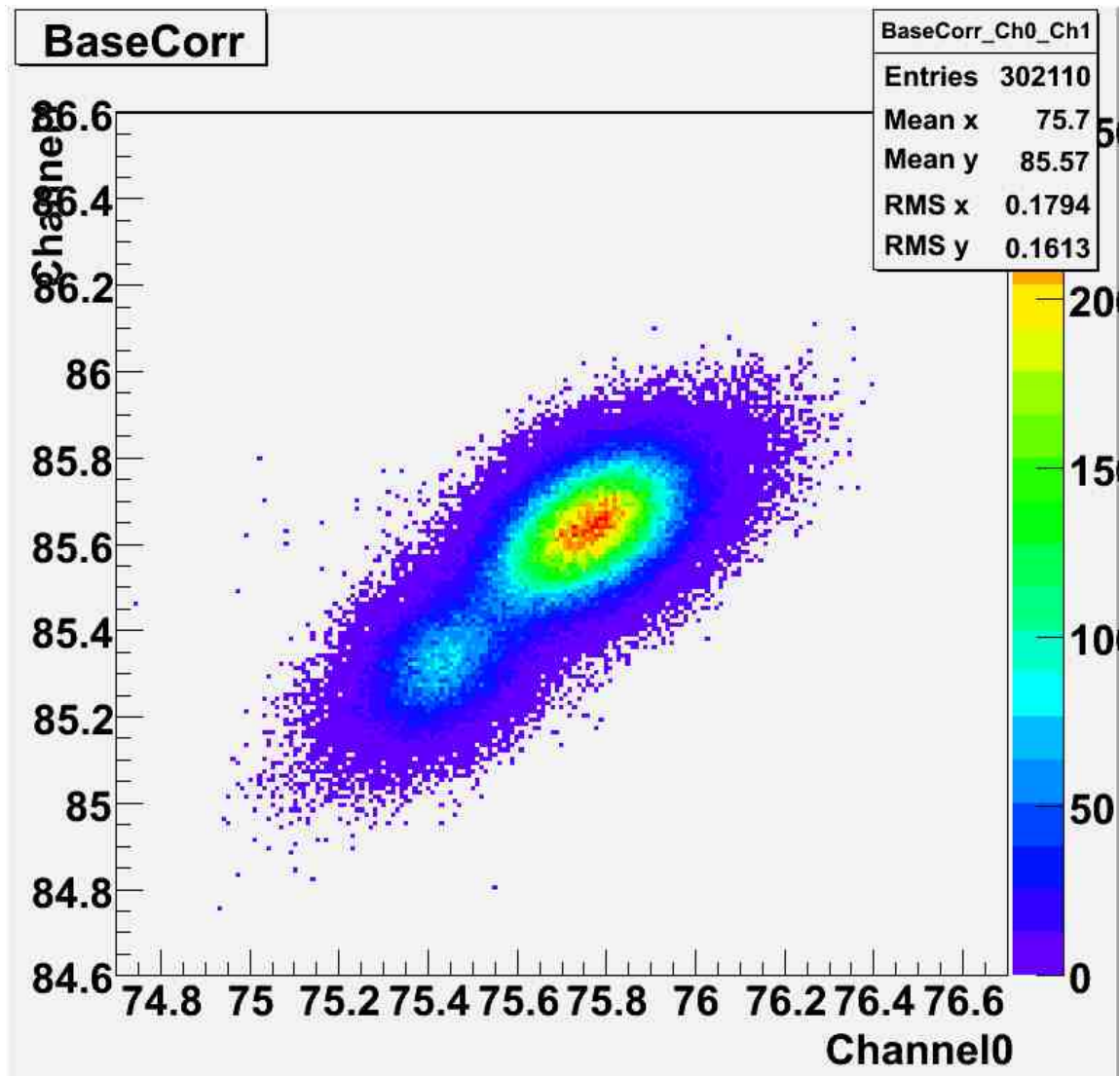


Abb. 3.33: Streudiagramm für die Grundlinien der Kanäle 2 und 3 des Cluster 4, bei Bestrahlung des Pad 0 Cluster 4.

Es sind die Daten aus vier ROOT-Dateien mit einer Gesamtstatistik von etwa 200 000 Ereignissen in einem Plot dargestellt. Es zeigt sich eine sehr starke lineare Korrelation.



Die Abbildung 3.34 zeigt die gleiche graphische Darstellung für die Kanäle 0 und 1 in Cluster 4, während der Teststrahl auf Pad 1 gerichtet war.



3.34: Streudiagramm für die Grundlinien der Kanäle 0 und 1 des Cluster 4, bei Bestrahlung des Pad 1 Cluster 4.

Auch hier ist eine starke lineare Korrelation erkennbar. Allerdings sieht man hier zwei Zentren. Wie im Fall zuvor, wurden auch hier die aufgezeichneten Messwerte auf vier verschiedene ROOT-Dateien aufgeteilt, um die Gesamtstatistik zu erreichen. Jedoch bestand in diesem Fall eine längere Pause zwischen den Messungen die in den ersten beiden ROOT-Dateien (etwa 200 000 Ereignisse) gespeichert wurden und denen, die in den anderen beiden (etwa 1000 000 Ereignisse) gespeichert wurden. Im vorhergehenden Fall gab es keine längeren Unterbrechungen in der Datennahme.

Dies legt nahe, dass die starken Korrelationen zwischen den Grundlinien der verschiedenen Kanäle durch eine Einflussgröße verursacht werden, die sich mit der Zeit ändert. Hierbei könnte es sich um die Temperatur handeln.



Die Temperatur innerhalb der Abschirmbox wurde ebenfalls während des Bestrahlungstests aufgezeichnet. Dabei gehört zu jeder ROOT-Datei eine entsprechende Datei mit den aufgezeichneten Temperaturmessungen. Um einen eventuellen Zusammenhang zwischen den Grundlinien und der Temperatur darstellen zu können, wurde der Mittelwert der Grundlinien eines bestimmten Kanals über alle Ereignisse in einer ROOT-Datei gebildet und der Mittelwert der aufgezeichneten Temperaturen der dazugehörigen Temperaturdatei. Die Grundlinienmittelwerte wurden dann gegen die Temperaturmittelwerte graphisch dargestellt. Abbildung 3.35 zeigt dies für die beiden Cluster.

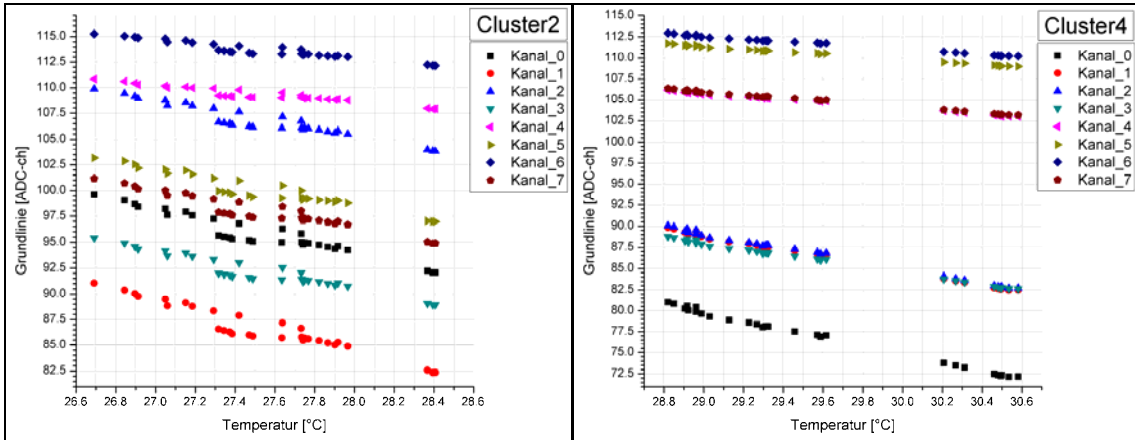


Abb. 3.35: Gemittelte Grundlinien als Funktion der gemittelten Temperatur für die Kanäle in Cluster 2 und 4.

Man erkennt einen sehr starken linearen Zusammenhang. Der Wert der Grundlinienmittelwerte fällt mit steigender Temperatur. Für jeden Kanal wurde eine lineare Anpassung vorgenommen, um den Anstieg des Temperaturdrifts zu berechnen, wie dies in Abbildung 3.36 für Kanal 0 des Cluster 4 gezeigt ist. Die Tabelle 3.7 zeigt die Ergebnisse.

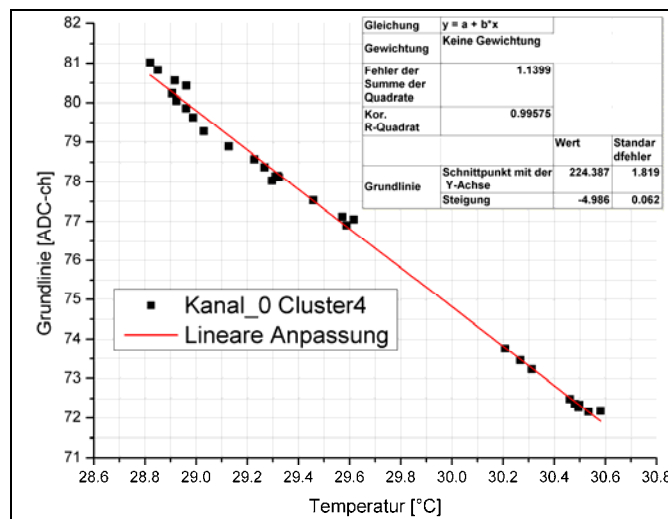


Abb. 3.36: Lineare Anpassung der Grundlinie gegen die Temperatur für Kanal 0 des Cluster 4

Cluster2			Cluster4		
Kanal	Anstieg	Konstante	Kanal	Anstieg	Konstante
0	-4.17	210.71	0	-4.99	224.39
1	-4.86	220.49	1	-4.18	210.23
2	-3.37	199.64	2	-4.13	208.82
3	-3.59	190.82	3	-3.46	188.22
4	-1.60	153.39	4	-1.76	156.83
5	-3.54	197.50	5	-1.55	156.35
6	-1.78	162.70	6	-1.53	157.03
7	-3.49	193.99	7	-1.80	158.20

*Tabelle 3.7: Parameter der linearen Anpassungen*

Für aktiv gegengekoppelte Kanäle ergibt sich ein Anstieg von  $-4 \pm 0.6 \frac{ADC - Ch.}{^{\circ}C}$

und für passiv gegengekoppelte von  $-1.7 \pm 0.1 \frac{ADC - Ch.}{^{\circ}C}$ .

Als Ursache kommen verschiedene Möglichkeiten in Frage. So ist es zum Beispiel denkbar, dass die Temperatur die Chips beeinflusst. Andererseits, ist der elektrische Widerstand von Galliumarsenid temperaturabhängig und damit auch der Leckstrom. Um die genaue Ursache der Temperaturdrift der Grundlinien zu ermitteln, bedarf es genauere Untersuchungen, die nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit waren.

#### **3.4.2.2.2 Korrelationen in den Pedestals**

Wie wir gesehen haben, ist die Grundlinie temperaturabhängig. Dies hat jedoch keinen, oder nur ein sehr geringen Einfluss auf die Pedestals. Der Grund liegt darin, dass die Integration zur Berechnung der Werte der Pedestals mit Bezug zur Grundlinie erfolgte. Für jedes Ereignis wurde die Grundlinie des betrachteten Kanals neu bestimmt. Die Aufzeichnungsdauer, der zur Berechnung der Grundlinie und des IG-Pedestal verwendeten Samples, erstreckt sich insgesamt über nur 500 Nanosekunden. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die IG-Pedestals von der Temperaturdrift der Grundlinien weitestgehend unabhängig sind.

Dennoch zeigen sich in den IG-Pedestals eindeutige lineare Korrelationen zwischen verschiedenen Kanälen. Dies wird in den Abbildungen 3.37 und 3.38 deutlich.

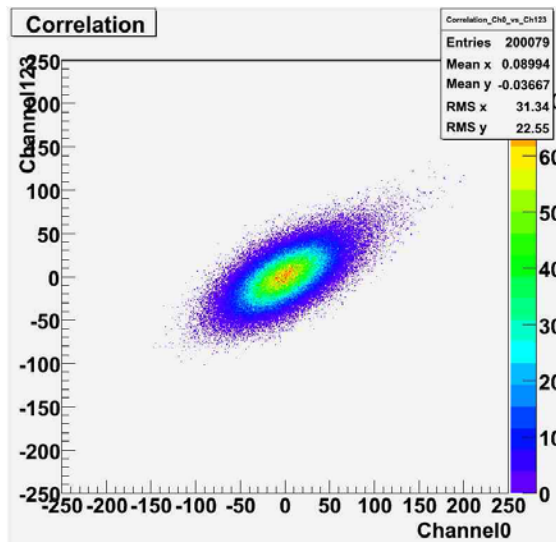


Abb. 3.37: Streudiagramm zur Veranschaulichung der Korrelation zwischen aktiv gegengekoppelten Kanälen des Clusters 4.

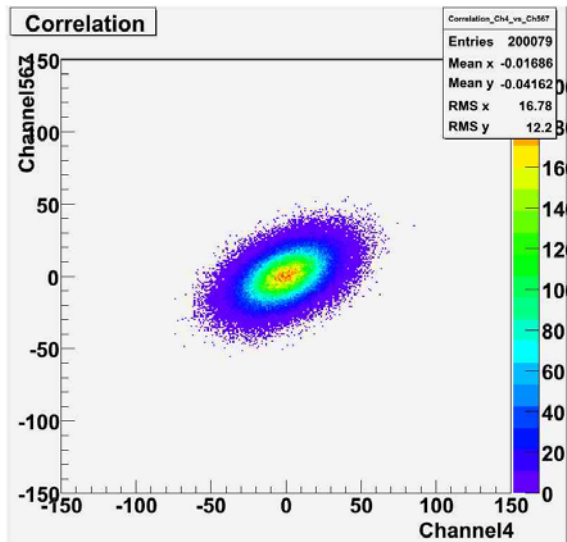


Abb. 3.38: Streudiagramm zur Veranschaulichung der Korrelation zwischen passiv gegengekoppelten Kanälen des Clusters 4.

Den beiden dargestellten Histogrammen liegen jeweils Messdaten aus derselben Messserie zugrunde. Es handelt sich um die Bestrahlung von Pad 0 des Clusters 4.

Die Abbildung 3.37 stellt die Korrelation in den IG-Pedestals zwischen den vier aktiv gegengekoppelten Kanälen 0 bis 3 graphisch dar. Dabei wurden für jedes Ereignis die integrierte Grundlinie des Kanals 0 und der Mittelwert aus den drei integrierten Grundlinien der Kanäle 1 bis 3 berechnet. Die Werte für Kanal 0 wurden dann gegen die Mittelwerte der anderen Kanäle des jeweils selben Ereignisses aufgetragen.

Die graphische Darstellung in Abbildung 3.38 zeigt bei gleicher Vorgehensweise die Korrelation zwischen den passiv gegengekoppelten Kanälen 4 bis 7. Hier sind die Werte für Kanal 4 gegen die Mittelwerte der Kanäle 5, 6 und 7 dargestellt.

In beiden dargestellten Histogrammen ist eine lineare Korrelation klar ersichtlich. Dabei ist die Korrelation zwischen den aktiv gegengekoppelten Kanälen stärker gegenüber der Korrelation der passiv gegengekoppelten Kanäle.

Die Abbildungen 3.39 und 3.40 stellen die Korrelationen zwischen Kanälen gleicher Gegenkopplung für Cluster 2 graphisch dar.

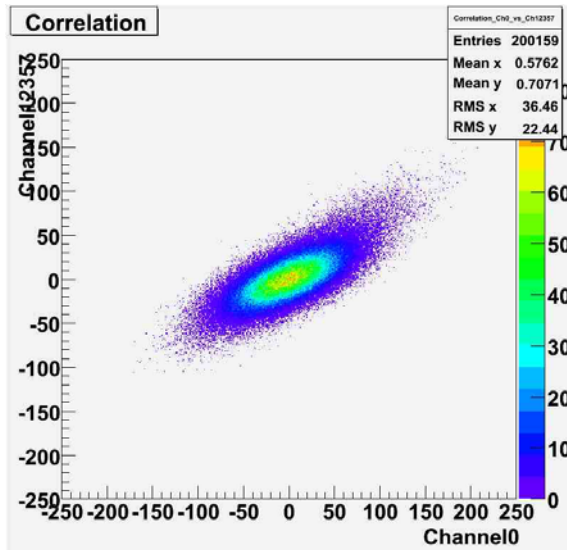


Abb. 3.39: Streudiagramm zur Veranschaulichung der Korrelation zwischen aktiv gegengekoppelten Kanälen des Clusters 2.

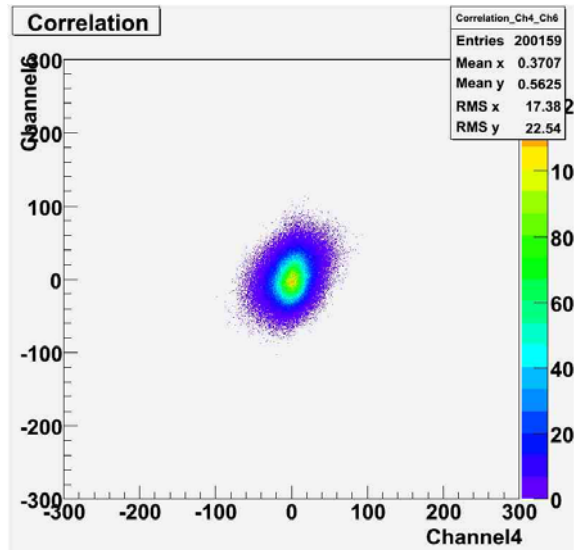


Abb. 3.40: Streudiagramm zur Veranschaulichung der Korrelation zwischen passiv gegengekoppelten Kanälen des Clusters 2.

Die Abbildung 3.39 zeigt die Werte der integrierten Grundlinien von Kanal 0 gegen die Mittelwerte aus den integrierten Grundlinien der Kanäle 1,2,3,5 und 7. Hierbei handelt es sich um die aktiv gegengekoppelten Kanäle. In der Abbildung 3.40 sind die Werte der beiden passiv gegengekoppelten Kanäle 4 und 6 gegeneinander aufgetragen. Man erkennt auch hier eine lineare Korrelation in den IG-Pedestals zwischen den Kanälen mit aktiver Gegenkopplung. Allerdings weicht die Form der Punktwolke von einer Ellipse ab. Die beiden passiv gegengekoppelten Kanäle zeigen augenscheinlich eine schwächere Korrelation.

Um Abschätzen zu können, wie stark die die Werte der IG-Pedestals der einzelnen Kanäle korreliert sind, wurden die jeweiligen linearen Korrelationskoeffizienten mit Formel 3.2 berechnet. Die Tabelle 3.8 zeigt die Ergebnisse für Cluster 4.

Korrelationskoeffizienten Cluster 4										
Kombin. der Kanäle	Teststrahl ist fokussiert auf ...								Mittelwert	Std.-Abw. des Mittelw.
	Pad 0	Pad 1	Pad 2	Pad 3	Pad 4	Pad 5	Pad 6	Pad 7		
0 und 1	0.54	0.58	0.53	0.55	0.53	0.52	0.52	0.56	0.54	0.021
0 und 2	0.56	0.59	0.54	0.56	0.54	0.54	0.54	0.57	0.55	0.019
0 und 3	0.51	0.54	0.49	0.52	0.51	0.52	0.49	0.53	0.51	0.018
1 und 2	0.54	0.57	0.54	0.54	0.53	0.52	0.52	0.54	0.54	0.016
1 und 3	0.53	0.53	0.52	0.55	0.50	0.50	0.53	0.54	0.52	0.019
2 und 3	0.51	0.52	0.52	0.51	0.52	0.51	0.49	0.53	0.52	0.014
4 und 5	0.27	0.31	0.29	0.28	0.25	0.30	0.32	0.31	0.29	0.024
4 und 6	0.37	0.35	0.38	0.33	0.38	0.36	0.34	0.35	0.36	0.019
4 und 7	0.34	0.34	0.34	0.36	0.37	0.35	0.32	0.34	0.35	0.016
5 und 6	0.29	0.34	0.34	0.36	0.29	0.33	0.29	0.31	0.32	0.028
5 und 7	0.25	0.31	0.24	0.23	0.21	0.26	0.26	0.35	0.26	0.046
6 und 7	0.26	0.41	0.27	0.17	0.34	0.35	0.40	0.45	0.33	0.093
0 und 4	0.37	0.32	0.38	0.38	0.37	0.34	0.38	0.39	0.37	0.024
0 und 5	0.38	0.35	0.37	0.38	0.33	0.36	0.37	0.33	0.36	0.020
0 und 6	0.33	0.35	0.36	0.33	0.37	0.35	0.37	0.39	0.36	0.021
0 und 7	0.36	0.39	0.35	0.37	0.38	0.39	0.32	0.36	0.37	0.024
1 und 4	0.39	0.37	0.40	0.40	0.39	0.37	0.39	0.40	0.39	0.013
1 und 5	0.39	0.38	0.38	0.39	0.36	0.39	0.39	0.36	0.38	0.013
1 und 6	0.36	0.38	0.38	0.35	0.40	0.37	0.38	0.38	0.38	0.016
1 und 7	0.38	0.40	0.39	0.39	0.40	0.40	0.33	0.37	0.38	0.024
2 und 4	0.38	0.36	0.39	0.40	0.38	0.36	0.39	0.40	0.38	0.016
2 und 5	0.39	0.37	0.39	0.39	0.36	0.38	0.37	0.35	0.38	0.016
2 und 6	0.35	0.38	0.38	0.34	0.39	0.36	0.38	0.40	0.37	0.021
2 und 7	0.38	0.40	0.38	0.40	0.39	0.39	0.34	0.38	0.38	0.019
3 und 4	0.38	0.37	0.38	0.39	0.38	0.36	0.39	0.39	0.38	0.011
3 und 5	0.39	0.38	0.39	0.40	0.37	0.38	0.38	0.37	0.38	0.011
3 und 6	0.38	0.39	0.38	0.37	0.39	0.37	0.39	0.38	0.38	0.008
3 und 7	0.39	0.40	0.40	0.39	0.40	0.40	0.36	0.38	0.39	0.014

Tabelle 3.8: Korrelationskoeffizienten Cluster 4 (rot: Kombination von Kanälen mit aktiver Gegenkopplung; blau: Kombination von Kanälen mit passiver Gegenkopplung; schwarz: Kombination von Kanälen mit unterschiedlicher Gegenkopplung).

Der Korrelationskoeffizient wurde bei jeder Messserie für alle 28 Kombinationsmöglichkeiten der acht Kanäle berechnet. Für jede Kombinationsmöglichkeit wurde dann der Mittelwert über alle acht Messserien gebildet und die zugehörige Standardabweichung berechnet. Es zeigt sich, dass Kanäle mit aktiver Gegenkopplung stärker miteinander korreliert sind, als Kanäle mit passiver. Im Mittel beträgt die Korrelation zwischen aktiv gegengekoppelten Kanälen 0.53 und für passiv gegengekoppelte 0.32. Insgesamt sind für Cluster 4 Korrelationen zwischen den Kanälen erkennbar. Diese sind schwach bis mittelstark.

Die Tabelle 3.9 zeigt die Ergebnisse für Cluster 2. Hier lässt sich keine so eindeutige Tendenz erkennen.

Korrelationskoeffizienten Cluster 2										
Kombin. der Kanäle	Teststrahl ist fokussiert auf ...									Std.-Abw. des Mittelw.
	Pad 0	Pad 1	Pad 2	Pad 3	Pad 4	Pad 5	Pad 6	Pad 7	Mittelw.	
0 und 1	0.52	0.45	0.46	0.37	0.36	0.46	0.48	0.41	0.44	0.055
0 und 2	0.57	0.57	0.58	0.55	0.57	0.58	0.59	0.56	0.57	0.013
0 und 3	0.55	0.53	0.54	0.47	0.47	0.55	0.55	0.49	0.52	0.036
0 und 5	0.19	0.21	0.22	0.24	0.26	0.24	0.25	0.22	0.23	0.023
0 und 7	0.60	0.60	0.60	0.60	0.62	0.61	0.62	0.60	0.61	0.010
1 und 2	0.26	0.14	0.16	-0.02	0.02	0.14	0.18	0.05	0.11	0.093
1 und 3	0.70	0.75	0.71	0.68	0.73	0.72	0.74	0.74	0.72	0.024
1 und 5	-0.03	-0.19	-0.16	-0.24	-0.22	-0.09	-0.07	-0.21	-0.15	0.078
1 und 7	0.36	0.27	0.25	0.16	0.18	0.24	0.29	0.20	0.24	0.065
2 und 3	0.36	0.29	0.31	0.17	0.18	0.31	0.33	0.20	0.27	0.074
2 und 5	0.25	0.33	0.36	0.40	0.38	0.33	0.35	0.37	0.35	0.046
2 und 7	0.56	0.57	0.59	0.57	0.58	0.59	0.60	0.58	0.58	0.013
3 und 5	0.06	-0.05	0.00	-0.05	-0.05	0.06	0.07	-0.06	0.00	0.058
3 und 7	0.44	0.40	0.40	0.34	0.34	0.40	0.43	0.34	0.39	0.041
5 und 7	0.25	0.31	0.35	0.35	0.35	0.32	0.33	0.34	0.32	0.034
4 und 6	0.26	0.21	0.36	0.25	0.26	0.37	0.30	0.21	0.28	0.061
0 und 4	0.39	0.39	0.41	0.39	0.35	0.40	0.41	0.35	0.39	0.024
0 und 6	0.41	0.38	0.43	0.36	0.41	0.43	0.42	0.37	0.40	0.028
1 und 4	0.23	0.15	0.22	0.18	0.21	0.16	0.18	0.11	0.18	0.040
1 und 6	0.39	0.36	0.34	0.27	0.24	0.33	0.39	0.29	0.33	0.055
2 und 4	0.42	0.43	0.42	0.40	0.34	0.45	0.47	0.40	0.42	0.039
2 und 6	0.36	0.32	0.42	0.30	0.39	0.38	0.37	0.32	0.36	0.041
3 und 4	0.34	0.29	0.30	0.34	0.29	0.28	0.31	0.23	0.30	0.035
3 und 6	0.44	0.41	0.43	0.33	0.37	0.46	0.49	0.37	0.41	0.053
4 und 5	0.21	0.27	0.19	0.19	0.15	0.23	0.24	0.22	0.21	0.037
4 und 7	0.41	0.42	0.39	0.39	0.33	0.42	0.44	0.37	0.39	0.035
5 und 6	0.14	0.05	0.18	0.12	0.15	0.19	0.23	0.12	0.15	0.055
6 und 7	0.35	0.33	0.42	0.33	0.40	0.38	0.38	0.34	0.37	0.034

Tabelle 3.9: Korrelationskoeffizienten Cluster 2 (rot: Kombination von Kanälen mit aktiver Gegenkopplung; grün: Kombination von Kanälen mit passiver Gegenkopplung; schwarz: Kombination von Kanälen mit unterschiedlicher Gegenkopplung).

Während die Kanäle 1 und 3 mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.72 stark korreliert sind, zeigen die Kanäle 3 und 5 gar keine, und 1 und 5 eine negative Korrelation. Insgesamt ist für Cluster 2 kein einheitliches Bild erkennbar, was wiederum an den Leiterbahnen des Fanouts mit den gerissenen Bonds liegen kann.

## 4 Zusammenfassung

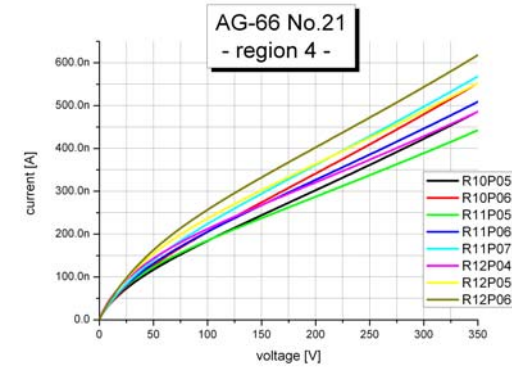
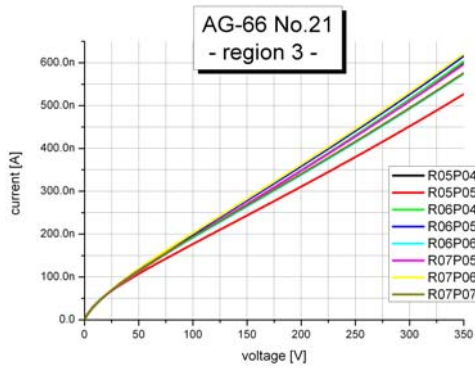
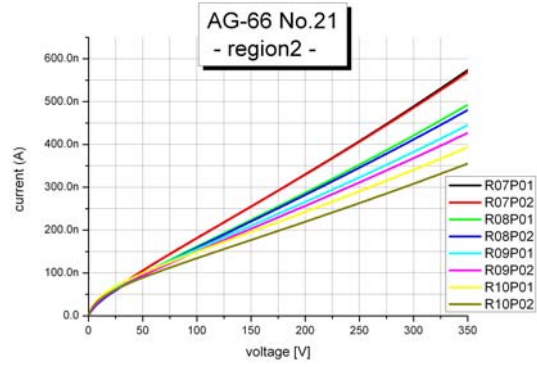
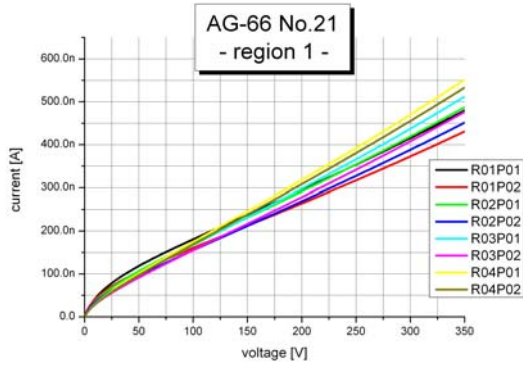
Die Labormessungen an den Front-End-ASICs ergaben eine sehr gute Linearität der Verstärkung für den „LowLow“- und „LowHigh“-Modus über einen weiten Bereich an Eingangssignalen. Für den „HighLow“- und „HighHigh“-Modus war die Linearität hervorragend für einen ausreichend großen Bereich an Eingangssignalen.

Bei den Messungen im Teststrahl konnte gezeigt werden, dass die Detektorebene ein sehr gutes Signal-Rausch-Verhalten aufweist und somit Signale deutlich vom Rauschen zu unterscheiden sind. Das korrelierte Rauschen ist schwach bis mittelstark. Des Weiteren wurde gezeigt, dass die Grundlinien temperaturabhängig sind. Dies bedarf einer genaueren Untersuchung der Ursachen. Da BeamCal die Signale schnell auslesen und verarbeiten muss, sind langsame Integrationsmethoden, wie die Integration in Bezug zur Grundlinie nicht möglich. Daher muss die Temperaturabhängigkeit genau bekannt sein. Einer genaueren Untersuchung bedarf es auch in Bezug auf das Abweichen des Pedestals im Signalgrößenspektrum von einer Gaußverteilung, das möglicherweise auf Charge Sharing und Übersprechen zurückzuführen ist. Dazu ist die Auswertung der Teleskopdaten vonnöten. Des Weiteren wurden die Kalibrierungsfaktoren für den ADC berechnet. Diese ermöglichen die Umrechnung der ADC-Einheiten in Vielfache der Elementarladung. Dies wird zum Beispiel benötigt, um die Charge Collection Efficiency, eine weitere wichtige Kenngröße des Detektors zu berechnen.

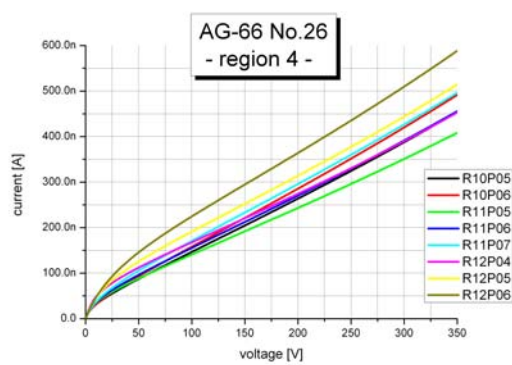
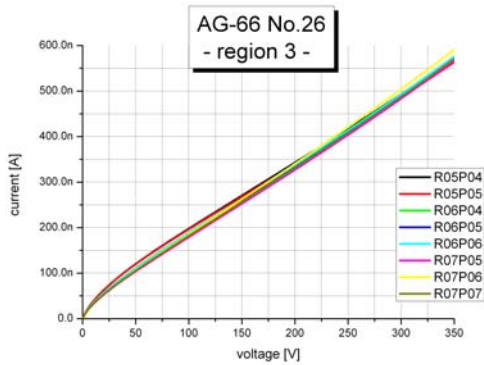
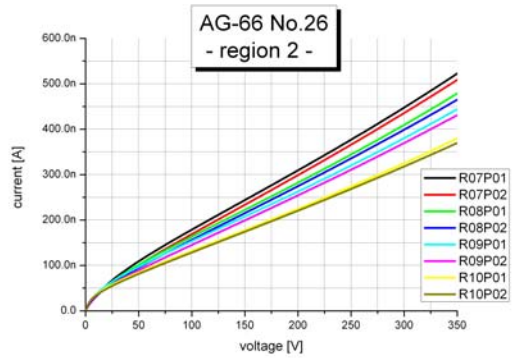
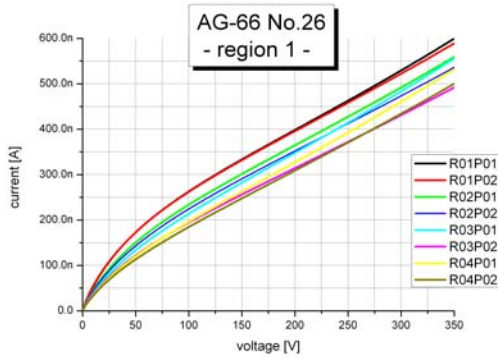
# Anhang

## IV-Kennlinien

### AG-66 No.21:

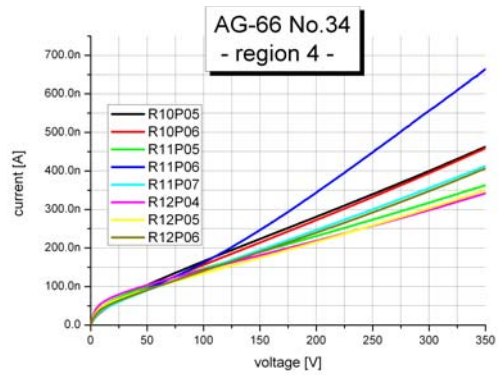
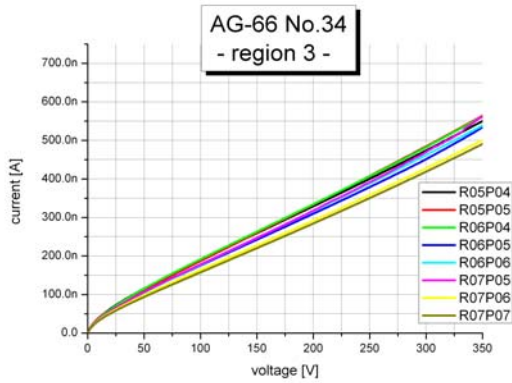
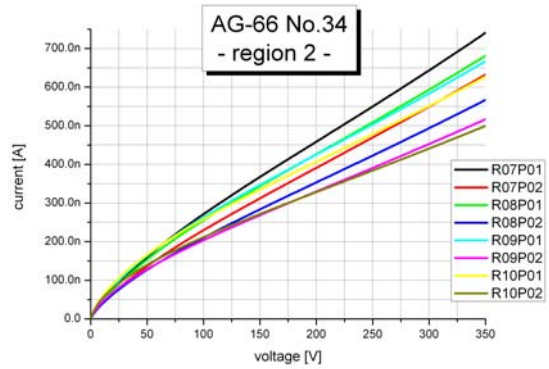
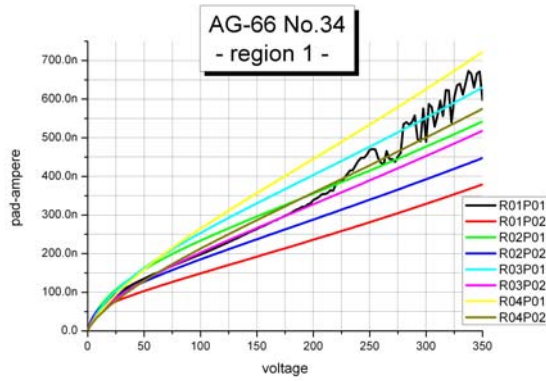


### AG-66 No.26:

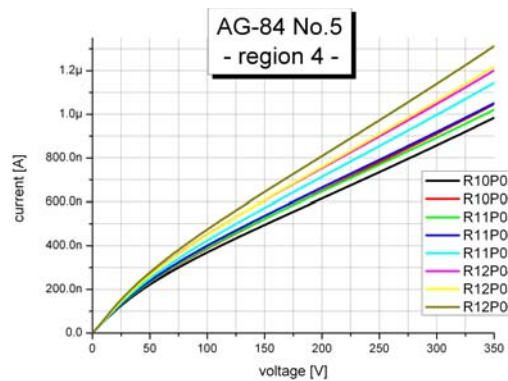
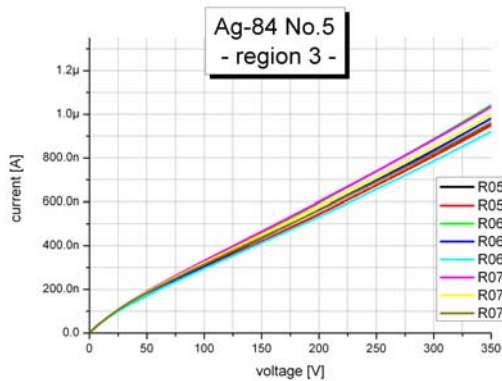
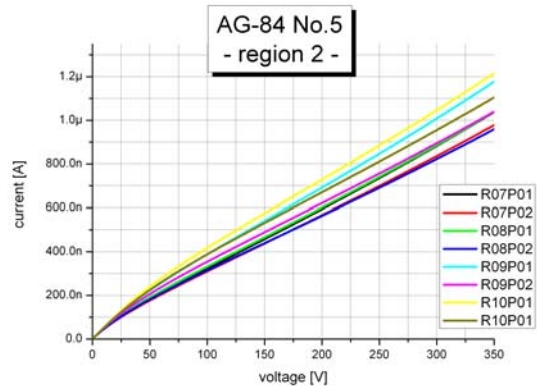
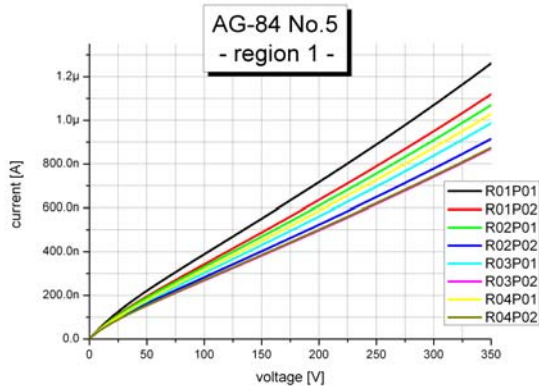




AG-66 No.34:



AG-84 No.5:



# Literaturverzeichnis

- /1/ D. d'Enterria, "Physics at the LHC: a short overview"  
2011 J. Phys.: Conf. Ser. 270 012001
- /2/ CERN Pressemitteilung  
<http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2010/PR07.10E.html>
- /3/ G. Weiglein et al., "Physics Interplay of the LHC and the ILC"  
Phys.Rept.426:47-358,2006
- /4/ ILC Reference Design Report  
<http://www.linearcollider.org/about/Publications/Reference-Design-Report>
- /5/ The Compact Linear Collider Study  
<http://cllc-study.web.cern.ch/cllc-study/>
- /6/ M. Battaglia, A. de Roeck, J. R. Ellis, D. Schulte, "Physics at the CLIC Multi-TeV Linear Collider",  
CERN report 2004-05
- /7/ T. Abe et al., "The International Large Detector: Letter of Intent",  
FERMILAB-LOI-2010-01, FERMILAB-PUB-09-682-E, DESY-2009-87, KEK-REPORT-2009-6, arXiv:1006.3396 (2010).
- /8/ E.L. Berger et al., "SiD Letter of Intent (2009)",  
<https://confluence.slac.stanford.edu/display/SiD/home>.
- /9/ H. Abramowicz et al., "Forward Instrumentation for ILC Detectors",  
JINST 5:P12002,2010
- /10/ Ch. Grah, A. Saproinov, "Beam parameter determination using beamstrahlung photons and incoherent pairs",  
JINST, 3:10004, 2008
- /11/ H. Spieler, "Semiconductor Detector Systems",  
Oxford University Press 2005
- /12/ S.P. Beaumont et al., "GaAs solid state detectors for particle physics"  
Nucl. Instr. and Meth. A322 (1992) 472-482
- /13/ J.S. Blakemore, "Semiconducting and other major properties of gallium arsenide",  
J. Appl. Phys. 53 (1982), R123
- /14/ L'. Hrivnak, "Semi-insulating GaAs"  
Czech. J. Phys. B 34 (1984) 436-444
- /15/ M. Idzik, Sz. Kulis, D. Przyborowski, "Development of front-end electronics for the luminosity detector at ILC"  
Nucl. Instr. and Meth. A 608 (2009) 169-174
- /16/ T. Behnke et al., "Test Beams at DESY",  
Eudet-Memo-2007-11
- /17/ <http://root.cern.ch>