Kalibration des Plug-Kalorimeters und Verbesserung des Signal-Rauschverhältnisses

Experimentelle physikalische Diplomarbeit

angefertigt von

Michael Krüger

I. Institut für Experimentalphysik
Fachbereich Physik
Universität Hamburg
Juni 1996

Hauptgutachter: Prof. Lindström
Zweitgutachter: Prof. Langkau

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

Im Jahre 1990 wurde am DESY[1] in Hamburg der Elektronen- und Protonenspeicherring HERA[2] in Betrieb genommen, in dem Elektronen auf ca. 30 GeV und Protonen auf 820 GeV beschleunigt und dann in mehreren Wechselwirkungspunkten bei einer Schwerpunktenergie von 300 GeV zur Kollision gebracht werden. Der HERA-Ring stellt bis heute den einzigen Speichering dieser Bauart weltweit dar. Aufgrund der hohen Schwerpunktenergie ist es möglich bisher nicht zugängliche Forschungsgebiete zu eröffnen. Dazu gehört die Struktur des Protons bis zu einer Größenordnung von $10^{-18} m$, die Überprüfung der Standardtheorie der starken Kraft, die Erzeugung schwerer Quarks, sowie die Erforschung der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung mit besonderem Augenmerk auf die Struktur der geladenen und neutralen Ströme. Seit 1994 werden im HERA-Ring anstelle von Elektronen Positronen zur Beschleunigung injiziert, wodurch es gelang die Luminosität um das 6-fache zu steigern.

An den Wechselwirkungspunkten werden zur Zeit zwei Großexperimente, das ZEUS- und das H1-Experiment(Abbildung 1.1), betrieben.
Das H1-Experiment besteht aus zahlreichen Subdetekoren, die als Gesamtheit den eigentlichen Detektor darstellen, der in besonderer Weise den Anforderungen des HERA-Ringes und seiner Strahlbedingungen gerecht werden muß. Die hauptsächliche Anforderung ist der große Impuls des Schwerpunktsystem, der sich in einer starken Asymmetrie des Vorwärts- und Rückwärtsbereichs ausdrückt, da aufgrund der hohen Protonenenergie im Rückwärtsbereich nur ein kleiner Teil des Gesamtimpulses erwartet wird.
Der innere Bereich um den Wechselwirkungspunkt wird von den zentralen Spurenkammern(Abbildung 1.1 Nr. 2 u. 3) gebildet, die die Aufgabe haben

---

[1] **D**eutsches-**E**lektronen-**Sy**nchrotron

[2] **H**adronen-**E**lektronen-**R**ing-**A**nlage

die Vertizes und Spuren geladener Reaktionsprodukte nachzuweisen. Um diesen Bereich sind die Kalorimeter zur Messung des Energieflußes angeordnet. Dazu gehören das LAr-Kalorimeter[3](Abbildung 1.1 Nr. 4 u. 5), das den Winkelbereich von 3.5° bis 152° abdeckt, das BEMC[4](Abbildung 1.1 Nr. 12) für den Winkelbereich zwischen 152° und 175°, sowie das PLUG-Kalorimeter Abbildung 1.1 Nr. 13), das sich in einer Öffnung des Eisenjochs(Abbildung 1.1 Nr. 10) befindet und den extremen Vorwärtswinkelbereich von 0.7° bis 3.5° abdeckt.

Das PLUG-Kalorimeter soll Thema dieser Diplomarbeit sein und hier im besonderen die Bestimmung des Kalibrationsfaktors, die Verbesserung des Signal-Rauschverhältnisses und die Untersuchung der Stabilität der kontinuierlich durchgeführten Kalibrationen.

Gliederung

Im **2. Kapitel** werden die Aufgaben und der Aufbau des PLUG-Kalorimeters erläutert.
Das **3. Kapitel** beinhaltet ein Einführung in Bau- und Funktionsweise sowie die Eigenschaften von Siliziumhalbleiterdetektoren.
Im **4. Kapitel** wird die Elektronik und ihr Verhalten bezüglich der Stabilität beschrieben.
Das **5. Kapitel** behandelt den Umbau der Adapter- und Analogboxen, mit dem eine Verbesserung des Signal-Rauschverhältnisses erzielt werden soll.
Das **6. Kapitel** beschreibt die Kalibration des PLUG-Kalorimeters, die theoretisch Grundlagen, die Vorgehensweise, die Übertragung auf das H1-Experiment und die Ergebnisse der Kalibration sowie deren Auswirkungen auf die Rekonstruktion der Daten, die in der H1-Kollaboration durchgeführt werden.
In **7. Kapitel** wird dargestellt, welche Beobachtungen in der Strahlzeit '95 anhand der Kalibrationsdaten gemacht wurden, und wie diese zum Betrieb des PLUG-Kalorimeters verwendet werden können.
Das **8. Kapitel** enthält eine Zusammenfassung der ermittelten Ergebnisse.

---

[3] **L**iquid-**Ar**gon-Kalorimeter

[4] **B**ackward-**E**lectro-**M**agnetic-**C**alorimeter

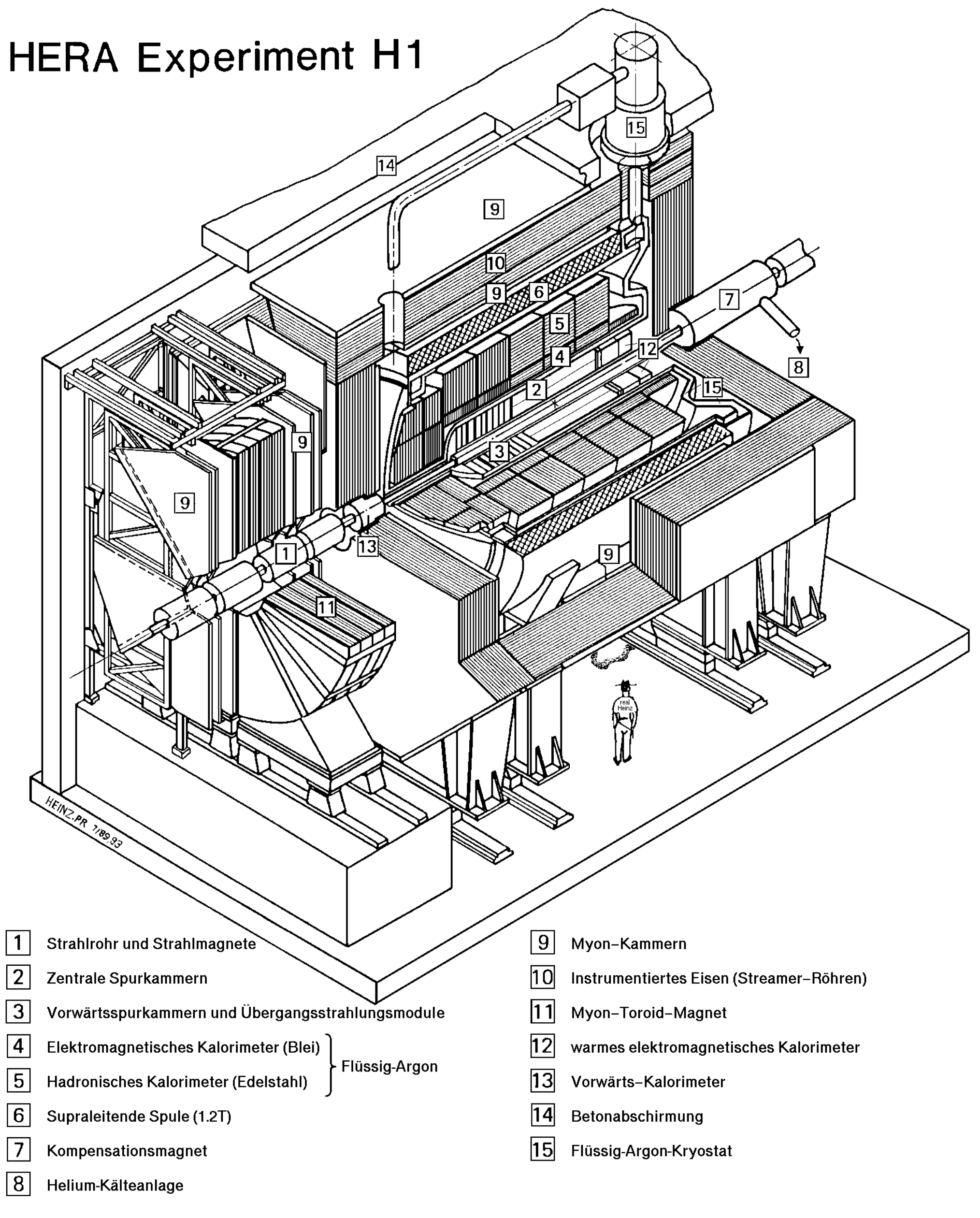


Abbildung 1.1: *Aufbau des H1-Detektor am DESY in Hamburg (13. PLUG-Kalorimeter)*

Kapitel 2

Das PLUG-Kalorimeter

Das PLUG-Kalorimeter wurde entwickelt, um im extremen Vorwärtsbereich des H1-Experiment den Energiefluß zu messen, der vom LAr-Kalorimeter konstruktionsbedingt nicht erfaßt werden kann. Der minimale Polarwinkel unter dem das LAr-Kalorimeter den Energiefluß messen kann beträgt 3.5°. Die Reduzierung dieses Winkels ist besonders wichtig, da der Energiefluß für Detektorereignisse durch die starke Asymmetrie der Energien des Protonen- bzw. Elektronenstrahls mit Annährung zum Strahlrohr stark zunimmt.
Durch die Instrumentierung eines weiteren Kalorimeters im H1-Detektor sollte die Kalorimetrie im vorderen Bereich komplettiert werden. Begrenzt wird der Raum im vorderen Teil des H1-Detektors durch das umgebende Eisenjoch und nach innen durch das Strahlrohr, wodurch der abzudeckende Winkelbereich 0.75° bis 3.4° beträgt.
Hier fiel die Wahl auf ein Kupfer-Silizium-Sampling-Kalorimeter, da sich ein solches Kalorimeter durch seine kompakte Bauweise bei einer möglichst hohen Energieabsorbtion auszeichnet. Diese kompakte Bauweise und der Ort des Einbaus waren Namensgeber des PLUG-Kalorimeters[1], da es wie ein „Stopfen“ den für das LAr-Kalorimeter energetisch nicht erfaßbaren Winkelbereich zwischen Strahlrohr und Eisenjoch erschließt.

Die Hauptaufgabe des PLUG ist die Messung der transversale Energiekomponente von aus dem Wechselwirkungspunkt kommenden Teilchen.
Eine Analyse der Meßdaten ergab jedoch eine große Diskrepanz zwischen den in Monte-Carlo-Simulationen errechneten Daten für die Energiemessung und den gemessenen Daten, die nicht erklärt werden konnte. Vermutet wurde als Ursache der Einfluß des toten Materials, das zwischen dem PLUG und dem Wechselwirkungspunkt liegt. Doch konnte auch eine genaue Überprüfung der

---

[1] „plug“: engl. Stecker oder Stopfen

Simulationen[PAN96] bezüglich des toten Materials diese Abweichung nicht erklären. Ein weiterer Grund könnte eine fehlerhafte Kalibration sein, die im Rahmen dieser Arbeit überprüft werden soll.

Heute findet das PLUG seine Anwendung als Veto zur Erkennung diffraktiver Ereignisse[H1C95]. Diese zeichnen sich dadurch aus, daß bei tiefinelastischer Streuung des Elektrons am Proton trotz Energiedeponierung im hinteren Detektorteil des H1-Experiments, in Vorwärtsrichtung des Protons keinerlei Energiefluß zu registrieren ist.

2.1 Aufbau des PLUG-Kalorimeters

Das PLUG ist ein Sampling-Kalorimeter und besteht aus mehreren Schichten, die zum einen aus Absorbermaterial und zum anderen aus aktivem Material bestehen. Diese Schichten sind so angeordnet, daß sie sich in regelmäßigen Abständen abwechseln. Als Absorbermaterial wählt man Materialien mit einer hohen Ordnungszahl Z, z.B. Kupfer, Wolfram oder Blei. Im speziellen Fall des PLUG-Kalorimeters entschied man sich für die Verwendung von Kupfer als Absorbermaterial, das den Anforderungen bezüglich Strahlungs- und Wechselwirkungslänge gut gerecht wird[RUF92]. Die Wahl des sensitiven Materials fiel auf Silizium, da ein mit Silizium instrumentiertes Kalorimeter sich durch eine kompakte Bauweise, die Möglichkeit zum Betrieb bei Raumtemperaturen und durch ein gutes Signal-Rauschverhältnis auszeichnet. Aus Tabelle 2.1 kann man die für den geometrischen Aufbau relevanten Daten entnehmen.

Das PLUG-Kalorimeter besteht aus zwei Halbzylindern, die im Eisenjoch des H1-Experiments im Abstand von 4.76m bis 5.45m zum Wechselwirkungspunkt symmetrisch zum Strahlrohr instrumentiert sind. Man unterscheidet hier die Nord- bzw. Südhälfte des PLUGs. Jede der beiden Hälften besteht aus 8 Absorbern von je 7.5cm Stärke. Zwischen diesen Absorbern bzw. vor dem ersten Absorber(gesehen vom Wechselwirkungspunkt) sind insgesamt bis zu 8 Module eingebaut, die die Siliziumdetektoren enthalten. Abbildung 2.1 zeigt eine Skizze der Nordhälfte des PLUG-Kalorimeters eingebaut im Eisenjoch.

Die schraffiert angedeuteten Teile sind die erwähnten Module, die so konstruiert sind, daß sie zu Wartungszwecken leicht aus dem PLUG entfernt werden können, in dem man sie aus ihren Befestigungen löst und aus den

Gewicht	1480 kg
radiale Abmessungen (gesamt) (instrumentierter Teil)	 6 cm $\leq$ r $\leq$ 32 cm 6 cm $\leq$ r $\leq$ 25 cm
Position	476 cm $\leq$ z $\leq$ 545 cm
Gesamtlänge	69 cm $\hat{=}$ 4.3 λ
Gesamthöhe	26 cm $\hat{=}$ 1.7 λ
Winkelbereich	12.5 mrad $\leq \theta \leq$ 60 mrad $0.75^o \leq \theta \leq 3.4^o$
Zahl der Absorbereinheiten	8
Struktur der Module	7.5cm Cu + 400μm Si-detector
Schauervariablen in Cu	$1\ \lambda = 15.06cm$, $1\ X_0 = 1.44cm$
Detektorgröße	5 $\times$ 5 cm^2
Anzahl der Detektoren	672
Anzahl der Auslesekanäle	336
Winkelauflösung	4 mrad
Energieauflösung	$\approx$ 150% $/\sqrt{E}$

Tabelle 2.1: *Technisch Daten des PLUG-Kalorimeters*

Slots[2] herauszieht. Die Slots sind von 0 bis 8 durchnumeriert beginnend vom Wechselwirkungspunkt aus mit dem vor dem ersten Absorber liegendem Slot. Die jeweils im gleichen Slot liegenden Module der Nord- und Südhälfte bilden eine Detektorebene.

Im Jahre 1994 war das Kalorimeter mit 16 Modulen in 8 Detektorebenen in den Slots 0 bis 7 instrumentiert. In Slot 8 befand sich ein Modul, das Dosimeter enthielt.
1995 wurde das PLUG aus Gründen der besser Überwachung der einzelne Detektoren mit nur 8 Modulen in 4 Detektorebenen in den Slots 0 bis 3 bestückt. Somit war jeder Auslesekanal nur mit einem Detektor instrumentiert, im Gegensatz zu der '94 Strahlzeit, in der jeder Kanal mit zwei Detektoren bestückt war. Die freien Slots wurden mit Testdetektoren(MPI-Detektoren[3]) instrumentiert bzw. zu Dosimetermessungen genutzt.

---

[2] Bezeichnung für die Zwischenräume zwischen den Absorbern

[3] Detektoren, die am **M**ax-**P**lanck-**I**nstitut mittels Ionenimplantationsverfahren hergestellt wurden.

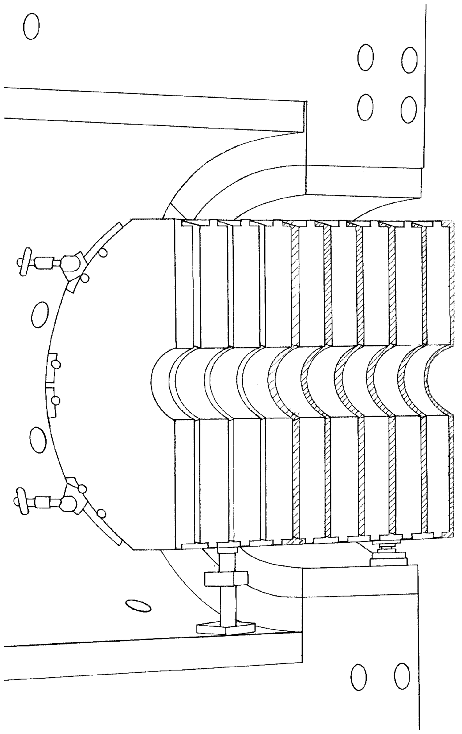


Abbildung 2.1: *Skizze der Nordhälfte des PLUG-Kalorimeters eingebaut im Eisenjoch des H1-Experiments.*

In Abbildung 2.2 ist ein Photo der Südseite des PLUGs während der Strahlperiode 1995 abgebildet. In der Mitte des PLUGs verläuft das Strahlrohr. Die Protonenrichtung verläuft von links nach rechts. Man erkennt deutlich seine Position im umgebenden Eisenjoch und den zur Abschirmung vor Synchrotronstrahlung im rückwärtigen Teil(aus Sicht der Protonen) liegenden C3-Kollimator. In den vier vorderen Slots sind die Module mit den darin eingebauten Detektoren instumentiert, während sich in den nachfolgenden Slots die zu Testzwecken eingebauten MPI-Detektoren und Dosimeter befinden. In denen mit weißem Klebeband zugeklebten Slots des Kupferabsorbers befinden sich die für das PTOF[4] benötigten Szintillatoren.

Die Module

Die Module sind aus verschiedenen Schichten aufgebaut. Die äußere Hülle wird von zwei 0.5cm dicken Kupferplatten gebildet, in deren Zwischenraum

---

[4] **P**lug-**T**ime-**o**f-**F**light; Hodoskop

Abbildung 2.2: *Photo des in der Strahlzeit '95 instrumentierten PLUG-Kalorimeter(Südseite)*

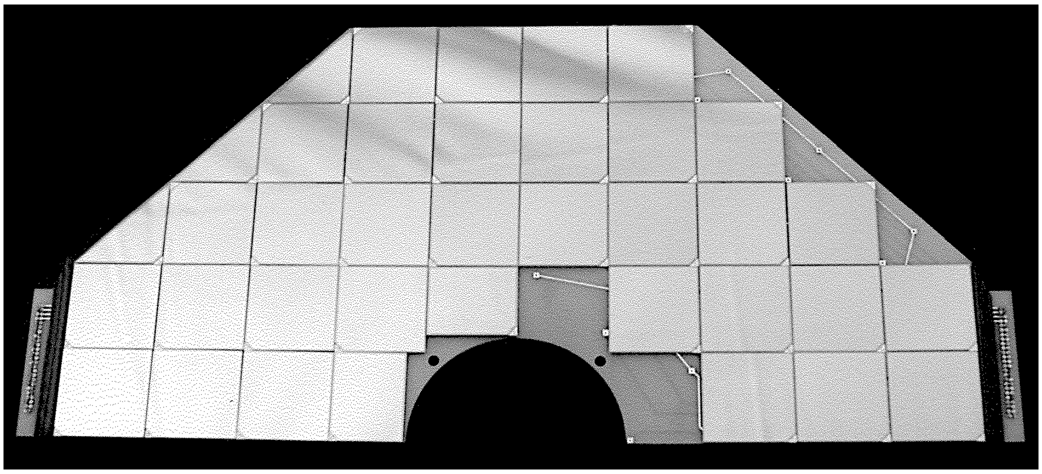


Abbildung 2.3: *Photo eines geöffneten PLUG-Moduls mit fünf nicht instrumentierten Detektoren*

eine G10-Platte montiert ist, auf der die Siliziumdetektoren befestigt, und die Leiterbahnen zur Signalauslese und Spannungsversorgung integriert sind.

Jedes Modul beinhaltet 42 Detektoren. Darin enthalten sind sechs dreieckige mit einer Fläche von $12.5cm^2$, vier rechteckige mit einer Fläche von $20cm^2$ und 32 quadratische Detektoren mit einer Fläche von $25cm^2$. Die Detektoren sind so an die vorgegebene Gesamtfläche angepaßt, daß sich die inaktive Fläche auf ca. 4% der Gesamtfläche minimiert. Für ein mit 16 Modulen vollinstrumentiertes PLUG-Kalorimeter benötigt man somit 772 Siliziumdetektoren. In der Strahlzeit 1995 war das PLUG-Kalorimeter mit 330 von 336 Detektoren bestückt. Die fehlenden sechs Detektoren waren Dreiecksdetektoren, die in Slot 0 der Südseite nicht instrumentiert waren. In der ersten Testphase des Einbaus mußten weitere sieben Detektoren entfernt werden, die sich aufgrund des hohen Rauschens als defekt erwiesen hatten.

Kapitel 3

Der Siliziumhalbleiterdetektor

Halbleiterdetektoren, und hier insbesondere Siliziumhalbleiterdetektoren, sind in den letzten Jahren ein wesentlicher Bestandteil von Experimenten in der Hochenergiephysik geworden, bei denen es um den Nachweis von ionisierender Strahlung geht. Hier werden sie schwerpunktmäßig als Detektoren mit hoher Ortsauflösung(z.B. Mikrostreifendetektoren) in Spurdetektoren oder als großflächige Detektoren in Kalorimetern eingesetzt.
Sie zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Unproblematische Verwendung unter normale Umgebungsbedingungen, wie z.B. Betrieb bei Raumtemperatur
- Kompakte Bauweise; ein entscheidenes Kriterium für die Verwendung im PLUG
- Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Magnetfelder; ein weiteres Kriterium für die Verwendung im PLUG
- gute Strukturierbarkeit auch in kleinsten Dimensionen z.B. Mikrostreifendetektoren
- sehr gute Energieauflösung; Energie zur Erzeugung eines Ladungsträgerpaares in Silizium 3.6eV [HNE65] ⇒ hohe Zahl von erzeugten Ladungsträgern ⇒ sehr gute Statistik
- energie- und teilchenunabhängige Eichung
- geringe Ladungssammlungszeiten im Bereich von 20ns[BER86] ⇒ hohe Zeitauflösung

Diese Eigenschaften haben vor allen Dingen in der Hochenergiephysik den vermehrten Einsatz von Siliziumdetektoren vorangetrieben.
Als Beispiel seien hier die zur Zeit in Planung befindlichen Experimente CMS und ATLAS am LHC[1] in Cern genannt, in denen Siliziumdetektoren als Spurdetektoren nahe der Wechselwirkungszone in hohen Stückzahlen eingebaut werden sollen.

3.1 Der Silizium-Detektor als Festkörperionisationskammer

Die Funktionsweise eines Siliziumdetektors kann am besten mit der einer Festkörperionisationskammer verglichen werden.
Der Detektor besteht prinzipiell aus einem isolierendem Einkristall, bei dem zwei gegenüberliegend aufgedampfte metallene Flächen die Elektroden bilden. Zwischen diesen wird durch das Anlegen einer Spannung ein elektrisches Feld erzeugt, das die beim Eindringen eines geladenen Teilchens in dem Kristall generierten Ladungsträgerpaare trennt und zu den jeweiligen Elektroden hinzieht. So wandern die positiven Löcher zur Kathode, während die Elektronen zur Anode hingezogen werden. Diese Ladungen werden an den Elektroden vollständig gesammelt und erzeugen nach entsprechender Verstärkung einen Spannungsimpuls, dessen Amplitude proportional zur im Detektorvolumen durch Ionisation deponierten Energie ist.
Für Teilchen, die im Detektorvolumen vollständig abgebremst werden, ist die Signalamplitude direkt proportional zur Energie der Teilchen. Teilchen hoher Energie wie z.B. minimal ionisierende Teilchen, die das Detektorvolumen durchqueren erzeugen entsprechend ein Signal, das der Höhe des Energieverlustes proportional ist.
Aus der Wahl einer Festkörperionisationskammer ergeben sich gegenüber der Verwendung einer Gasfüllung der Vorteil einer energie- und teilchenunabhängigen Eichung, da die zur Erzeugung von Elektronen-Loch-Paaren benötigte Energie in weiten Bereichen unabhängig von der Teilchenart und der Teilchenenergie ist.

Im nächsten Abschnitt soll im besonderen die Bau- und Funktionsweise eines Siliziumdetektors erklärt werden, wie er im PLUG-Kalorimeter Verwendung findet.

---

[1] **L**arge-**H**adron-**C**ollider

3.2 Bau- und Funktionsweise der im PLUG-Kalorimeter verwendeten Detektoren

Aus Abbildung 3.1 ist der prinzipielle Aufbau eines Oberflächensperrschichtdetektors, wie er im PLUG Verwendung findet, zu entnehmen. Diese Detektoren haben eine Fläche von 5x5cm^2 und bestehen aus einem hochohmigen n-Siliziumkristall mit einer Orientierung in 111-Richtung und einer Dicke von ca. 400μm. Auf der einen Seite des Kristalls wird eine Goldschicht als Sperrkontakt aufgedampft, während die andere Seite mit Aluminium bedampft wird und einen ohmschen Kontakt darstellt. Die Dicke der Goldschicht beträgt 20nm, die der Aluminiumschicht 370nm. Die Randflächen des Kristalls an der Ober- und Unterseite sind mittels eines thermisch gewachsenen Oxyds passiviert. Durch diese Randfläche verringert sich die eigentlich aktive Fläche des Detektors um ca. 4%. Die Überlappung des Siliziumoxids mit der Goldelektrode und dem darunterliegendem Siliziumhalbleiter ergibt eine MOS[2]-Struktur, deren Einflüsse auf den Detektor weiter unten beschrieben werden. Die oben beschriebene Struktur wird auf einem Siliziumwafer von 3 Zoll Durchmesser prozessiert, aus dem die Detektoren in der benötigten Form herausgesägt werden. Anschließend werden sie auf eine Keramikfassung geklebt, der Frontkontakt gebondet, und mit einem Schutzlack die Oberfläche versiegelt.
Eine nähere Beschreibung des Produktionsverfahrens entnehme man [FRE90].
Die Betriebsspannung, die an der mit Aluminium bedampften Seite angelegt wird, wird über einen Arbeitswiderstand zugeführt, über den das Ausgangssignal abgegriffen und durch einen zwischengeschalteten Koppelkondensator an den Vorverstärker weitergeleitet wird (siehe Abbildung 3.1). Der Vorverstärker integriert dieses Signal und man erhält eine Ausgangsspannung, deren Amplitude proportional zur im Detektor deponierten Energie ist.

Die Betriebsspannung ist so gewählt, daß der Detektor als Diode in Sperrichtung betrieben wird, wodurch innerhalb des Siliziumkristall ein Verarmungszone entsteht, deren Größe abhängig von der angelegten Spannung ist.
Beim Betrieb der PLUG-Detektoren wird die Spannung nach Möglichkeit so gewählt, daß der Detektor vollständig verarmt und so gewährleistet ist, daß die von der Primärstrahlung und ihrer Sekundärteilchen generierten Ladungsträger vollständig gesammelt werden.

Die Detektoren des PLUG-Kalorimeters sind zur optimalen Ausnutzung der

---

[2] **M**etal-**O**xid-**S**emiconductor

zur Verfügung stehenden Fläche in verschiedenen Formen gefertigt, wie im 2. Kapitel ausgeführt, weisen jedoch keinerlei Unterschiede in ihrem inneren Aufbau und ihrer Funktionsweise auf.

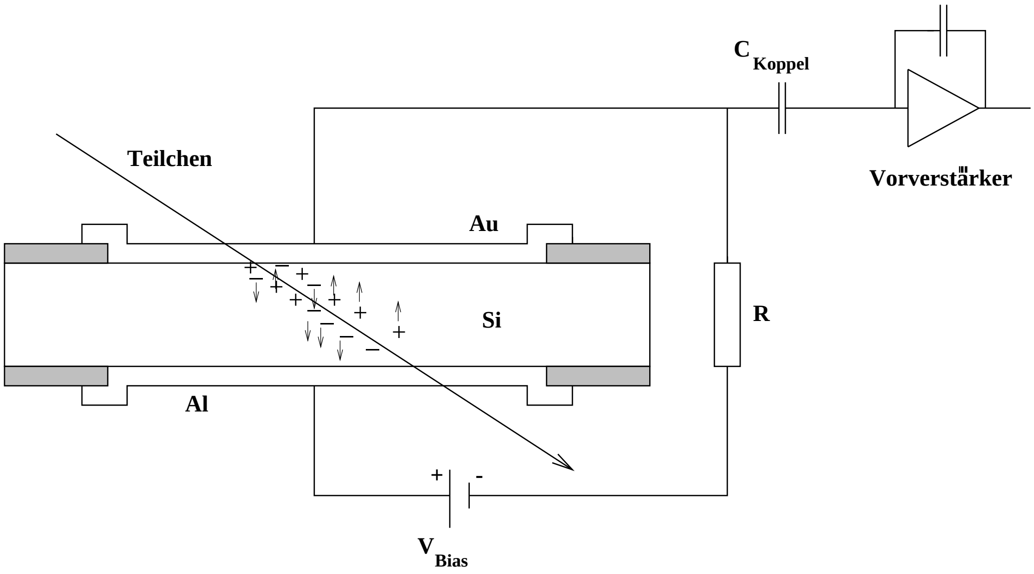


Abbildung 3.1: *Aufbau eines PLUG-Siliziumdetektors*

3.3 Kennlinien zur Charakterisierung der PLUG-Detektoren

Zur Überwachung der Detektoreigenschaften ist es notwendig, während des Betriebes verschiedene Detektorkennlinien messen zu können, die die Entwicklung des Detektors und die Änderung seiner Eigenschaften dokumentieren. Dazu gehören die Strom-Spannungskennlinien, die Kapazitäts-Spannungskennlinien sowie die Rausch-Spannungskennlinien. Aus der Veränderung dieser Kennlinien während der Strahlperiode ist es möglich,eine Detektordiagnose zu stellen und defekte Detektoren zu identifizieren.

Im folgenden werden die verschiedenen Kennlinien(Abbildung 3.2) für einen in Sperrichtung angeschlossenen Detektor dargestellt und kurz erläutert.

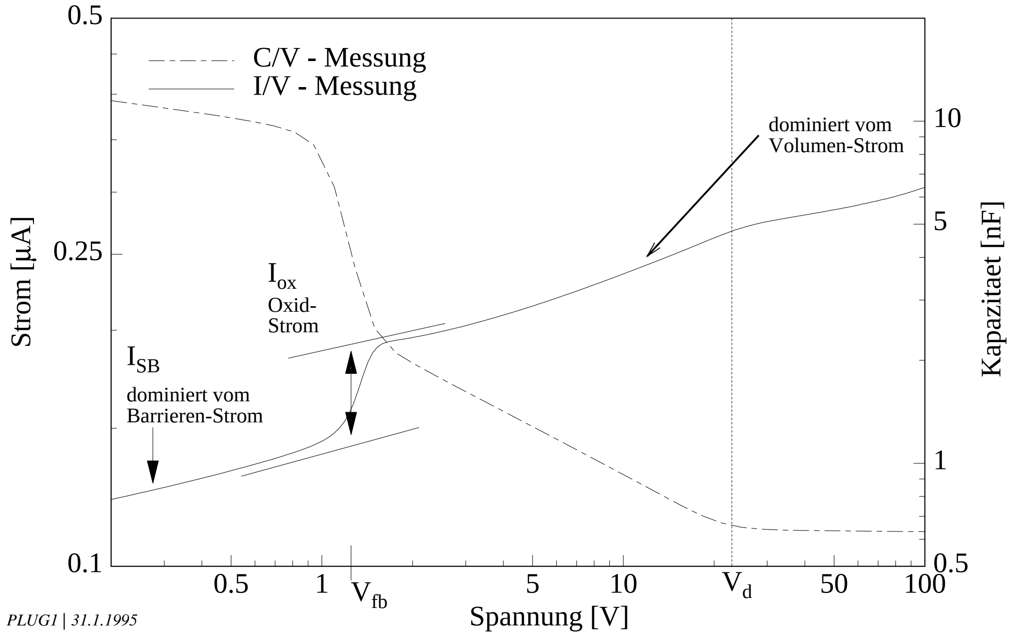


Abbildung 3.2: *Messung einer Strom- und Kapazitätsspannungs-Kennlinie eines Oberflächensperrschichtdetektors*

3.3.1 Die Kapazität-Spannungs-Kennlinie

Die Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie läßt Rückschlüsse auf die Eigenschaften und Zustände der Ladungen in der dünnen Si-SiO_2 Grenzschicht zu.

In Abbildung 3.2 ist die Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie für einen ungeschädigten Detektor aufgetragen. Im Bereich niedriger Spannungen mißt man eine hohe Kapazität von ca. 10nF. Mit steigender Spannung und Ausbreitung der Raumladungszone unter der Goldelektrode(siehe Abbildung 3.3) sinkt die Kapazität langsam, bis die angelegte Spannung groß genug ist, das Potential der unter dem Siliziumoxid akkumulierten Ladungen zu kompensieren. Bis zu dieser Spannung wird die Gesamtkapazität gebildet durch die Kapazität der Diode und der Kapazität des MOS-Kontaktes.
Im Bereich der Flachbandspannung nimmt die Gesamtkapazität korreliert zum Anstig des Sperrstromes ab. Mit weiter steigender Spannung breitet sich die Verarmungszone in Richtung des Rückkontaktes aus, wodurch die Kapazität des Detektors proportional zu $U^{-0.5}$ sinkt. Erreicht die Verarmungszone den Rückkontakt, so spricht man von einem vollständig verarmten

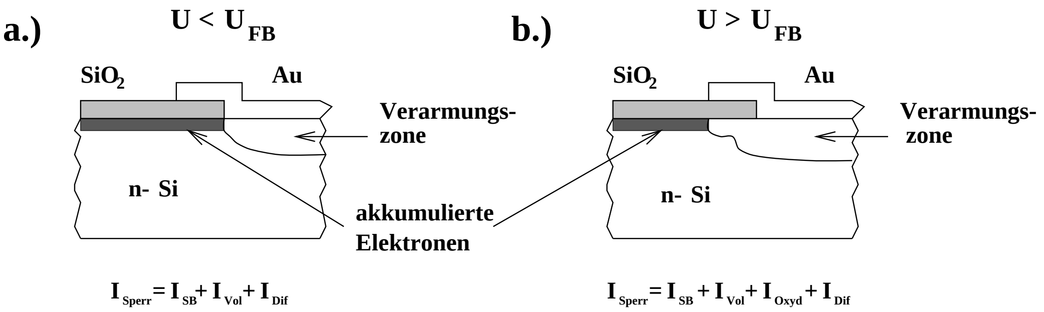


Abbildung 3.3: *Ausbreitung der Verarmungszone innerhalb eines Oberflächensperrschichtdetektors*
a.) Sperrspannung(U) unterhalb der Flachbandspannung(U_{FB}
b.) Sperrspannung oberhalb der Flachbandspannung; durch Erhöhung der Detektorspannung Kompensation der im SiO_2 *akkumulierten Ladungen, Ausbreitung der Verarmungszone unter die* SiO_2*2-Schicht lateral im Bereich des Au-*SiO_2*-Überlapps*

Detektor und die Kapazität bleibt konstant. Diesen Spannungswert nennt man Verarmungsspannung(U_{dep}).
Aus diesen Kurven kann man somit die für den Betrieb des PLUG-Kalorimeters wichtigen Werte der Flachband- bzw. Verarmungsspannung bestimmen. Für das gezeigte Beispiel bestimmt man die Flachbandspannung in grober Nährung als den Wendepunkt der C-V-Kurve bei ca. 1.3V und die Verarmungsspannung mit 22V.

Die Kapazität des Detektors ist demnach abhänging von der Ausdehnung der Raumladungszone innerhalb des Detektors. Die Raumladungszone als Funktion der Sperrspannung berechnet sich aus der Lösung der Poissongleichung:

$$-\frac{d^2\Phi_{(x)}}{dx^2} = \frac{q}{\epsilon_{Si}\epsilon_0}(N_D - N_A) = \frac{qN_{eff}}{\epsilon_{Si}\epsilon_0} \tag{3.1}$$

mit $\epsilon_0 = 8.85410^{-12}Fm^{-1}$, $\epsilon_{Si} = 11.9$

Zu beachten ist, daß die Donatoren(N_D) und Akzeptoren(N_A) homogen dotiert sind, und die Dichte der Raumladungen bei n-Material von den positiven Rümpfen der nicht kompensierten Donatoren gebildet wird, was der Definition von der effektiven Dotierung(N_{eff}) entspricht. Weiterhin kann der Spannungsabfall über dem nicht verarmten Gebiet vernachlässigt werden. Die Poissongleichung braucht nur für den eindimensionalen Fall gelöst werden, da die Breite des Detektors wesentlich größer als die Dicke ist. Durch Integration erhält man die Verarmungstiefe in Abhängigkeit von der angelegten Spannung(U):

$$x(U) = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si}\epsilon_0}{q|N_{eff}|}(U + U_{bi})} \qquad \text{für} \quad U < U_{dep} \tag{3.2}$$

mit U_{bi} = Kontaktspannung des Schottky-Kontaktes[3]

Die Kontaktspannung des Schottky-Kontaktes ist vernachlässigbar,da sie klein ist gegenüber der Verarmungsspannung und man erhält so eine Beziehung zwischen der effektiven Dotierung und der Verarmungsspannung bei einer vorgegebenen Detektordicke(D):

$$N_{eff} = \frac{2\epsilon_{Si}\epsilon_0}{qD^2}U_{dep} \tag{3.3}$$

Aus dieser Formel ist es somit möglich bei Kenntnis der Verarmungsspannung die effektive Dotierung zu berechnen.

Zur Berechnung der dynamischen Kapazität des Detektors ist die Ausdehnung der Verarmungszone im Detektor von entscheidener Bedeutung. Die dynamische Kapazität ist definiert durch:

$$C = \frac{dQ}{dU} \tag{3.4}$$

Variiert man die Detektorspannung durch Überlagerung mit einer kleinen Wechselspannung(dU), erhält man eine zeitliche Veränderung der Verarmungstiefe(dx) bzw. der Ausdehnung der Raumladungszone:

$$dQ = q|N_{eff}|Adx \tag{3.5}$$

mit A= Detektorfläche und unter Verwendung der Gleichungen 3.2 und 3.4 ergibt sich für die Beziehung zwischen Kapazität des Detektors und der angelegten Spannung folgende Abhängigkeit:

$$C(U) = A\sqrt{\frac{\epsilon_{Si}\epsilon_0 q|N_{eff}|}{2(U + U_{bi})}} \qquad \text{für} \quad U < U_{dep} \tag{3.6}$$

---

[3] Kontakt zwischen Halbleiter und Metall

Zur Berechnung der Endkapazität des Detektors kann man die Kontaktspannung(U_{bi}) vernachlässigen und setzt N_{eff} aus Gleichung 3.3 ein. Man erhält:

$$C(U_{dep}) = \frac{\epsilon_{Si}\epsilon_0 A}{D} \tag{3.7}$$

Für einen PLUG-Detektor mit A = $25cm^2$ und D = 400μm erhält man bei vollständiger Verarmung:

$$C(U_{dep}) = 650pF \tag{3.8}$$

Dies ist in guter Übereinstimmung mit den aus Kapazitätsmeßungen ermittelten Werten von ca. 630pF(siehe Abbildung 3.2).

3.3.2 Die Strom-Spannungs-Kennlinie

Abbildung 3.2 beschreibt auch den Verlauf des Stromes bei Variation der Spannung. Man erkennt, daß der Sperrstrom im Bereich kleiner Spannungen vom Barrierenstrom dominiert wird. Kommt man mit der Spannung in den Bereich der Flachbandspannung, so mißt man ein deutliches Ansteigen des Stroms, da sich die Raumladungszone unter dem Oxid ausdehnt und damit die Generationszentren am SiO_2-Si-Interface zum Strom beitragen können. Dieser Oberflächengenerationsstrom wird mit Oxidstrom bezeichnet. Hiernach steigt der Strom nur noch leicht an und wird durch den Volumenstrom dominiert.

Abbildung 3.3 zeigt schematisiert die Ausbreitung der Raumladungszone schematisiert und die Zusammensetzung des Gesamtstroms aus den Teilkomponenten. Bild a.) der Abbildung 3.3 beschreibt die Zusammensetzung des Sperrstromes unterhalb der Flachbandspannung.
Der Sperrstrom wird gebildet aus den Anteilen des Barrierenstroms, des Volumenstroms und des Diffusionsstroms. In Bild b.) addiert sich der Gesamtstrom aus den in a.) gezeigten Anteilen und dem Oxidstrom, der aus der Ausbreitung der Verarmungszone unter den Oxidrand resultiert, so daß die dort generierten Ladungen zum Gesamtstrom beitragen können.

Für die einzelnen Komponenten kann man folgende Formeln zur Berechnung verwenden[SZE82]).:

- **Barrierenstrom I_{SB}** :

  $$I_{SB} = I_S[1 - exp(-\frac{qU_D}{kT})] \tag{3.9}$$

  I_S bezeichnet den Sättigungsstrom :

  $$I_S = A^{**}T^2Aexp(\frac{-q\Phi_{Bn}}{kT}) \tag{3.10}$$

  mit A^{**} = effektive Richardson-Konstante = $124Acm^{-2}K^{-2}$[FEI96];
  Φ_{Bn} = Barrierenhöhe = 0.92eV; T = 300K
  q = Elementarladung = $1.6 * 10^{-19}$C

  Für einen quadratischen PLUG-Detektor ergeben sich ca. 92nA.

- **Volumenstrom I_V** :

  $$I_V = qn_i\frac{W_g}{\tau_g} \tag{3.11}$$

  mit
  n_i = intrinsische Ladungsträgerkonzentration = $8.5*10^9cm^{-3}$ bei 300K
  W_g = Generationsvolumen = $1cm^{-3}$ bei vollständiger Verarmung;
  τ_g = Generationslebensdauer = 10ms

  Damit ergibt sich ein Volumenstrom von I_V = 136nA bei einem quadratischen Detektor.

- **Grenzflächen-Generationsstrom(Oxidstrom)**[SCH95] I_{Oxid} :

  $$I_{Oxid} = qGA_{Au} \tag{3.12}$$

  mit A_{Au} = Fläche des Goldüberlapps und G = Generationsrate

  Mit der Generationsrate bezeichnet man die Zahl der pro Sekunde und Quadratzentimeter erzeugten Ladungsträger und berechnet sie unter der Voraussetzung, daß die Dichte der Generationszentren(D_{it}) eine gleichmäßige Energieverteilung in der Nähe der Mitte der Bandlücke hat, nach folgender Formel[NIC82]:

$$G = \frac{1}{2}\pi\sqrt{\sigma_n\sigma_p}v_{th}kTn_iD_{it} \tag{3.13}$$

mit
σ_n und σ_p = Einfangswirkungsquerschnitte für Elektronen(n) und Löcher(p);
$\sigma_n = \sigma_p = 10^{-15}cm^2$;
D_{it} = Grenzflächenzustandsdichte = $10^{11}\frac{1}{cm^2eV}$; v_{th} = thermische Geschwindigkeit $v_{th} = \sqrt{\frac{3kT}{m_{eff}}} = 10^7\frac{cm}{s}$

Daraus ergibt sich ein Oxidstrom von ca. 55nA.

- **Diffusionsstrom** I_{dif} in n-leitendem Material mit Löchern(p) als Minoritätsladungsträgern :

$$I_{dif} = \frac{qn_i^2L_pA}{|N_{eff}|\tau_p} \tag{3.14}$$

mit der mittleren Diffusionslänge der Löcher(L_p)

$$L_p = \sqrt{D_p\tau_p} = \sqrt{\frac{kT}{q}\mu_p\tau_p} \tag{3.15}$$

mit
τ_p = Löcher-Rekombinationslebensdauer; μ_p = Löcher-Beweglichkeit

Entsprechendes gilt für p-leitendes Material mit Elektronen als Minoritätsladungsträger.
Ein Vergleich mit dem Volumengenerationsstrom zeigt, daß der Diffusionstrom einen vernachlässigbar kleinen Beitrag zum Sperrstrom liefert[WUN86].

Eine Addition der verschiedenen Strombeiträge ergibt $I_{ges} = 283nA$ und stimmt gut mit dem aus der Abbildung 3.2 ablesenen Wert von ca. 300nA überein.
Bei einem geschädigtem Detektor ist nach den Beobachtungen während der Strahlzeit mit einer Erhöhung der Flachbandspannung aufgrund größerer Oxidladung, sowie einer Erhöhung des Stromes zu rechnen.

3.3.3 Die Rausch-Spannungs-Kennlinie

Ein wichtiger Faktor, der auf die Veränderung des Rauschens mit der Spannung Einfluß nimmt, ist die Kapazität. Vergleicht man die mittlere und untere Abbildung 3.4, in denen das Rauschen bzw. die Kapazität für eine PLUG-Detektor gegenüber der Spannung aufgetragen ist, so erkennt man, daß die Kapazität bei erreichen der Flachbandspannung(bei ca. 40V) aus den oben genannten Gründen stark abnimmt. In gleicher Weise nimmt auch das Rauschen des Detektors ab, während der Strom ab dieser Spannung aufgrund des zusätzlichen Oxidstroms ansteigt. In der Abbildung 3.4 (oben) ist dieser Anstieg nur geringfügig erkennbar, da der Detektor durch den Betrieb im PLUG-Kalorimeter einer Strahlenbelastung ausgesetzt war. Diese schädigt den Detektor, was eine Erhöhung des Volumenstroms zur Folge hat[JAR96], der den Strom dann dominiert. Der im Verhältnis geringere Oxidstrom wird somit nicht so auffällig, wie in Abbildung 3.2. Da die Ausleseelektronik einen starken Einfluß auf das Rauschen und die damit verbundene Meßgenauigkeit hat, wird auf das Rauschen erst in einem der nachfolgenden Kapitel eingegangen.

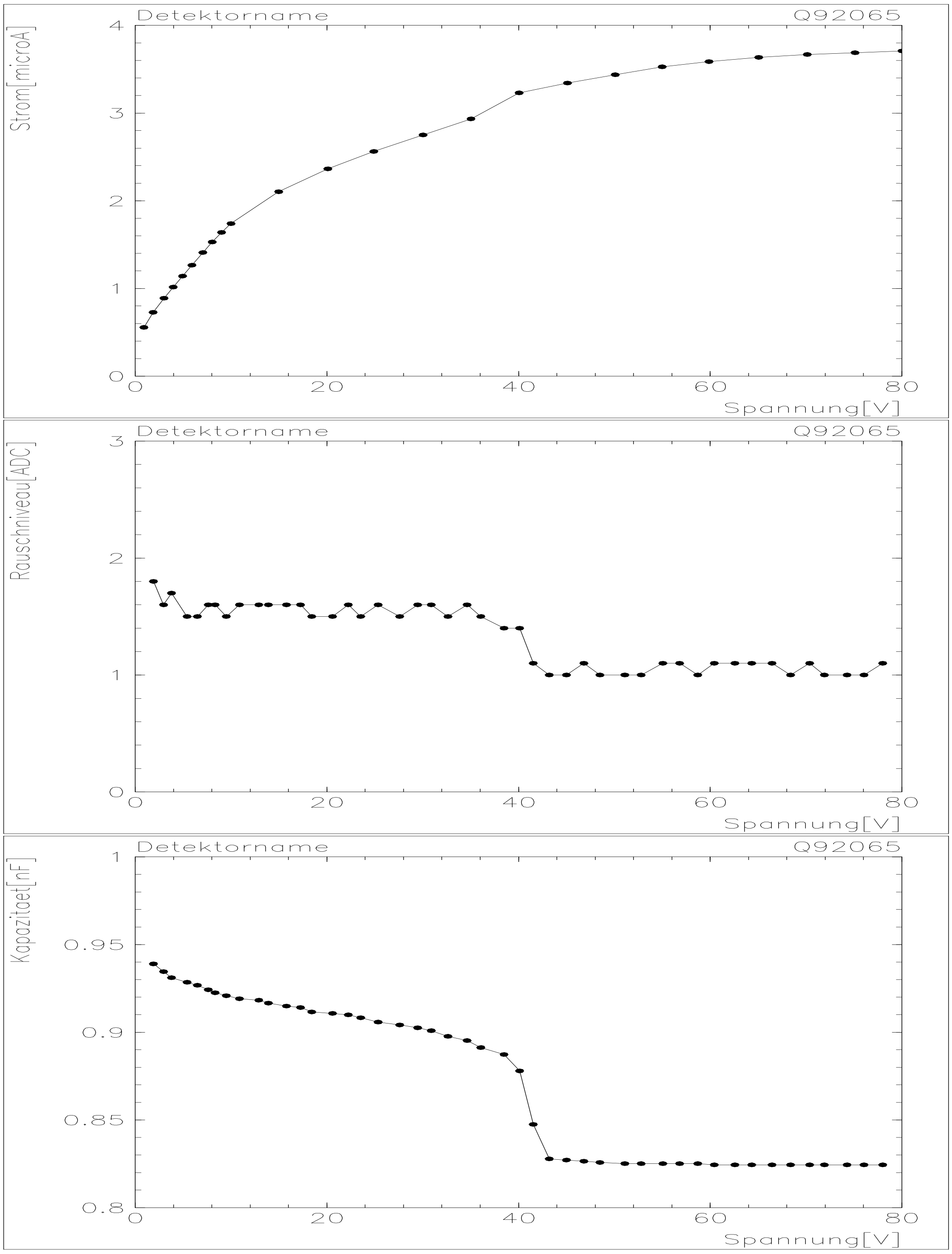


Abbildung 3.4:
Kennlinien des in der Strahlzeit '94 u. '95 genutzten und damit durch Strahlung geschädigten Detektors.
oben: Stromkennlinie des Detektors
mitte: Rauschkennlinie des Detektors Q92065; Abfall des Rauschens korreliert mit der Abnahme der Kapazität aufgrund des Kapazitiven Rauschens
unten: Kapazitätskennlinie des Detektors

Kapitel 4

Die Elektronik des H1-PLUG-Kalorimeters

4.1 Die Ausleseelektronik des PLUG-Kalorimeters

Die Ausleseelektronik des PLUG-Kalorimeters wurde vom LAr-Kalorimeter übernommen und an die Bedürfnisse des PLUGs angepaßt. Die Ausleseelektronik ist in mehrere Komponenten aufgeteilt wie aus Abbildung 4.1 zu ersehen ist.
Die Adapter- und Analogboxen sind so dicht wie möglich an den auszulesenden Signalen angebracht, damit die dem Vorverstärker vorgeschaltete Kapazität niedrig gehalten werden, da sie durch die Kabellänge beeinflußt wird. Man rechnet mit ca. $100\frac{pF}{mKabel}$.
Abbildung 4.1 zeigt die Verarbeitung der Daten und Ansteuerung der einzelnen Komponenten in einem Blockdiagramm[BER92].

Die Datenauslese

Steuerzentrale der Auslese ist der Signalgeber, der durch Ansteuerung der einzelnen Komponenten der Ausleseelektronik die zeitliche Abfolge zwischen den Auslese- und Übertragungsvorgängen steuert. Der Signalgeber erhält alle dafür nötigen Parameter über den VME-Bus[1]. Der Signalgeber wird angesteuert von der „HERA-Clock“[2], dem L1- und L2-Trigger und steuert nach deren Vorgaben die Signalauslese der Detektoren. Die Trigger stellen ein wichtiges Instrument zur Auswahl der Meßdaten dar, da aus dem Zusammenspiel der verschiedenen Einstellungen, wie z.B. Ansprechschwellen

---

[1] **V**ersa-**M**odul-**E**urope

[2] Die HERA-Clock gibt die zeitliche Abfolge der im HERA-Ring befindlichen Teilchenpakete an.

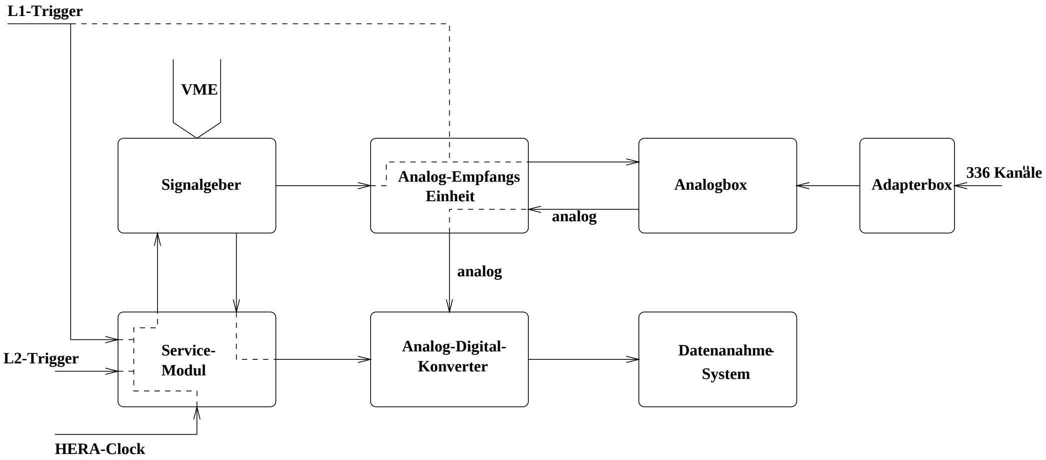


Abbildung 4.1: *Schematisierte Abbildung der Ausleseelektronik des PLUG-Kalorimeter bis zur Datennahme*

und Korrelationen zwischen verschiedenen H1-Subdetektoren, eine Selektion von physikalisch relevanten Daten gemacht werden kann.
Für das PLUG-Kalorimeter gibt es 336 Kanäle. Jedem Kanal ist ein Detektor zugeordnet(Stand Strahlzeit 1995), deren Signale mit Koaxialkabeln gleicher Länge an die vier Adapter- und Analogboxen weitergegeben werden. Diese Boxen übernehmen die Auslese und Signalverstärkung für einen Quadranten des PLUG-Kalorimeters, der aus 84 Kanälen besteht. Diese vier Systeme sind in unmittelbarer Nähe Kalorimeters montiert, um die Kabelkapazitäten, aus den oben genannten Gründen klein zu halten.
In Abbildung 5.2 sieht man die am Eisenjoch montierte Anordnung der Adapter- und Analogboxen um das Strahlrohr in den vier Quadranten Q1 bis Q4.

In den Adapterboxen ist auf den „Mergingboards“[3] ein passives Netzwerk zur Signalentflechtung und Addition, sowie die Verteilung der Spannungsversorgung und die Einspeisung der Pulsgeneratoren zur Kalibration integriert. Die verarbeiteten Signale werden weitergegeben an die Analogboxen, in denen sich auf den sogenannten „Motherboards“ der analoge Teil der Ausleseelektronik befindet. Die sechs Motherboards beinhalten je 16 Kanäle, wobei jedem Kanal ein Vorverstärker, ein Signalformer und ein „Sample and Hold“

---

[3] merge: engl. zusammenfassen

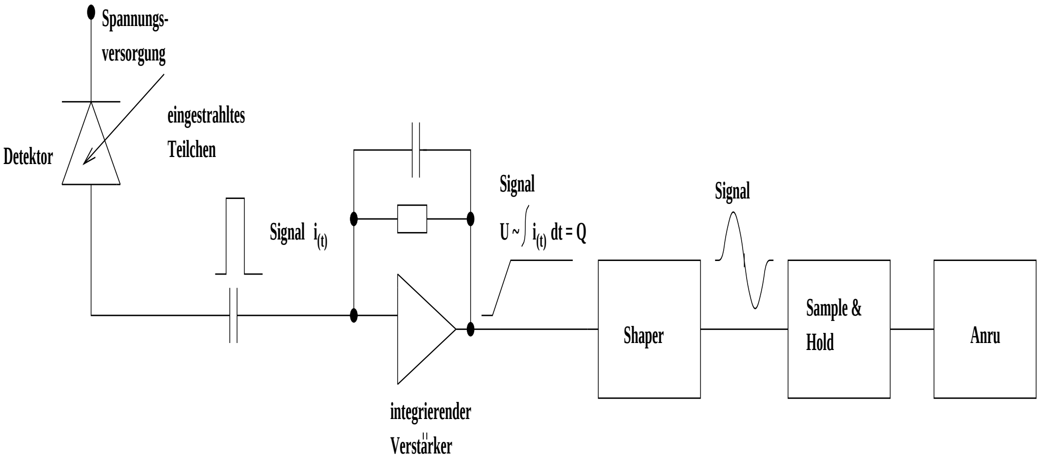


Abbildung 4.2: *Signale und Signalverarbeitung bis zur Übergabe der Signale an die Analog-Empfangseinheit im elektronischen Rucksack des H1-Detektors*

zugeordnet ist. Der dem Detektor nachgeschaltete ladungsempfindliche Vorverstärker macht aus dem Stromimpuls einen der gesammelten Ladung proportionalen Spannungsimpuls, der vom Signalformer(Shaper) bipolar geformt wird. Die „Sample and Hold“-Einheit hat die Aufgabe das Maximum des Spannungsimpulses zu halten, bis alle Signale im Zeit-Multiplexingverfahren ausgelesen und an die Analog-Empfangseinheit(ANRU[4]) weitergegeben werden. In der ANRU, die sich im „elektronischen Rucksack“ des H1-Detektors befindet, werden die Signale ein weiteres Mal untersetzt, so daß nur noch ein ADC[5] für die Verarbeitung aller 84 Kanäle eines Quadranten benötigt wird. Die Aufgabe des ADCs ist es, die Signale eines jeden Kanals in ihrer Höhe zu analysieren und einem digitalen Wert zu zuordnen. Über einen DSP[6] werden diese Daten dem zentralen Datenaufnahmesystem(DAQ[7]) zur Verfügung gestellt. Der DSP hat die Aufgabe, die vom ADC übermittelten Meßdaten mit den in der Kalibration ermittelten Kalibrationsfaktoren zu verknüpfen und aus ihnen die gemessene Energie zu berechnen. Des weiteren nimmt er bei gemessenen Daten eine sogenannten „Noise-Cut“ vor, bei dem Meßwerte die unterhalb einer einstellbaren Schwelle[8] liegen, unterdrückt werden. Dies

---

[4] **An**alog-**R**eceiving-**U**nit

[5] **A**nalog-**D**igital-**C**onverter

[6] **D**igital-**S**ignal-**P**rozessor

[7] **D**ata-**Aq**uisition

[8] Im allgemeinen wird dies als „σ-Cut“ bezeichnet, und zur Rauschunterdrückung genutzt. Im vorliegenden Fall wird normalerweise ein 2 σ-Cut gesetzt, d.h. es werden

gewährleistet, daß nach einem 2 σ-Cut nur noch ca. 3% der gemessenen Kanäle mit einem Rauschen, das diese Schwelle überschreitet, behaftet sind. Die vom DSP ermittelten Energiewerte werden dann an die Datenannahme weitergegeben und gespeichert.

Die Spannungsversorgung der Detektoren

Die in den Modulen montierten Detektoren sind zu Spannungsringen zusammengefaßt, die konzentrisch um das Strahlrohr angeordnet sind. In der '94 Strahlzeit waren im äußerstem Ring bis zu 14, im innersten bis zu 6 Detektoren an einen Spannungsring angeschlossen. In der Strahlzeit '95 wurde die Konfiguration des PLUG-Kalorimeters geändert, in dem die Zahl der Detektoren halbiert wurde, so daß im innerste Spannungsring drei Detektoren im äußerstem sieben Detektoren versorgt werden. Aus Abbildung 4.3 kann man die Verteilung der Spannungsringe für die '95 Strahlzeit ersehen. Für die in dieser Abbildung gezeigten Quadranten Q1 und Q4 gilt, daß Detektoren, die einen gemeinsamen Spannungsring haben, durch die mit Punkten versehenen Linien gekennzeichnet sind.
Abbildung 4.4 zeigt eine detailliertere Darstellung mit den an der Spannungsversorgung vorgenommenen Änderungen und an die Auslese gekoppelten Zweige(s. Abbildung 4.5.
Aufgrund der Zusammenfassung zu Spannungsringen ist es nicht möglich während des Betriebes den Strom für jeden einzelnen Detektor zu messen. Stromkennlinien, die in dieser Arbeit gezeigt werden, sind immer so aufgetragen, daß der Gesamtstrom geteilt durch die Anzahl der im Spannungsring liegenden Detektoren gezeigt ist. Eine nähere Beschreibung findet man in [JAR96].

4.2 Kalibrationssystem des PLUG-Kalorimeter

Das Kalibrationssystem des PLUG-Kalorimeters hat die Aufgabe sicherzustellen, das während des Betriebes auftretende Veränderungen an der Ausleseelektronik, insbesondere die Veränderung der Verstärkungsfaktoren zu erkennen und in die Datenauswertung einfließen zu lassen. Aus diesem Grund werden in kontinuierlichen Zeitabständen Kalibrationen durchgeführt, in denen die Parameter der Elektronik wie z.B. Verstärkungsfaktoren und „Offsets“ ermittelt werden.

---

nur Meßdaten ausgelesen und an die Datenannahme weitergegeben, die oberhalb dieser Schwelle liegen.

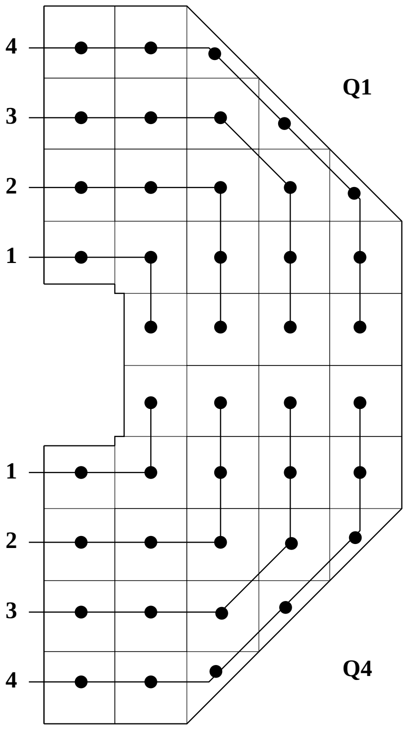


Abbildung 4.3: *Verteilung der Spannungsring innerhalb eines Detektormoduls*

Hierzu wird mittels eines Pulsgenerators ein Signal definierter Signalhöhe in die Kette der Ausleseelektronik eingekoppelt, und die gemessenen Daten durch ein Programm ausgewertet und die Ergebnisse abgespeichert. Dem Kalibrationssystem des PLUG-Kalorimeters stehen 32 Präzisionspulser zur Verfügung, von denen jeweils zwei einen elektronischen Kanal pulsen. Je 8 dieser Generatoren versorgen einen Quadranten und sind zur Messung der Spannungsabhängigkeit der Detektorkapazität so verteilt, daß zwei in einem Auslesekanal zusammengefaßte Detektoren von zwei verschiedenen Generatoren gespeist werden.

Die Pulser bestehen aus je einem DAC[9], der durch ein OS9-System[10] auf eine gewünschte Signalhöhe eingestellt werden kann und dann entsprechende Pulse aussendet. Mit den dem PLUG-Kalorimeter zur Verfügung stehenden Pulser hat man die Möglichkeit programmgesteuert Rechteckimpulse von

---

[9] **D**igital-**A**nalog-**C**onverter

[10] Rechnersystem, das den H1-Kalorimetern zur Steuerung der Kalibration zur Verfügung steht.

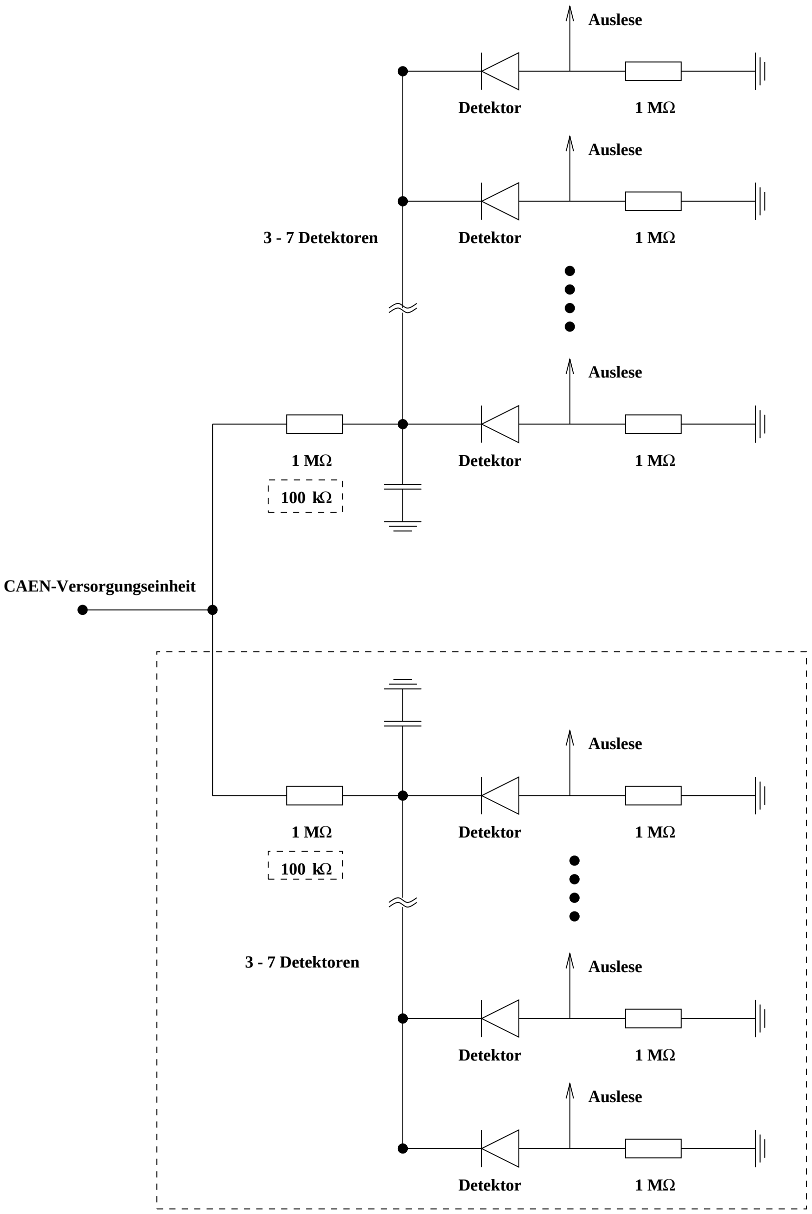


Abbildung 4.4: *Spannungsversorgung der PLUG-Detektoren für die '94 und '95 Strahlzeit(ohne die in der Rahmung befindlichen Schaltungselemente)*

16.4μs Dauer zwischen 0V und -1V mit einer Auflösung von ca. 0.02mV in die elektronische Kette einzukoppeln. In Abbildung 4.5 ist eine schematisierte Schaltung des Kalibrations- und Auslesesystems wiedergegeben.

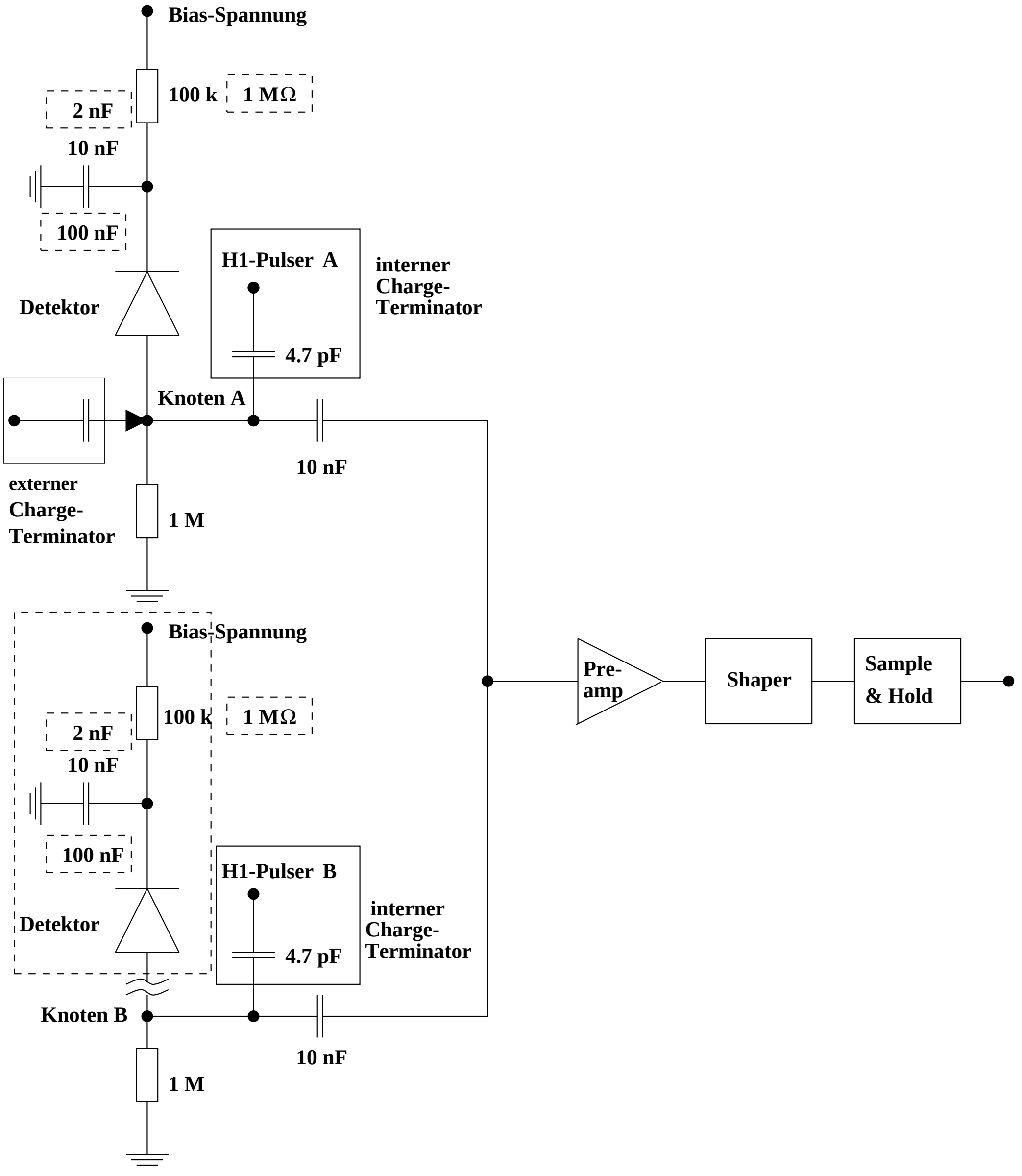


Abbildung 4.5: *Blockschaltbild der H1-Ausleseelektronik für das PLUG-Kalorimeter*

Nicht berücksichtigt wurde in dieser Abbildung die Zusammenfassung von mehreren Detektoren in einem Spannungsring(s. Abbildung 4.4). Mittels dieser H1-Pulser A und B bringt man eine wohldefinierte Ladung in das

System ein, in dem man die Pulshöhe variiert. Nach der Formel

$$\Delta Q = C * \Delta U \tag{4.1}$$

mit ΔQ = Ladungsmenge; C = Kapazität und ΔU = Spannungssprung, wird auf dem Kondensator(4.7pF) eine Ladung erzeugt, die von der im Abschnitt 4.1 beschriebenen Ausleseelektronik verarbeitet wird. Ist die einkoppelte Ladung bekannt, so kann man den Zusammenhang zwischen Auslesewert in $ADC_{Einheiten}$ und eingekoppelter Ladung errechnen und erhält so eine Eichkurve für den jeweiligen Kanal.
Gesteuert werden die Testpulser durch das Programm „plug“, das ein Unterprogramm(„Level Ramp“) enthält, mit dem den Pulsern verschiedene Parameter übergeben werden können, wie z.B. die Schrittweite[$DAC_{Einheiten}$] und die Anzahl der Pulsereinstellungen sowie die Pulser mit denen gearbeitet wird.
Das normale Verfahren besteht darin, alle 32 Pulser zu nutzen und diese mit den gleichen Parametern zu starten. Von dem Programm werden die Testpulser so gesteuert, daß alle 336 Kanäle gleichzeitig ein Reihe von vorgewählten Pulshöhen(Pulserpunkte) durchlaufen, und für jeden Kanal die Daten abgespeichert werden. Begonnen wird mit Pulsniveau Null, d.h. die Pulser werden nicht betrieben. Dies dient zur Festlegung des Offsets des ADCs. Die nächste Pulseramplitude ist die kleinstmöglichen Pulsereinstellung von $128 DAC_{Einheiten}$ als Pulserpunkt 1, darauf der Pulserpunkt 2 mit $1028 DAC_{Einheiten}$ und von hier an mit einer Schrittweite von $1028 DAC_{Einheiten}$ bis zur im Programm „Level Ramp“ eingestellten Anzahl von Punkten. Jede Pulsereinstellung wird ca. 250 mal gepulst und ausgelesen. Aus den Auslesewerten eines jeden Pulsniveaus wird ein Mittelwert und die Standardabweichung gebildet, die mit dem Rauschen dieser Pulsamplitude gleichzusetzen ist.
Dieser Wert für die Standardabweichung wird zusammen mit dem Mittelwert in $ADC_{Einheiten}$ und der Pulshöhe in $DAC_{Einheiten}$ in eine Datei geschrieben und zur späteren Auswertung abgespeichert.

Berechnet werden die Mittelwerte und Standardabweichungen nach folgenden Formeln:

N Messungen für jedes Pulsniveau

$$ADC_{Einheiten,1}, ..., ADC_{Einheiten,N_i} \equiv S_1, ..., S_{N_i} \tag{4.2}$$

mit i = Testpulsamplitude in $DAC_{Einheiten}$

Mittelwertbildung

$$< S >_i = \frac{\sum S_i}{N} \tag{4.3}$$

Standardabweichung

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_1^N (S_i - < S >)^2}{N-1} \tag{4.4}$$

Zur Auswertung dieser Daten steht dem PLUG-Kalorimeter ein Auswertungs(„FC“)- und Kalibrationsprogramm(„FCD“) zur Verfügung. Mit dem Programm „FC“ kann man die Qualität der genommenen Daten einer ersten Überprüfung unterziehen, da es z.B. aus Gründen von Übertragungsfehlern oder zufällig registrierter Teilchen im Detektor zu Verfälschungen der Kalibrationsdaten kommen kann. Aus diesem Grund werden mindestens drei Kalibrationen gemacht.
Das Auswertungsprogramm „FC“ und das Kalibrationsprogramm „FCD“ unterscheiden sich nur insofern, daß das Programm „FCD“ die ermittelten Kalibrationsparameter in eine Datenbank schreibt, aus der dem DSP diese Parameter bekannt gemacht und zur Energieberechnung verwendet werden.
In beiden Programmen werden die Daten für jeden Kanal durch ein Polynom 3. Grades angenähert, um mögliche Nichtlinearitäten der Elektronik zu erfassen und in der Datenauswertung zu berücksichtigen. Aus den ermittelten Koeffizienten des Polynoms wird dann eine Entscheidung über die Qualität bezüglich der Linearität und des Rauschens des jeweiligen elektronischen Kanals getroffen. Aus den drei genommenen Datensätzen wird derjenige zur endgültigen Kalibration ausgewählt, der aufgrund seiner Endergebnisse die geringsten defekten elektronischen Kanäle aufweist.
Die folgende Formel zeigt das Polynom und aus der Tabelle 4.1 kann man die oberen Grenzwerte für die Koeffizienten des Polynoms entnehmen.

$$Q = P_0 + P_1 ADC_{Einheiten} + P_2 ADC_{Einheiten}^2 + P_3 ADC_{Einheiten}^3 \tag{4.5}$$

Werden diese Koeffizienten, die aus Erfahrungswerten gewonnen sind, in ihrem Wert überschritten, so wird dieser Kanal aus der Datenannahme entfernt.
Weiter erkennt man aus den Koeffizienten P2 und P3, das die Abweichungen von der Linearität sehr gering sind.

Während der Nutzung des Kalorimeters im Strahlbetrieb ist es so möglich

Koeffizienten(P_i)	Wert
P_1	0.0156
P_2	$0.762 * 10^{-5}$
P_3	$0.298 * 10^{-7}$
Rauschen	$<5ADC_{Einheiten}$

Tabelle 4.1: *Auswahlkriterien der Kalibration zur Charakterisierung von defekten elektronischen Kanälen*

eine Kalibrationen der Ausleseelektronik vorzunehmen und eventuelle Veränderungen festzustellen und defekte Kanäle aus der Datenannahme zu eliminieren. Als Voraussetzung für die Durchführung einer Kalibration ist es notwendig, daß es keinerlei Strahlaktivität gibt, da sonst die Kalibration durch im PLUG-Detektor registrierte Ereignisse verfälscht werden kann.

4.2.1 Verhalten der PLUG-Elektronik

In der Abbildung 4.6 sind verschiedene Histogramme und Kurven aufgetragen, die die Stabilität der Elektronik belegen. Die Histogramme a.) und b.) der Abbildung 4.6 zeigen die „Pedestals“ und die Steigungen der Pulser für eine Kalibration, die am 04.07.95 durchgeführt worden ist. Diese Messungen stehen exemplarisch für alle während der Strahlzeit 1995 durchgeführten Kalibrationen.

Zu den für eine Kalibration relevanten Daten gehören die Werte der Steigung, die aus der Fitfunktion der gemessenen Energie in Abhängigkeit von der durch die Kalibrationspulsern eingekoppelten Ladung ermittelt wird, und der Wert des Pedestals. Das Pedestal ist der vom ADC für jeden Kanal ausgelesenen Wert bei der Pulseramplitude = 0, d.h. die Pulser sind nicht in Betrieb. Aus der Abbildung a.) erkennt man, daß der Mittelwert für den Pedestal bei ca. $200ADC_{Einheiten}$ mit einer Standardabweichung von ca. 3.5% liegt. Vergleicht man diese mit den am 11.12.95 zum Ende der Strahlzeit ermittelten Pedestals und Steigungen(Abbildung 4.6 c.) und d.)), so stellt man nur eine geringe Verschiebung fest, die keine signifikanten Auswirkung auf die Datenauswertung hat, da eine Verschiebung von $0.1ADC_{Einheiten}$ im Bereich der Auflösung des ADCs liegt, wie man aus der Abbildung 3.4(Mitte) ersehen kann. Darunter ist die zeitliche Entwicklung des Pedestals für den Kanals 112 in der Strahlzeit 1995 aufgetragen, aus der man im Rahmen der Meßgenauigkeit eine sehr gute Stabilität des Pedestals ableiten kann. Auch die zeitliche Entwicklung der Steigung in der Strahlzeit für den Kanal 112 zeigt, wie alle anderen Kanäle, die nicht von technischen Störungen betroffen sind, eine sehr gute Stabilität. Eine Veränderung der Steigung würde bedeuten, daß sich der Verstärkungsfaktor der Elektronik geändert hätte.

4.2.2 Rauschverhalten der PLUG-Elektronik

Für das Rauschverhalten der Elektronik und der Siliziumdetektoren ist das Ersatzschaltbild des integrierenden Vorverstärker und des nachgeschalteten Shapers entscheidend. Aus Abbildung 4.7 ist dies für RC-Vorverstärker und einen nachgeschalteten CR-Shaper zu entnehmen. Für die Berechnung des Rauschens werden in die Schaltung Rauschquellen in Form einer zusätzlichen Spannungsquelle bzw. Stromquelle, die das Rauschen simulieren, aufgenommen, wobei die zum Vorverstärker parallel geschaltete Stromquelle den Detektorstrom bzw. das durch den Detektorstrom erzeugte Stromrauschen darstellt(paralleles weißes Rauschen). Die zum Vorverstärker in Reihe geschaltete Spannungsquelle stellt das durch die Eingangskapazität des FETs[11] hervorgerufene serielle Rauschen dar.

Zur Berechnung des am Ausgang des „Shapers“ auftretenden Rauschens benötigt man die Übertragungsfunktion des elektronischen Systems bestehend aus Vorverstärker und Shaper. Diese wird gegeben durch[GOU82]:

$$G_{(f)} = 2\pi f \frac{\tau_0}{1 + 4\pi^2 f^2 \tau_0} \tag{4.6}$$

mit f = Frequenz und τ_0 = Shaping-Zeitkonstante

Für das Rauschspannungsquadrat des Schrotrauschens(U_Δ) und des Stromrauschens(U_S) erhält man mit den in der Abbildung gezeigten Gleichungen und unter Berücksichtigung, das für das Signal eines Elektronen-Loch-Paares gilt:

$$Signal = \frac{q}{Ce} \tag{4.7}$$

Dies gilt unter der Voraussetzung, daß die beiden RC-Zeitkonstanten für den im Vorverstärker und Shaper verwendeten RC-Integrator und RC-Differentiator gleich sind, und so die Pulshöhe des differenzierten und integrierten Ausgangspulses als $\frac{1}{e}$ (e = Eulersche Zahl = 2.71) berechnet werden kann.

---

[11] **F**eld-**E**ffekt-**T**ransistor

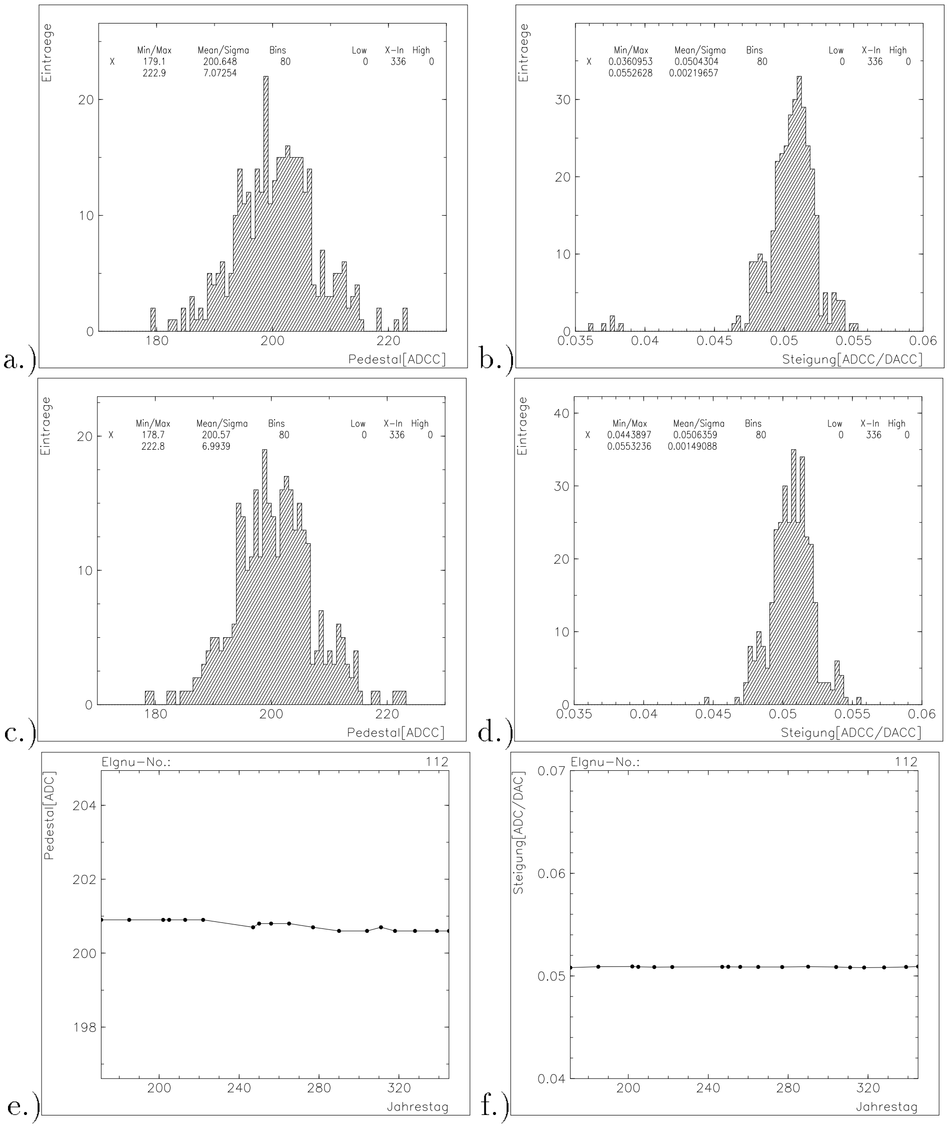


Abbildung 4.6: *Abb. a.) u. b.) Verteilung der Pedestals und der Steigungen aller 336 Kanäle des PLUGs gemessen am 04.07.95;*
Abb. c.) u. d.) Verteilung der Pedestals und der Steigungen aller 336 Kanäle des PLUGs gemessen am 11.12.95;
Abb. e.) u. f.) Stabilität der Pedestals und der Steigung am Beispiel des elektronischen Kanals Nr. 112

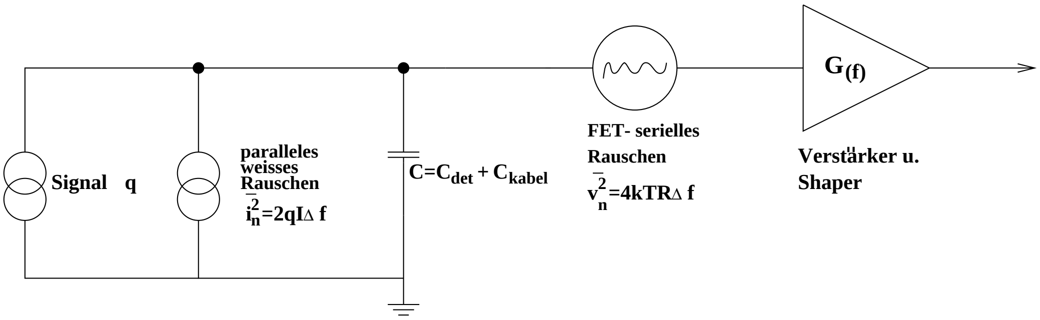


Abbildung 4.7: *Ersatzschaltbild inklusive Rauschquellen für den Vorverstärker der einzelne Auslesekanäle;* $\widehat{v_n}$ = *Rauschspannung und* $\widehat{i_n}$ = *Rauschstrom*[GOU82]

Für das serielle Rauschen am Ausgang mit der Angabe aus Abbildung 4.7 gilt:

$$< U_\Delta^2 >= \int_0^\infty 4kTR_{eq}(G_{(f)})^2 \, df \tag{4.8}$$

$$\frac{< U_\Delta^2 >}{Signal^2} = \frac{4kTR_{eq}C^2e^2}{q^2} \int_0^\infty G_{(f)}^2 \, df \tag{4.9}$$

Für das parallele Rauschen gilt entsprechend:

$$< U_S^2 >= \int_0^\infty \frac{2qI}{4\pi^2 f^2 C^2}(G_{(f)})^2 \, df \tag{4.10}$$

$$\frac{< U_S^2 >}{Signal^2} = \frac{e^2 I}{2\pi^2 q} \int_0^\infty \frac{(G_{(f)})^2}{f^2} \, df \tag{4.11}$$

Setzt man Gleichung 4.6 in die Gleichungen 4.9 und 4.11 ein, so erhält man als Ergebnis die Anzahl der dem Rauschen entsprechenden Elektronen-Loch-Paare(ELP) für das Strom- bzw. Schrotrauschen:

$$< N_\Delta^2 >= \frac{kTC^2e^2R_{eq}}{2q^2\tau_0} \simeq \frac{kTC^2e^2}{2q^2\tau_0 g_m} \tag{4.12}$$

$$< N_S^2 >= \frac{Ie^2\tau_0}{4q} \tag{4.13}$$

mit dem äquivalenten Rauschwiderstand eines FETs

$$R_{eq} = \frac{A}{g_m}, \tag{4.14}$$

wobei A eine von der Geometrie des FETs abhängige Konstante ist, die in guter Näherung mit 1 bestimmt werden kann.
Aus der quadratischen Summation der beiden Rauschanteile berechnet sich das Gesamtrauschen der Elektronik.

Im speziellen Fall der PLUG-Elektronik errechnet man zum Beginn der Strahlperiode für einen typischen Auslesekanal mit einer Eingangskapazität additiv gebildet aus einer Kabelkapazität von 250pF und einer Detektorkapazität von 650pF am Vorverstärker, einem Sperrstrom der Größenordnung $0.5\mu A$, einer Shaping-Zeitkonstanten $\tau_0 = 2\mu s$, einer Leitfähigkeit $g_m = 5\frac{mA}{V}$ und einer Temperatur von ca. 300K für die Anteile des Rauschens:

$$\begin{aligned} < N_{ges}^2 > = < N_\Delta^2 > + < N_S^2 > &= \frac{kTC^2e^2}{2q^2\tau_0 g_m} + \frac{Ie^2\tau_0}{4q} \\ &\simeq (4.8 * 10^7 + 1.1 * 10^7)ELP^2 \end{aligned} \tag{4.15}$$

$$< N_{ges} > \simeq 7700ELP \tag{4.16}$$

Vergleicht man diese Zahl mit der von einem MIP generierten Ladungsträgerzahl, das in den im PLUG-Kalorimeter verwendeten Siliziumdetektoren eine Energie von 140keV deponiert, so erhält man:

$$N_{MIP} \simeq \frac{140keV}{3.6eV} = 3.9 * 10^4 ELP \tag{4.17}$$

Und damit ein Signal-Rauschverhältnis von 5:1.

Kapitel 5

Umbaumaßnahmen zur Verbesserung der PLUG-Elektronik

Nach Einbau der PLUG-Elektronik 1992 zeigte sich ein ungewöhnlich hoher Rauschpegel bei den durchgeführten Messungen, der vermutlich durch die Einstreuung von Störsignalen und der schlechten Erdung der Adapter- und Analogboxen hervorgerufen wurde.
Dies versuchte man zu beseitigen, in dem die Gehäuseteile der Frontend-Elektronik leitend miteinander verbunden wurden, um sie so auf ein gemeinsames Potential zu legen. Diese Maßnahmen zeigten den erwünschten Erfolg in einer Abnahme des Rauschniveaus. Da die Adapter- und Analogboxen während dieser Arbeiten im H1-Detektor montiert waren, konnten sie nicht im gewünschten Umfang durchgeführt werden und es konnte nur eine provisorische Lösung gefunden werden.
Um die Erdung der Elektronik weiter zu verbessern, sollten die Adapter- und Analogboxen vom Eisenjoch demontiert, und die Gehäuseteile durch verzinktes Stahlblech ersetzt werden. Im Rahmen dessen sollten weiterhin Änderungen an der Spannungsversorgung der Detektoren und am Kühlsystem der Adapter- und Analogboxen durchgeführt werden.

Ein wichtiger Grund für die Herabsetzung des Rauschens ist beispielsweise die Verwendung des PLUGs als Veto zur Erkennung diffraktiver Events, d.h. Kollisionen von Positronen und Protonen im H1-Experiment bei denen keinerlei Energie im Vorwärtsbereich des H1-Detektors deponiert wird. Daher möchte man die Energieschwelle zur Erkennung diffraktiver Ereignisse möglichst niedrig halten.

Im nachfolgenden sind die umfangreichen Änderungen an der Konstruktion der Adapter- und Analogboxen und der Spannungsversorgung beschrieben.

5.1 Änderungen an der Detektorspannungsversorgung

In den vorangegangenen Strahlzeiten gab es verschiedentlich Probleme mit der Spannungsversorgung der Detektoren aufgrund der Erhöhung des Detektorsperrstroms.
Der gemessene Sperrstrom nimmt, hervorgerufen durch Strahlungsschäden, für einzelne Detektoren in einem Spannungsring während der Betriebsphase des H1-Detektors zu. Abbildung 5.1 zeigt die Entwicklung des Stromes am Beispiel des Spannungskanals 29 für die '95 Strahlzeit. Man erkennt deutlich, daß der Strom im Lauf der Strahlperiode auf über $200\mu A$ steigt. Ein Strom dieser Höhe konnte von der eingebauten Spannungsversorgung(CAEN-Module) aufgrund der geringen Ausgangsleistung nicht geliefert werden. Daher wurden in der Strahlzeit '95 ein Austausch der CAEN-Module vorgenommen, und diese durch CAEN-Module ersetzt, die einen maximalen Strom bis $500\mu A$ liefern können.

Aufgrund des hohen Stroms, den man auch während der '94 Strahlzeit beobachten konnte, fiel über den Vorwiderstand der Spannungsversorgung(Abbildung 4.5) ein großer Anteil der angelegten Spannung($1\frac{V}{\mu A}$) ab. Dies kann zur Folge haben, daß bei Anstieg des Dunkelstroms für einen einzelnen Detektor im Spannungring die anderen Detektoren aufgrund der über den Vorwiderstand abfallenden Spannung nicht mehr vollständig verarmt werden können. Da diese Stromanstiege in relativ kurzen Zeiträumen erfolgen können, wie aus der Abbildung 5.1 zu entnehmen ist, müßte die Spannungsversorgung ständig überwacht und nachreguliert werden. Dies ist jedoch aufgrund der Struktur der Programme und Kontrollmechanismen des H1-Experiments ein schwierig zu lösendes Problem.

Eine einfache Lösung dieses Problems ist die Änderung des Vorwiderstandes auf einen kleineren Wert. Hierzu mußten jedoch die Adapter- und Analogboxen vollständig demontiert werden, da sich die Vorwiderstände der Spannungsversorgung innerhalb der Adapterbox auf den „Multilayer-Boards“ befinden.

In Abbildung 4.5 ist die Spannungsversorgung für zwei Detektoren darge-

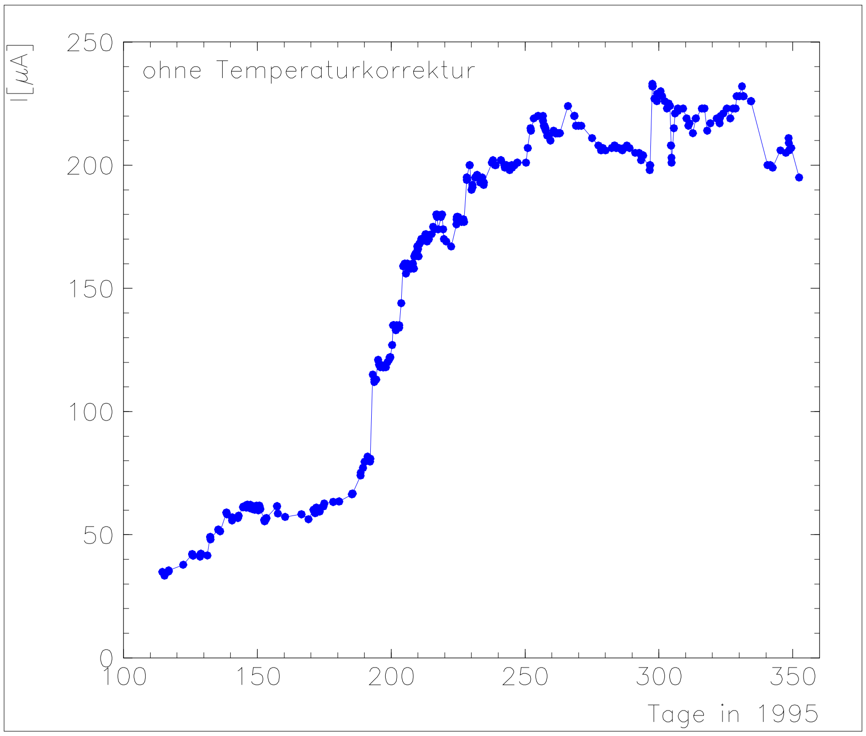


Abbildung 5.1: *nicht temperaturkorrigierte Strommessung des Spannungskanals 29 am 24.11.95*

stellt. Die in unterbrochenen Linien dargestellten Werte bzw. Elektronikkomponenten stellen den Zustand 1994 dar. Zu beachten ist, daß nicht ein einzelner Detektor an einer Spannungsversorgung angeschlossen ist, sondern zwischen drei und sieben Detektoren durch Parallelschaltung zu einem Spannungsring zusammengefaßt sind. Der Vorwiderstand ist zu diesem System in Reihe geschaltet.

Dieser Vorwiderstand wurde wie dargestellt von 1MΩ auf 100kΩ reduziert, was einer Verringerung der über den Widerstand abfallenden Spannung von $1\frac{V}{\mu A}$ auf $0.1\frac{V}{\mu A}$ entspricht.
Zur Erhaltung der Abschneidefrequenz von 500Hz des Tiefpaßes, der aus dem Vorwiderstand und dem parallelgeschaltetem Kondensator gebildet wird, mußte ebenfalls der Kondensator geändert werden.
Hier hielt man eine Abschneidefrequenz von 1000Hz[FRE95] vertretbar und baute Kondensatoren von 10nF ein.

5.2 Umbau der Adapter- und Analogboxen

Die Ausleseelektronik der Analogboxen wurde vom Liquid-Argon-Kalorimeter (LAr-Kalorimeter) übernommen und an die Bedürfnisse des PLUG-Kalorimeters angepaßt, in dem zur Anpassung der Signalauslese der Siliziumdetektoren an die Analogboxen des LAr-Kalorimeters die Adapterboxen entwickelt wurden. Dem PLUG stehen vier dieser Adapter- und Analogboxen zur Verfügung, die aus technischen Gründen in unmittelbarer Nähe des eigentlichen Detektors am Eisenjoch(Abbildung 1.1 Nr. 10) angebracht sind, um die Kabel zur Auslese kurz und damit auch die Kabelkapazitäten klein zu halten. Eine schematisierte Darstellung der Position der Adapter- und Analogboxen zeigt Abbildung 5.2. Man erkennt die vier Adapter- und Analogboxen, die um das PLUG (dunkelgrau schraffiert) und das Strahlrohr (weiß) angeordnet sind. In den Adapter- und Analogboxen befindet sich die im 4. Kapitel beschriebene Elektronik.

Die damaligen Herstellungsvorgaben schrieben eine nach Möglichkeit vollständige Isolation der Einzelteile voneinander vor, um so die Trennung der Signalerde von der Erdung des Gehäuses und die Isolation gegen das Eisenjoch zu gewährleisten. Daher wurden in den Adapter- und Analogboxen alle leitenden Gehäuseteile durch den Einbau geeigneter Materialien so mit einander verbunden, daß keinerlei elektrischer Kontakt zustande kommen kann. Des weiteren wurden die Adapter- und Analogboxen gegeneinander und gegenüber dem Eisenjoch isoliert, in dem zwischen den Gehäuseteile großflächige Kunstoffplatten montiert wurden. Alle Verbindungen der Metallteile wurden durch Kunststoffverschlüsse oder durch kunststoffummantelte Schrauben zur Isolation ausgeführt.

Die Neukonstruktion des Gehäuses beschreitet den umgekehrten Weg, in dem man alle Teile des Gehäuses, die aus eloxiertem Aluminium gefertigt sind, nach Möglichkeit durch verzinkten Stahl ersetzt, der ein bessere Leitfähigkeit als eloxiertes Aluminium besitzt und somit eine bessere Abschirmung gewährleisten kann.

Abbildung 5.3 zeigt eine Zeichnung der Gehäuseteile der Boxen, die zum Teil in den Werkstätten des DESY gebaut und im Rahmen dieser Arbeit geändert wurden. Hier wurde besondere Sorgfalt darauf verwendet, daß alle Teile leitend verbunden sind. Dies wurde durch Metallschraubverbindungen und zusätzlich angebrachte Massekabel realisiert. Mit den Massekabeln wurden die Teile an das gemeinsame Potential angeschlossen, deren Austausch

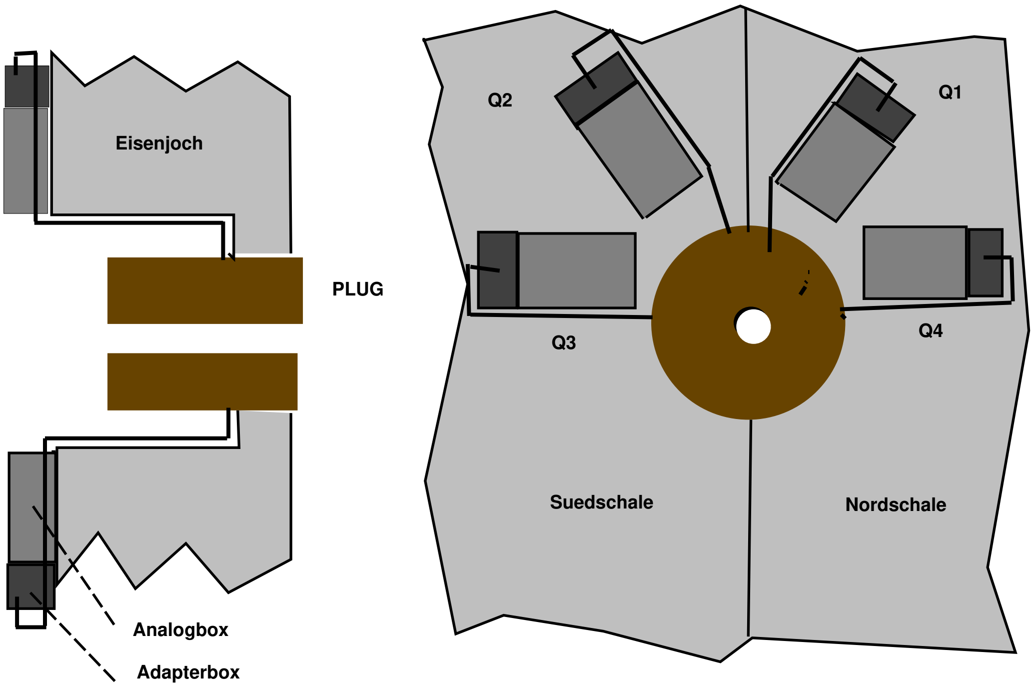


Abbildung 5.2: *Frontend-Elektronik des PLUG-Kalorimeters*

nicht durchgeführt werden konnten. Dazu gehören vor allen Dingen die Bleche, auf denen die verschiedenen Stecker befestigt sind, die zur Kalibration und zur Spannungsversorgung benötig werden.
Um eine gut leitende Verbindung zwischen dem Eisenjoch, an dem die Adapter- und Analogboxen montiert sind, und Adapter- und Analogboxen herzustellen, wurden die Befestigungsschrauben mittels Massekabeln mit dem Gehäuse der Boxen verbunden. Dies gewährleistete eine bessere elektrische Verbindung mit dem Eisenjoch als im Vorjahr, zumal auch die Kunststoffplatte zwischen Eisenjoch und Grundplatte der Adapter- und Analogboxen entfernt wurde.

5.3 Auswirkungen auf das Rauschverhalten

In Abbildung 5.4 sind zwei typische Rausch-Verteilungen aller elektronischen Kanäle des PLUG-Kalorimeters in der Strahlzeit '94(a.)) und '95(b.)) wiedergegeben. Jedem elektronischen Kanal ist eine Nummer (Elgnu-Nr.) zugeordnet und entspricht dem Auslesekanal eines Detektors.

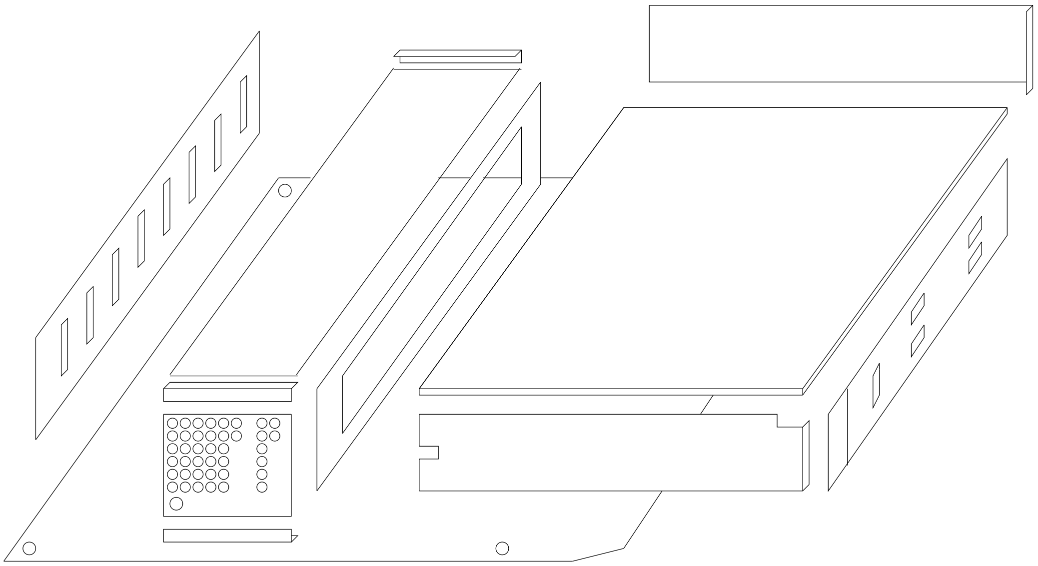


Abbildung 5.3: *Gehäuse der Adapter- u. Analogboxen*

Berücksichtigt man, daß in beiden Strahlperioden ein Rauschniveau größer als $5ADC_{Einheiten}$[1] zur Eleminierung des betreffenden Kanals aus der Datenannahme führte, ersieht man aus den Darstellungen, daß in der Strahlzeit '94 ca. 60-80 elektronische Kanäle hiervon betroffen waren.
In der Strahlzeit '95 mußten nur 4 bis 9 Kanäle(in der Abbildung 4 Kanäle) aufgrund zu hohen Rauschens aus der Datenannahme entfernt werden.
Einer der Gründe für diese deutliche Verbesserung ist die im vorherigen Abschnitt beschriebene Umgestaltung der Adapter- und Analogboxen.

Ein weiterer Grund für den Rückgang des Rauschens ist die Umstrukturierung des PLUG-Kalorimeters, mit der Verringerung der sensitiven Ebenen um die Hälfte, wodurch die Zahl der in einem Auslesekanal befindlichen Detektoren von zwei auf einen Detektor reduziert werden konnte. Dadurch erreicht man eine Verringerung der Eingangskapazität am Vorverstärker des Auslesekanals um den Faktor 2, was jedoch nicht allein für den starken Rückgang des Rauschen verantwortlich sein kann, wie man aus den Überlegungen zum Rauschen aus Abschnitt 4.2.2 ersieht. Legt man einen mittleren Dunkelstrom für die Strahlzeit '95 von $10\mu A$ zugrund, so trägt das kapazitive Rauschen nur ca. 20% zum Gesamtrauschen bei(Abschnitt 4.2.2).

---

[1] $1ADC_{Einheit} \approx 80keV$; nähere Erläuterung im 6. Kapitel

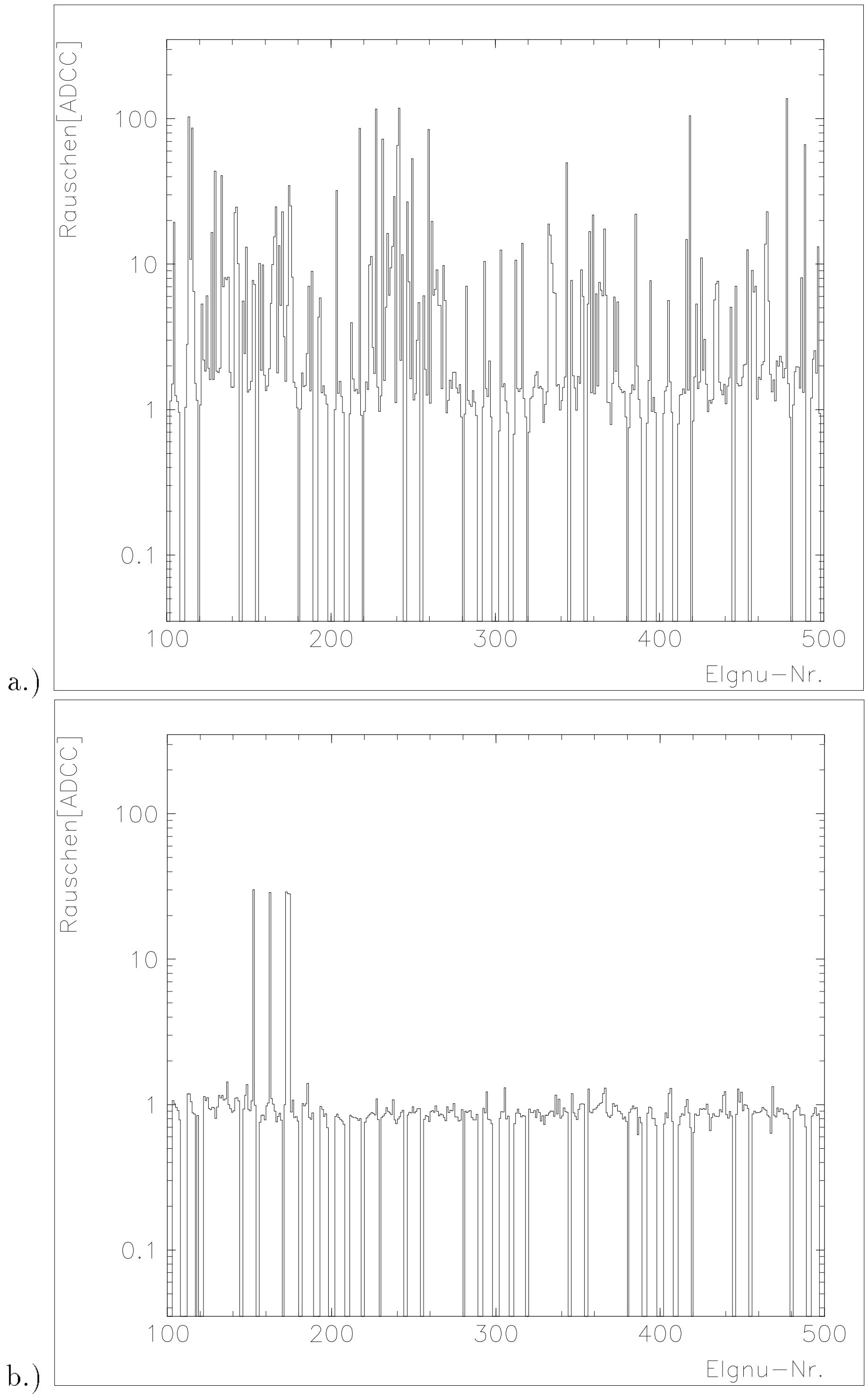


Abbildung 5.4: *Verteilungen des Rauschens für jeden elektronischen Kanal(Elgnu-Nr.) für die Daten zweier typischer Kalibrationen in der Strahlzeit '94(a.)) und '95(b.))*

Weiterhin standen durch die Halbierung der instumentierten Detektoren von 772 auf 336 mehr Detektoren zur Selektion zur Verfügung. Aus diesen wurden die aufgrund ihrer Kennlinien am besten geeigneten Detektoren ausgewählt und im PLUG-Kalorimeter instrumentiert.

Kapitel 6

Die Kalibration des PLUG-Kalorimeters

Unter einem Kalorimeter versteht man in der Hochenergiephysik ein Gerät zur Meßung der Energie von hochenergetischen Teilchen und Quanten. Die prinzipielle Arbeitsweise eines Kalorimeters ist, die gesamt Energie eines hochenergetischen Teilchens zu absorbieren und in ein meßbares Signal umzuwandeln. Diese Teilchen erzeugen abhängig von ihrer Art durch unelastische Prozesse im Detektormaterial Sekundärteilchen, die bei genügend hoher Energie weiter mit dem Detektormaterial wechselwirken und sich zu einem sogenannten „Schauer“ entwickeln können. Zum Nachweis werden die durch Ionisation erzeugten Elektronen-Loch-Paare genutzt, die in ein meßbares Signal umgewandelt werden können.
Heutzutage werden hauptsächlich zwei Arten von Kalorimetern genutzt, die sich aufgrund ihres Materials charakterisieren lassen. Diese Kalorimeter bestehen entweder aus lichtsammelnden Materialien, die z.B. die Phänomene des Szintillations- und Cerenkov-Lichtes nutzen, oder sie bestehen aus ladungssammelndem Materialien, in dem die Primär- und Sekundärteilchen in Gasen und Flüssigkeiten Elektronen und Ionen bzw. in Halbleitern Elektronen und Löcher generieren.
Ladungssammelnden Kalorimeter, die aus einem Halbleitermaterial bestehen, haben gegenüber anderen ladungsammelnden Kalorimetern mit z.B. Gasfüllung den Vorteil, daß einen absolute Energiekalibrierung möglich ist, da die Energiedeponierung von in den Halbleiter eingestrahlten Teilchen in weiten Grenzen unabhängig von der Teilchenart und Teilchenenergie ist.

Das PLUG-Kalorimeter gehört zur Gruppe der ladungsammelnden Kalorimeter und ist als Sampling[1]-Kalorimeter Vertreter einer in der Hochenergiephysik häufig benutzten Kalorimeterbauart. Dies ist durch die spezielle Bauweise eines Sampling-Kalorimeters bedingt, das sich aus unterschiedlichen Schichten zusammensetzt, die mit Absorber- bzw. Detektormaterial(sensitives Material) bezeichnet werden. So können durch geschickte Wahl der Absorbermaterialien mit hoher Kernladungszahl und somit kleiner Wechselwirkungs- und Strahlungslänge kostengünstige und kompakte Kalorimeter realisiert werden. Nachteil ist, daß nur im sensitiven Detektormaterial die Energie gemessen werden kann, während im Absorbermaterial die Information über die deponierte Energie verloren geht. Den Zusammenhang zwischen der gemessen Energie und der Primärenergie des Teilchens ist jedoch eine feste Größe und wird durch die Sampling-Fraction angegeben.

Sampling-Fraction für das H1-PLUG-Kalorimeter

Zur Erklärung des Begriffs „Sampling-Fraction“ ist es notwendig einige Definitionen einzuführen, die den Energiefluß in einem Kalorimeter betreffen.

- Die **Primärenergie**(E_{pri}), ist die Summe aller auf das Kalorimeter treffender Teilchen, zu der sowohl die kinetische Energie als auch, bei instabilen Teilchen, das Energieäquivalent der Massendifferenz zwischen dem Ausgangsteilchen und seiner Zerfallsprodukte gehören.

- **Leckverluste**(E_{leck}), die dadurch entstehen, daß die Primär- oder Sekundärteilchen das Kalorimeter verlassen.

- Die **absorbierte Energie**(E_{abs}), mit der man die Differenz von E_{pri} und E_{leck} bezeichnet.

- Mit **deponierter Energie**(E_{dep}) bezeichnet man die Energieanteile, die von einem geladenen Teilchen zur Ionisation aufgewendet werden, ohne daß die Sekundärelektronen ihrerseits genug Energie haben, um weiter Ionisationsprozeße durchzuführen.

- Die **unsichtbare Energie**(E_{uns}) ist der Anteil, der für das Überwinden von Bindungsenergien von Nukleonen aufgebracht werden muß, und der von Neutrinos übernommen wird, die nicht mehr im Kalorimeter nachgewiesen werden können.

- Die **sichtbare Energie**(E_{sicht}), die den vom Kalorimeter eigentlich registrierten Anteil darstellt, der das Signal erzeugt.

---

[1] sample(engl.): Stichprobe

Aus diesen Definitionen lassen sich die folgenden Zusammenhänge zwischen den Größen herleiten:

$$E_{pri} = E_{dep} + E_{uns} + E_{leck} \tag{6.1}$$

$$E_{abs} = E_{dep} + E_{uns} \tag{6.2}$$

$$E_{sicht} \leq E_{dep} \tag{6.3}$$

Für Sampling-Kalorimeter muß man beachten, daß sich die deponierte Energie auf das Absorber- und Detektormaterial aufteilt.

$$E_{dep} = E_{dep,Absorber} + E_{dep,Detektor} \tag{6.4}$$

Für eine theoretische Diskussion verwendet man zur Definition der Sampling-Fraction den Quotienten aus im Detektormaterial deponierten Energieanteil ($E_{dep,Detektor}$) und dem im Kalorimeter absorbierten Anteil(E_{abs}).

$$\widehat{SF} \equiv \frac{E_{dep,Detektor}}{E_{abs}} \tag{6.5}$$

Für den praktischen Umgang mit einem realen Kalorimeter ist die Definition der Sampling-Fraction

$$SF \equiv \frac{E_{sicht}}{E_{pri}} \tag{6.6}$$

nützlicher, da man die im Kalorimeter absorbierte Energie im Experiment kaum bestimmen kann, während man die Primärenergie mittels eines Teststrahls aus monoenergetischen Teilchen sehr gut festlegen kann.

6.1 Grundlagen der Kalibration

Die einfachste Art der Kalibration für das PLUG-Kalorimeter wäre es, das gesamte Kalorimeter in einem Teststrahl mit monoenergetischen Teilchen zu kalibrieren, doch konnte dies in der Praxis aus Zeitgründen und der Komplexität der Apparatur und Elektronik nicht realisiert werden.
Daher wurden im Vorfeld des Einbaus an verschiedenen Teststrahlen Versuche mit Testkalorimetern, die dem Aufbau des PLUG-Kalorimeters entsprechen, durchgeführt. Mit Simulationsprogrammen zur Entwicklung von elektromagnetischen und hadronischen Schauern in siliziuminstrumentierten Kalorimetern[SEI89] konnten diese gemessenen Daten sehr gut reproduziert werden und auf das gesamte PLUG-Kalorimeter übertragen werden.

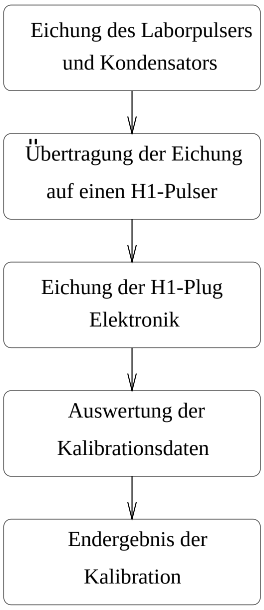


Abbildung 6.1: *Ablaufdiagramm der Kalibration*

In diesen Versuchen und Simulationen ist dann die Sampling-Fraction mit $SF_{PLUG} = 10^{-3}$ bestimmt worden, mit der man wie vorhergehend erläutert von der im Kalorimeter gemessene Energie auf die Primärenergie zurückrechnen kann.

Daraus ergibt sich als Notwendigkeit die Kalibration der elektronischen Kette, bestehend aus Detektor und Ausleseelektronik, des PLUG-Kalorimeters mit Hilfe einer künstlichen Quelle.
Die durch die eingestrahlten Teilchen in einem Detektor generierten Elektronen-Loch-Paare entsprechen einer Ladungsmenge, die der Teilchenenergie proportional ist. Mittels eines Präzisionspulser und eines Kondensators(Charge-Terminator[2]) kann diese Ladungsmenge nachgebildet werden und in das zu kalibrierenden System eingekoppelt werden, in dem man den Charge-Terminator an die Ausleseelektronik anstelle eines Detektors(Abbildung 4.5) anschließt.
Abbildung 6.1 zeigt das Ablaufschema mit den für das PLUG-Kalorimeter durchgeführten Einzelschritten der Kalibration.

---

[2] Einheit aus Pulser und Kondensator

6.2 Kalibrierung des Charge-Terminators im Labor

Im Labor wurde ein externer Charge-Terminator mittels einer α-Quelle geeicht.
Zur Eichung wurde eine ^{244}Cm-α-Quelle gewählt, deren α-Linien bei 5805keV und 5763keV liegen. Die Reichweite von α-Teilchen in Silizium beträgt ca. $25\mu m$ bei der oben angegebenen Energie [PAU95]. Bei einer Dicke von $400\mu m$ für die PLUG-Detektoren werden alle α-Teilchen vollständig im Detektor absorbiert.

Aus dem Blockdiagramm(Abbildung 6.2) ist der Aufbau der Eichapparatur zur Eichung des Charge-Terminators zu entnehmen. Sie besteht aus dem Charge-Terminator, einem Detektor, einem ladungsempfindlichen Verstärker, einem Filtervorverstärker(Shaper) und einem Vielkanalanalysator, der an einen PC angeschlossen ist. Der Detektor wurde mittels der α-Quelle im Vakuum bestrahlt , wobei die α-Teilchen ihre gesamte Energie von 5805keV bzw. 5763keV im Detektor deponieren.
Mit einer angelegten Spannung von 70V wurde der Detektor vollständig verarmt. Die in den Detektor eingestrahlten α-Teilchen generieren längs ihrer Flugbahnen Elektronen-Loch-Paare, die durch das angelegte Feld zu den entsprechenden Elektroden abwandern. Dort entsteht ein Stromimpuls, der von dem nachgeschalteten Verstärker integriert und in ein Spannungsimpuls umgewandelt wird, dessen Höhe proportional zur Fläche des Stromimpulses ist. Dieses Signal wird vom Filtervorverstärker und einem weitere Verstärker sowie einem „Bias“-Verstärker, der das Signal oberhalb einer einstellbaren Schwelle linear verstärkt, an den Vielkanalanalysator weitergeleitet. Dieser analysiert die Höhe des Signals, ordnet es einem Kanal zu und zählt die Häufigkeit jeder Signalhöhe.

Mit dem Charge-Terminator, der bei der Messung der α-Teilchen mit angeschlossen sein muß, damit sich die Ladungen auf die gleichen Kapazitäten (Kondensatoren u. Kabelkapazitäten) verteilen, wird bei verschiedenen Pulsereinstellungen eine definierte Ladung auf den Kondensator aufgebracht, die gemäß $\Delta Q = C * \Delta U$ proportional zur Pulshöhe des Generators ist.
Trägt man die Einstellung des Pulsers gegenüber dem Kanal auf, in dem der Vielkanal diese Pulsereinstellung mißt, so kann man aus diesen Daten durch Annäherung mit einer Geraden die Einstellung des Pulsers in Skalenteile errechnen. Gleichzeitig mit dem Varieren der Pulsereinstellung wird das Signal

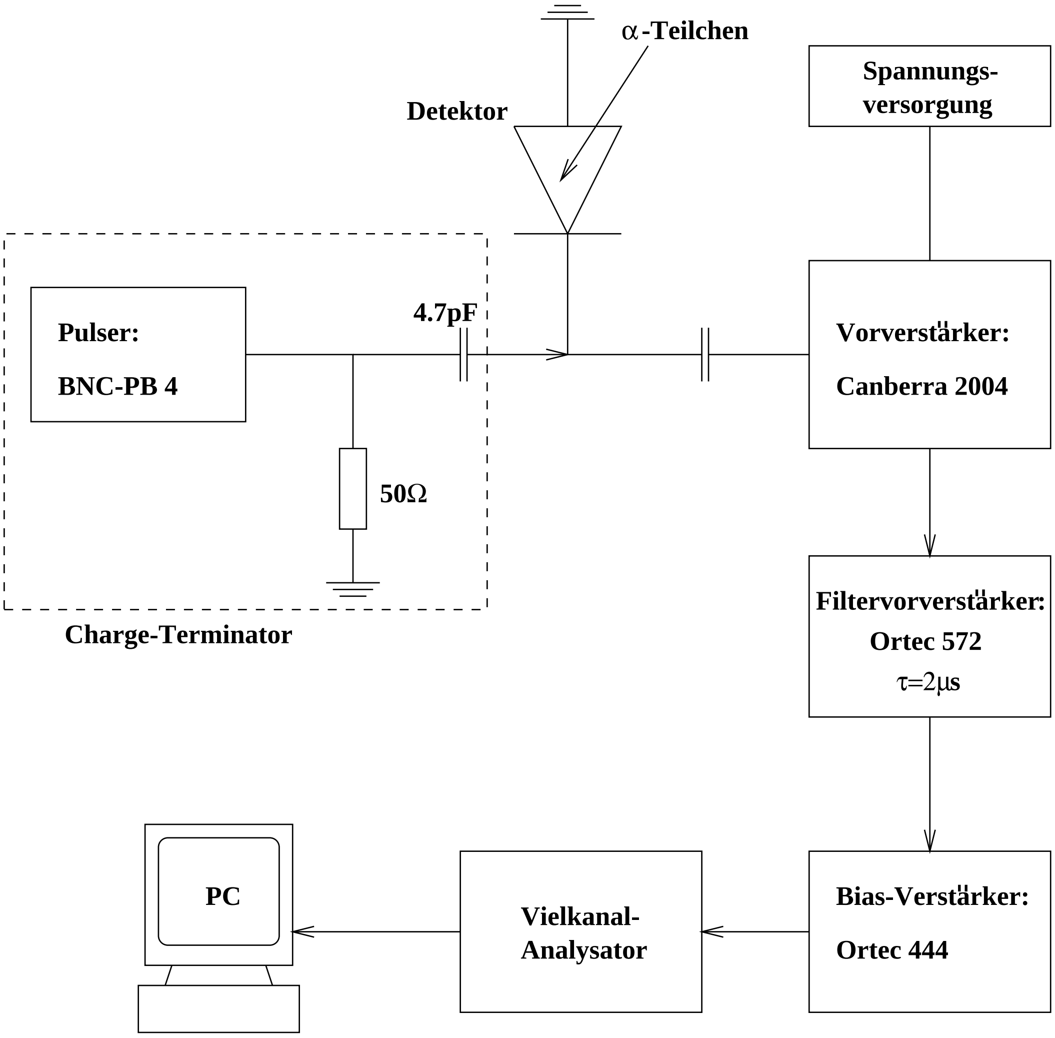


Abbildung 6.2: *Blockschaltbild der Charge-Terminatoreichung*

des Detektors, in dem die α-Teilchen vollständig abgestoppt werden, auf dem gleichen Wege gemessen.

Zur Veranschaulichung dient Abbildung 6.3, in der man das Impulshöhenspektrum der α-Teilchen aufgenommen mit der in Abbildung 6.2 gezeigten Meßapparatur, sowie das Signal zweier mit dem Charge-Terminator erzeugter Testpulse sieht. Zur Kalibration wurden sechs Pulsereinstellungen gemessen, von denen je drei ober- bzw. unterhalb des gemessenen Kanals der

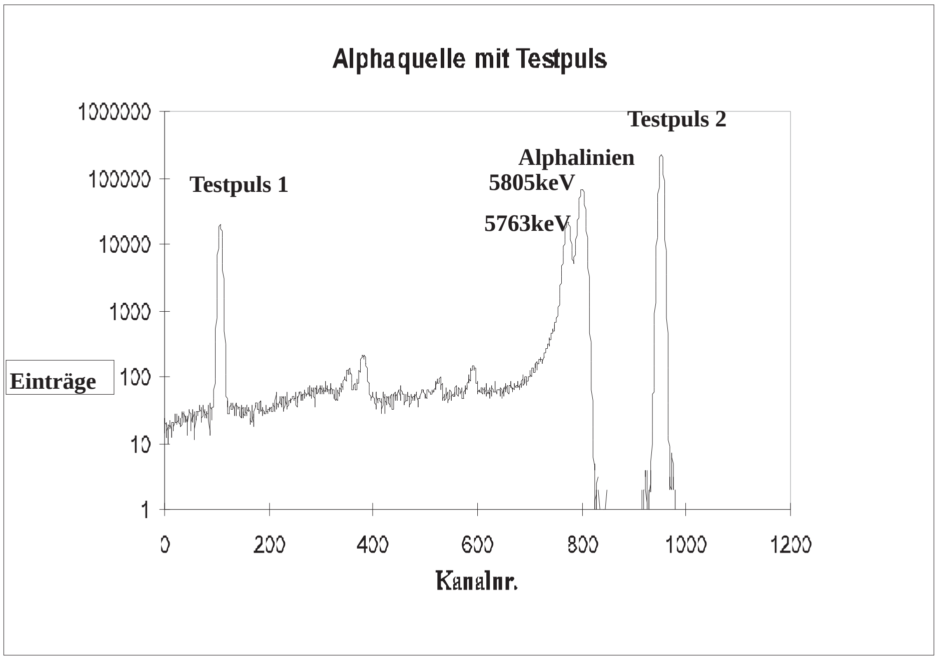


Abbildung 6.3: *Impulshöhenspektrum der α-Quelle und zweier Testpulse.*

α-Linie lagen. Die Meßergebnisse sind aus Tabelle 6.1 zu entnehmen. Aus diesen Meßwerten erhält man durch Annährung mit einer Geraden die Eichkurve(siehe dazu Abbildung 6.4) des Charge-Terminators. Die Steigung für die Gerade beträgt $1.923\frac{PulserSkt.}{Kanal}$, und der Y-Achsenabschnitt hat den Wert 8338.9PulserSkt. Der hohe Offset des Charge-Terminators ist durch die am Bias-Verstärker eingestellte Energieschwelle bedingt und mußte gewählt werden, um eine Auflösung von ca. $1\frac{keV}{Kanal}$ im interessierenden Energiebereich zu erzielen.

Man erhält so für den Pulser mit angeschlossenem Kondensator eine Eichgerade der Form:

$$Skt_{BNC} = 1.923\frac{PulserSkt.}{Kanal} * Kanal + 8338.9 PulserSkt., \tag{6.7}$$

mit Kanal = Kanal-Nr. des Vielkanalanalysators

Man erkennt aus der Abbildung 6.4, daß der Pulser eine sehr gute Linearität besitzt, und durch Einsetzen des Kanals, der der α-Linie mit 5805keV entspricht, daß 10255 Pulserskt. dieser Energie entsprechen.

Zur Bestimmung des Nullpunktes des Pulsers wurde die Messung zur Übertragung des Laborpulsers auf den H1-Pulser mittels Oszilloskop verwendet. Die Meßwerte entnehme man der Tabelle 6.2. Trägt man die Pulsereinstellung gegenüber der Einstellung am Oszilloskop auf und läßt diese Kurve durch eine Gerade approximieren, so erhält man für die Parameter dieser Gerade folgende Werte. Die Steigung beträgt 95.7 $\frac{PulserSkt.}{mV}$ und der Offset -90 PulserSkt.
Verwendet man den oben ermittelten Punkt $P_1(5805keV, 10255PulserSkt.)$ aus der α-Messung und den aus der Oszilloskopmessung bestimmten Nullpunkt des Pulsers $P_2(0keV, -90PulserSkt.)$ und legt durch diese beiden Punkte ein Gerade, so erhält man ein Eichgerade mit der Steigung 0.561 $\frac{keV}{PulserSkt.}$ und einem Y-Achsenabschnitt -50 keV.

Man erhält so für den Pulser eine Eichung von $0.561\frac{keV}{PulserSkt.}$ bei einer sehr guten Linearität.
Verwendet man zur Kontrolle dieser Rechnung die α-Linie bei 5763 keV und berechnet die Steigung der Eichgeraden, so erhält man $0.571\frac{keV}{PulserSkt.}$ und ein gute Übereinstimmung mit einem Fehler von ca. 2%, der durch die um den Faktor 3.2 geringere Zählrate für diese α-Linie zu erklären ist. Aufgrund dieser niedrigen Zählrate wurde die Kalibration mit der α-Linie bei 5805keV durchgeführt.
Man erhält so für die Energieeichung des Charge-Terminators eine Eichgerade der folgenden Form:

$$E[keV] = A_{lab} * Skt._{BNC} + B_{lab} \tag{6.8}$$

$$\text{mit } A_{lab} = 0.561\frac{keV}{PulserSkt.} \text{ u. } B_{lab} = -50keV.$$

6.3 Übertragung auf das H1-Experiment

Die im obrigen Abschnitt beschriebene Eichung des Charge-Terminators im Labor soll nun auf die im H1-Experiment vorliegende Meßelektronik übertragen werden. Ziel der Kalibration ist es die in Abbildung 4.5 eingezeichneten Pulser (H1-Pulser A bzw. Pulser B) so zu kalibrieren, daß es möglich ist mittels dieser Generatoren eine wohldefinierte Energie z.B. die Energie eines α-Teilchens zu simulieren, in das Auslesesystem einzukoppeln und diese durch die Elektronik auslesen zu lassen. Dadurch ist es möglich bei regelmäßig durchgeführter Kalibrierung während der Strahlzeit eine Aussage über die Veränderung der Elektronik und der später angeschlossenen Detektoren zu machen.

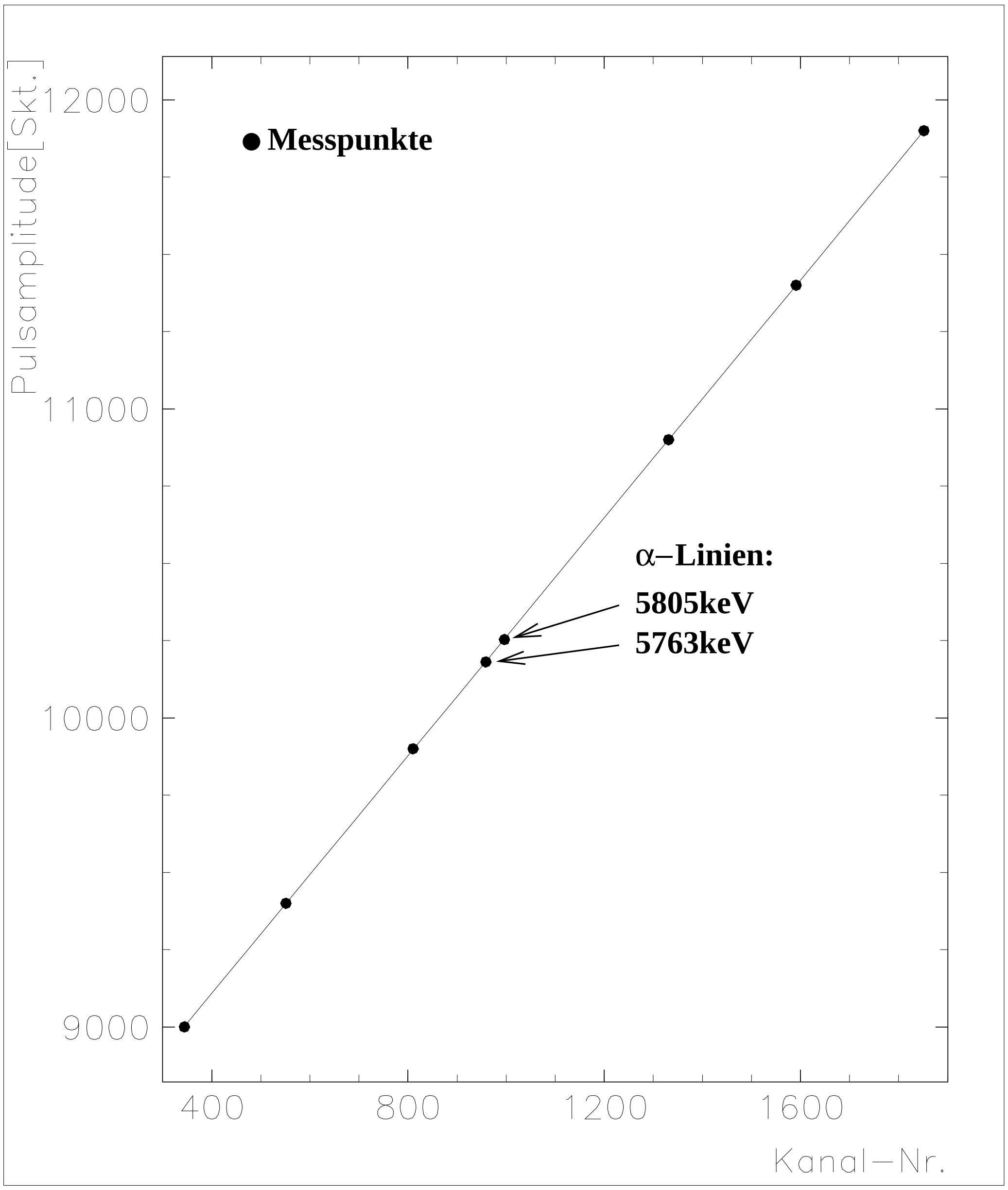


Abbildung 6.4: *Eichgerade des Charge-Terminators im Labor mit Vielkanalanalysator gemessen*

Pulsehöhe	Kanal-Nr.	Zählrate
11900	1852	10700
11400	1591	10218
10900	1331	10653
9900	810	16300
9400	551	13964
9000	344	13395
10255	997	112984
10183	959	34982

Tabelle 6.1: *Meßergebnisse der Charge-Terminatoreichung*

Aus der Abbildung 4.5 ist der Aufbau der Ausleseelektronik für einen Auslesekanal zu entnehmen. Dabei ist zu bemerken, daß die in den gestrichelten Linie befindlichen Teile oder Zahlen den Zustand bis zum Ende der '94 Strahlzeit beschreiben. Diese Veränderungen wurden aus verschiedenen Gründen gemacht. Zum einen wie schon im Kapitel 4 beschrieben aus Gründen der besseren Spannungsversorgung. Hierfür wurden die an der Bias-Spannung angeschlossenen Widerstände verringert. Zum anderen wurde das PLUG--Kalorimeter in der Strahlzeit '95 mit nur 336 Detektoren bestückt, so daß je einem Detektor ein Auslesekanal zugeordnet werden konnte. Es wurde hier der am Knoten B anzuschließende Detektor nicht instrumentiert. Dies diente der besseren Überwachung der einzelnen Kanäle bzw. Detektoren, die an den jeweiligen Kanal angeschlossen sind.

Die Pulser A und B sind an Kondensatoren von 4.7pF angeschlossen, so daß eine definierte Ladungsmenge in das System eingekoppelt werden kann, die von der Ausleseelektronik(Abbildung 4.5), ausgelesen und auf dem im 4. Kapitel beschriebenen Weg ausgewertet wird. Die daraus resultierenden Daten werden von der Software für ein spätere Auswertung abgespeichert.

Für die Kalibration der PLUG-Elektronik bzw. der H1-Generatoren war es nötig den im Labor geeichten Charge-Terminator direkt am Eingang der Adapterbox(s. Abbildung 4.5 Knoten A) an Stelle der Detektoren anzuschließen. An jedem Eingang werden jeweils 24 Detektoren unter Verwendung eines Vielpolsteckers ausgelesen. Um jeden dieser Kanäle zu pulsen wurde eine Umschaltbox verwendet, mit der man jeden einzelnen Kanal separat ansprechen kann. Da die Adapterboxeingänge nur bei geöffnetem H1-

Experiment zugänglich sind, kann man dieses Verfahren nur während einer größeren Pause(„Shutdown“) des Strahlbetriebes durchführen.

Nach Anschluß des geeichten Charge-Terminators an das System am Knoten A war es nicht möglich mit der H1-Datenannahme das Signal auszulesen, da die Auslese des H1-Experiments von einem externen Taktgeber, der Hera-Clock, gesteuert wird und keine zeitliche Korrelation zwischen dem Pulser und der Hera-Clock hergestellt werden konnte.
Als Ausweg wurde die Übertragung der Laborpulsereinstellung auf einen der zur Verfügung stehenden H1-Pulser, die mit der H1-Signalauslese synchronisiert sind, gewählt, in dem der H1- und der Laborpulser an ein Oszilloskop angeschlossen wurden. Beide Pulser wurden direkt an das Oszilloskop angeschlossen, um die Amplitudenhöhe des H1-Generator auf die des im Labor verwendeten Pulsers abzugleichen.
Der H1-Pulser wurde auf eine Pulsamplitude eingestellt und der Laborpulser variiert bis die Amplitudenhöhe des Laborpulsers mit der des H1-Pulsers übereinstimmte. Die Ergebnisse dieser Übertragung entnehme man der Tabelle 6.2.

Unter Berücksichtigung der im vorangegangen Abschnitt beschriebenen Berechnung der Energie für den Charge-Terminator kann man diese auf den H1-Pulser übertragen, da der H1-Pulser auf dem nachgeschalteten Kondensator eine äquivalente Ladungsmenge erzeugt. Somit bilden im weiteren Verlauf der Kalibration ein H1-Pulser und der für die Laboreichung verwendete Kondensator von 4.7pF den am Knotenpunkt A(Abbildung 4.5) angeschlossenen externen Charge-Terminator. Ein Vergleich der vom externen und internen Charge-Terminator eingekoppelten und von der Ausleseelektronik verarbeiteten Energie bzw. Ladung und deren Meßergebnissen ergibt die Eichung der Ausleseelektronik. Auf diese Art ist es möglich die oben beschriebenen Probleme der Auslese zu umgehen. Trägt man die Energie, ermittelt aus der äquivalenten Pulsereinstellung des Laborgenerators, gegenüber der Pulsereinstellung des H1-Pulsers in einer Graphik(s. Abbildung 6.5) mit den Werten aus der Tabelle 6.2 auf, so erkennt man auch für den H1-Pulser eine sehr gut Linearität.

Diese Meßdaten werden durch eine Gerade approximiert und man erhält die Parameter der Eichgeraden, die angibt, wieviel Energie durch den Charge-Terminator am Eingang der Analogboxen simuliert wird:

$$E[keV] = A_{H1} * Skt._{DAC} + B_{H1} \tag{6.9}$$

H1-Pulser[DACC]	Laborpulser[Skt.]	Oszilloskop[mV]	Energie[keV]
2500	3000	33	1733
5000	6885	72	3913
7317	10281	108	5818
7500	10520	110	5952
10000	14300	152	8073
20000	29600	310	16656

Tabelle 6.2: *Meßwerte der H1-Pulsereichung als externer Charge-Terminator*

$$\text{mit } A_{H1} = 0.852 \pm 6 * 10^{-3} \frac{keV}{DAC_{Einheiten}} \text{ u. } B_{H1} = -404 \pm 105 keV.$$

Der große Fehler des Offsets(B_{H1}) resultiert in der Hauptsache aus der Ableseungenauigkeit der Übertragung des Laborpulsers auf den H1-Pulser. Für die weitere Kalibration ist jedoch die Genauigkeit der Steigung endscheidend, deren Fehler unter 1% liegt.

Mit dieser Konfiguration wurde die PLUG-Ausleseelektronik auf zwei Arten durch die verschiedenen Pulser gepulst. Zum einen wurde der am Knotenpunkt A angeschlossene externe Charge-Terminator in Betrieb genommen und so alle Kanäle der südlichen Hemisphäre des PLUGs gepulst. Die in der Abbildung 4.5 gezeigten Pulser A und B waren nicht angeschlossen. Die Daten aus diesem Teil der Kalibration wurden ausgelesen und abgespeichert und stellen den ersten Datenblock zur Auswertung dar.
Zum anderen wurde die Kalibration mit den beiden internen Charge-Terminatoren mit den H1-Generatoren A und B, die wie oben beschrieben für jeden Kanal eine andere Zusammensetzung haben, durchgeführt. Auch diese Daten wurden für die Auswertung gespeichert. Bei jeder dieser beide Möglichkeiten wird von den Pulsern eine Abfolge aus 25 verschiedenen Pulsereinstellungen durchgefahren. Jede Pulsereinstellung wird ca. 250 mal gepulst und vom ADC ausgelesen [RUF92]. Daraus ergibt sich der Inhalt der abgespeicherten Daten als die Angabe der Pulsereinstellung[$DAC_{Einheiten}$[3]], der Mittelwert der ADC-Auslese[$ADC_{Einheiten}$[4]] sowie der Abweichung vom Mittelwert[$ADC_{Einheiten}$], die mit dem Rauschen gleichzusetzen ist.

Die Auswertung dieser Daten wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

---

[3] In den Abbildungen ist diese Einheit mit DACC aufgeführt.

[4] In den Abbildungen mit ADCC bezeichnet.

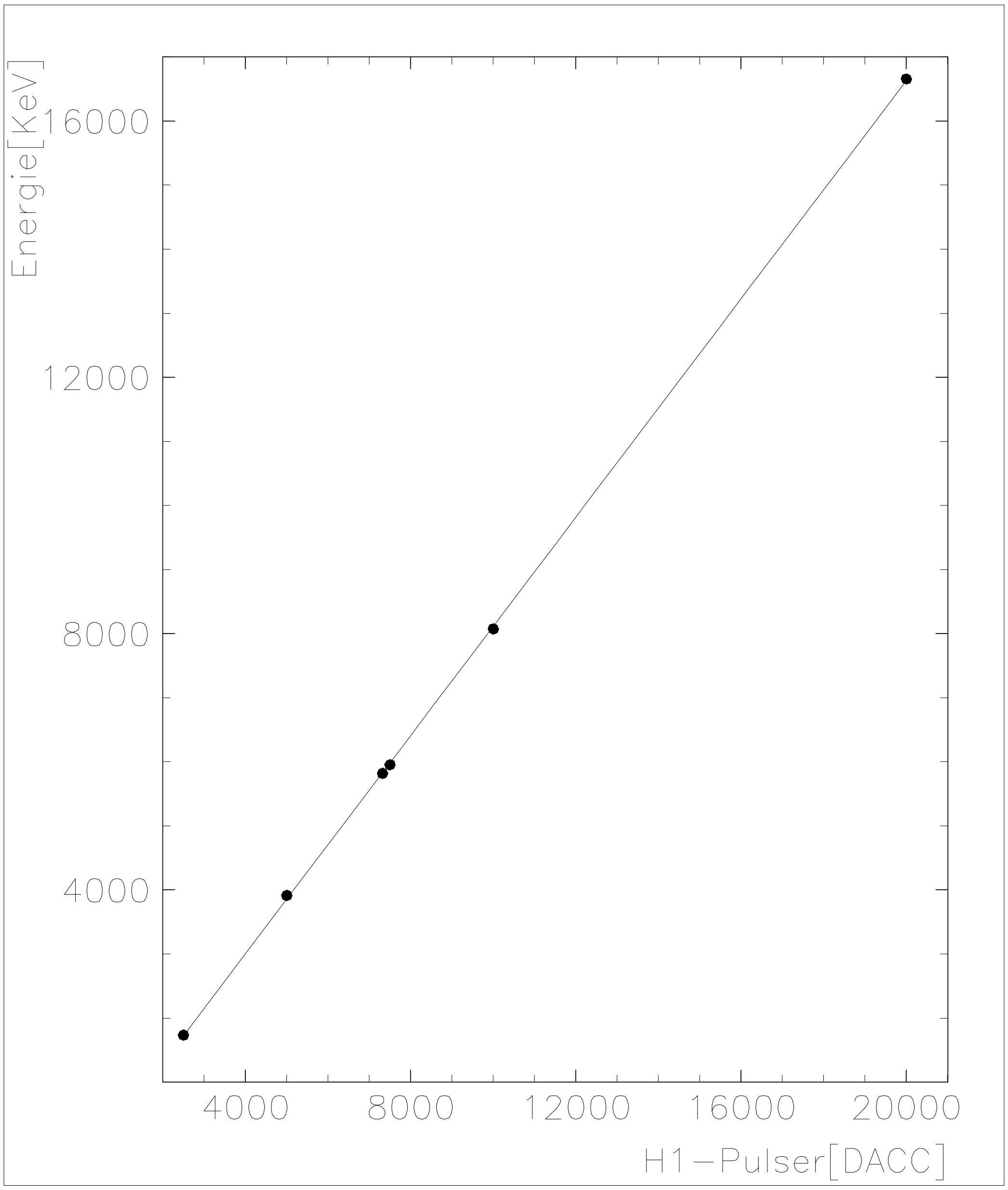


Abbildung 6.5: *Eingekoppelte Energie des externen Charge-Terminator in Abhängigkeit von der eingestellten Amplitudenhöhe.*

6.4 Auswertung der am H1-Experiment genommenen Daten

Im folgenden wird unterschieden zwischen den zwei in der Kalibration gepulsten Wegen(externer und interner Charge-Terminator), die oben beschrieben worden sind. Dazu werden die dem PLUG-Kalorimeter zur Verfügung stehende 32 Pulser(Abbildung 4.5 H1-Pulser A u. B) genutzt, deren Eichparameter in der Auswertung den Index EL tragen. Die Eichparameter der Auswertung des am Knotenpunkt A(Abbildung 4.5) angeschlossenen externen Charge-Terminators tragen den Index CAL.

Für beide Pulserwege kann man eine gute Linearität der Eichgeraden voraussetzen. So ergeben sich zwei Gleichungen der Form:

$$ADC_{Einheiten} = A_{CAL} * DAC_{H1,Einheiten} + B_{CAL} \tag{6.10}$$

$$ADC_{Einheiten} = A_{EL} * DAC_{Einheiten} + B_{EL} \tag{6.11}$$

mit A = Steigung der Geraden, B = Offset der Geraden, $DAC_{H1,Einheiten}$ = Einheit der internen H1-Pulser und $DAC_{Einheiten}$ = Einheiten des externen Pulsers

Durch Gleichsetzen der beiden Gl. 6.10 und 6.11 und auflösen nach $DAC_{H1,Einheiten}$ sowie Einsetzen in Gl. 6.9 ergibt sich für die Eichung der PLUG-Ausleseelektronik folgend Abhängigkeit der Energie von der Pulsereinstellung der internen H1-Pulser:

$$\begin{aligned} E[keV] &= \frac{0.852\frac{keV}{DAC_{Einheiten}} * A_{EL}}{A_{CAL}} * DAC_{Einheiten} \\ &+(0.852\frac{keV}{DAC_{Einheiten}}(\frac{B_{EL}-B_{CAL}}{A_{CAL}}) - 404keV) \end{aligned} \tag{6.12}$$

In dieser Gleichung enthält der erste Term die Steigung der Pulser in $\frac{keV}{DAC_{Einheiten}}$ und der zweite Term den ermittelten Offset für die H1-Pulser. Nach Auswertung der gemessenen 160 elektronischen Kanäle, in dem die Daten aus der Kalibration durch lineare Regression ermittelt werden, ergeben sich für die Steigungen der einzelnen Kanäle die in Abbildung 6.6 aufgetragenen Werte mit dem Mittelwert von $3.8\frac{keV}{DAC_{Einheiten}}$ und einer mittleren Abweichung von ca. 3.5%.

Bezüglich des Offsets der Kalibration, der in Abbildung 6.7 aufgetragen ist, erkennt man eine starke Verschiebung der Werte, die durch eine Erwärmung der Elektronik zu begründen ist. Bei Strahlbetrieb ist die Ausleseelektronik, und hier insbesondere die Verstärker, die wahrscheinlich für diesen Effekt verantwortlich sind, ständig angeschaltet, so daß sich eine konstante Betriebstemperatur einstellen kann. Während der Strahlzeit konnte dieser Effekt nicht beobachtet werden. Dies ist im Abschnitt 4.2.1 belegt.

Diese Kalibration ergab als Resultat folgende Werte:

$$1DAC_{Einheit,95} = 3.8keV$$
$$1ADC_{Einheit,95} = 81.5keV$$

Ein Vergleich mit dem 1992 ermittelten Wert von

$$1DAC_{Einheit,92} = 1.5keV$$
$$1ADC_{Einhheit,92} = 32.6keV$$

ergibt einen Korrekturfaktor von

$$C_{korr} = \frac{DAC_{Einheit,95}}{DAC_{Einheit,92}} = 2.5$$

Ein Grund für den Fehler in der '92er Kalibration ist leider nicht bekannt. Es gibt jedoch die Vermutung, daß während der Eingangskalibration mit nur einem Pulser gepulst wurde, jedoch im laufenden Betrieb mit zwei Pulsern kalibriert wird, wodurch ein Faktor 2 zu erklären wäre. Des weiteren ist es möglich, daß es auch 1992 schon ein Problem mit dem Timing zwischen Pulser und Auslese gegeben haben könnte, das auch '95 aufgetreten ist und weiter vorn beschrieben wurde. In der ersten Kalibration konnte dies jedoch nicht festgestellt werden, da die Instrumentierung des H1-Experiment nicht in der Form vorhanden war wie 1995. Insofern konnte damals nur davon ausgegangen werden, daß die Kalibration zum richtigen Ergebnis geführt hat. Erst ein Vergleich der MC-Daten mit denen der Messungen zeigte einen deutlichen Unterschied, der zunächst nicht erklärt werden konnte.

Nach der erneut durchgeführten Kalibration zeigt ein Vergleich der '93 Meßdaten mit denen aus den Monte-Carlo-Simulation ermittelten Daten(MC-Daten), daß unter Verwendung des Korrekturfaktors von 2.5 gegenüber den seit '92 gemessenen Daten eine gute Übereinstimmung zwischen MC- und Meßdaten besteht.

6.5 Auswirkungen der neuen Kalibration auf die Rekonstruktion

In der Strahlzeit 1994 war das PLUG-Kalorimeter mit acht Ebenen instrumentiert. Die Abbildungen 6.8 a.) und b.) zeigen einen Vergleich der

Meßdaten(H1-Daten) mit den simulierten Daten(ARIADNE) der '94er Runperiode, wobei die simulierten Daten berechnet wurden mit den Monte-Carlo-Programmen ARIADNE und LEPTO 6.1, die für die Analyse der H1-Daten verwendet werden.

Gemessen bzw. simuliert wurden Ereignisse der tiefinelastischen Streuung mit niedrigem Impulsübertrag Q^2 zwischen 5 - 50GeV und der Registrierung eines Elektrons im BEMC[5](Abbildung 1.1 Nr. 12), das im hinteren Teil des H1-Detektors zu finden ist. Aufgetragen ist die Wahrscheinlichkeitsdichte gegen die gemessene bzw. simulierte Energie.

In der Abbildung 6.8 a.) sieht man einen Vergleich der 1994 gemessenen Daten mit den in Monte-Carlo-Simulationen gewonnen Daten. Man erkennt, daß diese sehr schlecht übereinstimmen.

Die Abbildung 6.8 b.) zeigt die '94 Daten mit dem Skalierungsfaktor 2.5, der aus dem Verhältnis des neuen und alten Kalibrationfaktors ermittelt worden ist. Man erkennt, daß die simulierten Daten jetzt sehr gut mit gemessenen Daten übereinstimmen, d.h. das PLUG-Kalorimeter kann nun auch zur Energiemessung herangezogen werden.

Eine genauere Beschreibung kann man einer internen H1-Veröffentlichung[PAN95] entnehmen.

---

[5] **B**ackward-**E**lectro-**M**agnetic-**C**alorimeter

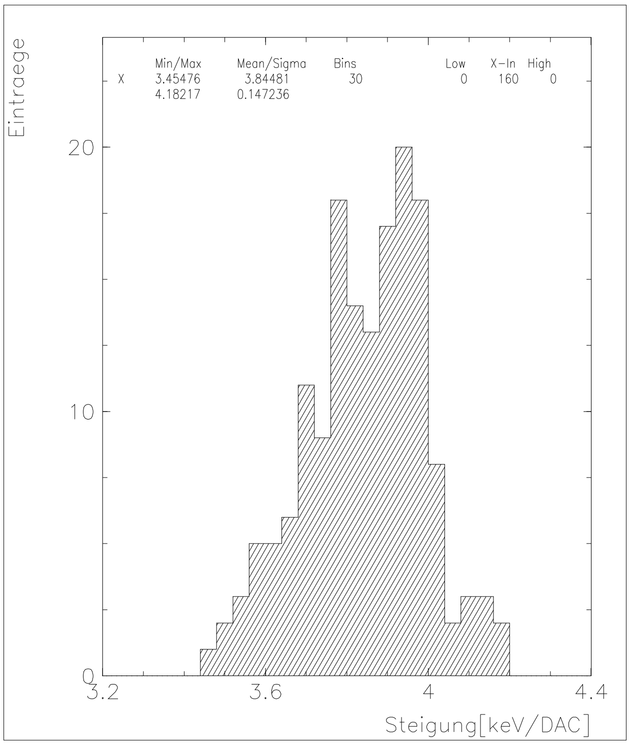


Abbildung 6.6: *Ergebnisse der Kalibration bezüglich der Steigung der geeichten internen Generatoren*

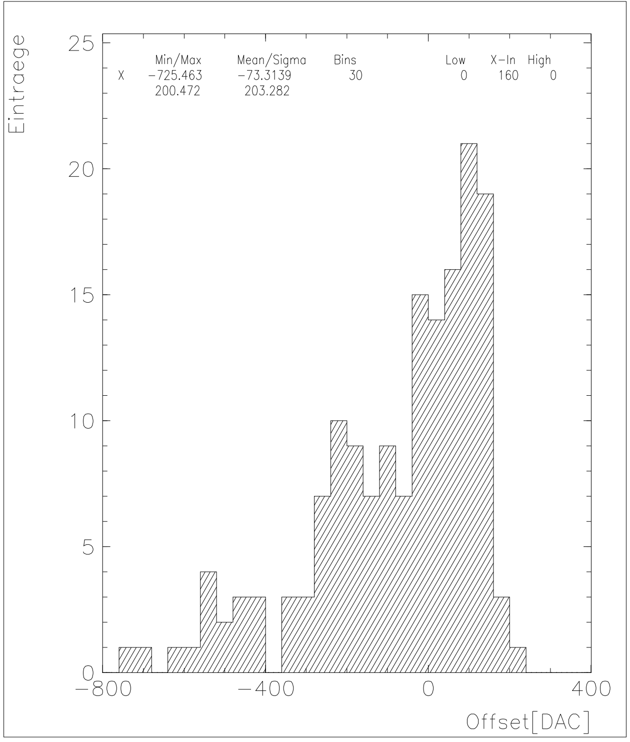
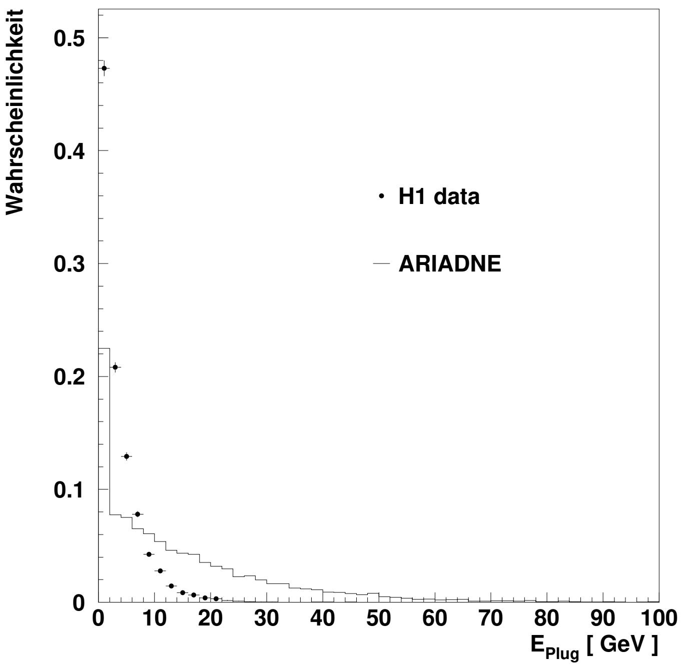
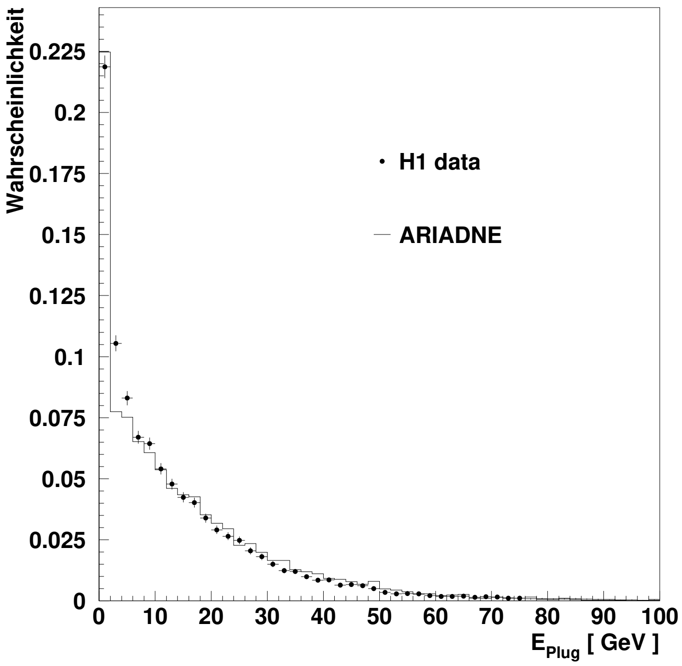


Abbildung 6.7: *Graphische Darstellung des Offsets der Kalibration*



a.)



b.)

Abbildung 6.8: *Vergleich von MC- und PLUG-Daten*
a.) simulierte und gemessene Daten aus der '94 Strahlzeit für das PLUG-Kalorimeter mit dem in der '92 Kalibration ermittelten Kalibratinsfaktor
b.) simulierte und gemessene Daten wie in Abbildung a.) mit dem in der '95 Kalibration ermittelten Kalibrationsfaktor[DATEN]

Kapitel 7

Auswertung der Kalibrationsdaten 1995

Grundlage dieser Beobachtungen bilden die am H1-Detektor genommen Kalibrationsdaten für das PLUG-Kalorimeter. Gemacht werden diese Kalibration in kontinuierlichen Abständen während der Strahlzeit zur Erkennung defekter Auslesekanäle, deren Linearität nicht mehr gegeben ist. Dazu werden die im 4. Kapitel beschriebenen Schritte zur Kalibration durchgeführt. Zusätzlich werden zur späteren Auswertung Daten gespeichert, die für jeden elektronischen Kanal die zur Kalibration relevanten Daten über die Pulsereinstellung und die vom ADC ausgelesene Pulsantwort sowie deren Standardabweichung enthalten.
Überschreitet die Standardabweichung für eine Pulsamplitude einen einstellbaren Grenzwert($5ADC_{Einheiten}$), so wird dieser Kanal als defekt markiert und nicht in der Datenannahme berücksichtigt.
Ausgewertet werden diese Daten durch ein im Rahmen dieser Diplomarbeit geschriebenes Programm, das die gleichen Parameter ermittelt, wie das in die H1-Software integrierte Programm „FCD“, und diese nach elektronischen Kanälen sortiert und abspeichert.

Am Anfang der Strahlperiode '95 Mitte April konnten aufgrund von technischen Problemen keine vollständigen Kalibrationen für das PLUG-Kalorimeter gemacht werde, daher beginnt die Auswertung der Kalibrationsdaten erst am 04. Juli.

7.1 Stabilität der Kalibration über die Strahlzeit '95

Eine wichtige Frage ist die Stabilität der Detektoren und der Ausleseelektronik während der Strahlzeit. Eine starke Veränderung der Kalibrationsparameter in aufeinanderfolgenden Kalibrationen würde auf Instabilitäten der verwendeten Detektoren bzw. der Ausleseelektronik hindeuten.
Betrachtet man dazu, die in Abbildung 7.1 gezeigten elektronischen Kanäle 186, 364, 335 und 165(Abbildung a.) bis d.)), mit dem Kanal 186 als Referenzkanal, der ein annähernd optimales Verhalten[1] zeigt, so erkennt man deutliche Unterschiede. Diese Kanäle sind als Beispiele ausgewählt, und sind typische Vertreter für die gezeigten Merkmale. In den Abbildungen sind die aus den Kalibrationen ermittelten Parameter, wie Steigung, Rauschniveau und Pedestal, in ihrer zeitlichen Entwicklung während der Strahlzeit '95 aufgeführt.

Vergleicht man die abgebildeten Kanäle bezüglich der Steigung und der ermittelten Pedestals während der Strahlperiode '95, so sind diese im allgemeine sehr stabil. Eine Beeinflussung tritt nur bei der Messung der Pedestals auf, wenn das Rauschen sehr stark ist, wie aus den Abbildungen der Kanälen 335 und 165 ersichtlich ist. Dies sind jedoch Auslesekanäle, die aufgrund ihres hohen Rauschniveaus durch die Kalibration aus der Datenannahme entfernt werden.

Bezüglich des Rauschens zeigt der Kanal 364 im Gegensatz zum Referenzkanal 186 ein über die Dauer der Strahlzeit sich deutlich erhöhendes Rauschniveau. Dies ist für alle Kanäle zu verfolgen und ist in der Höhe abhängig von der Position des gemessenen Detektors innerhalb des PLUG-Kalorimeters. Hierauf wird später näher eingegangen.
Kanal 335 ist ein problematischer Auslesekanal, da sein Rauschniveau während der Strahlperiode stark schwankt und nicht in allen Kalibrationen als defekter Kanal erkannt wird.
Kanal 165 stellt einen Auslesekanal dar, der in seinem Rauschniveau ebenfalls stark schwankt jedoch in allen Kalibrationen als defekter Kanal erkannt wird, da sein Rauschniveau bei jeder Kalibration oberhalb des in der Kalibration vorgegenen Auswahlkriteriums von $5ADC_{Einheiten}$ lag.
Eine Herabsetzung dieses Auswahlkriteriums auf ca. $2.5ADC_{Einheiten}$ würde auch den Kanal 335 als defekt markieren, ohne daß ein weiterer Verlust von

---

[1] stabile Steigung und Pedestals im Verlauf der Strahlzeit, sehr geringer Anstieg des Rauschens

Auslesekanälen auftreten würde, da das mittlere Rauschniveau zu Beginn der Strahlperiode bei ca. 0.9 und zum Ende bei ca. $1.2 ADC_{Einheiten}$ lag.
Dies stellt einen wesentlichen Unterschied zur Strahlperiode '94 dar, in der die Herabsetzung des Auswahlkriteriums bezüglich des Rauschens eine Verringerung der sensitiven Kanäle um bis zu 60% bedeutet hätte.

Der Anstieg des Rauschens ist zurückzuführen auf den Anstieges des Dunkelstroms und soll im nächsten Abschnitt erläutert werden.

Aus der Abbildung 7.2 kann man die Meßwerte für alle während der Strahlzeit '95 durchgeführten Kalibrationen entnehmen. In diesen Graphiken sind die Meßwerte für 18 Kalibrationen[2] in drei Histogrammen für die ermittelten Steigungen, Offset und das Rauschen aufgetragen.
Man erkennt in der Abbildung 7.2 a.), daß die ermittelten Steigungen für die Auslesekanäle sich während der Strahlzeit '95 nicht verschoben haben und sich mit einer Streuung von ca. 3.5% um einen Mittelwert von $0.051 \frac{ADCC}{DACC}$ verteilen, was für die gute Stabilität der Verstärkung der Ausleseelektronik spricht.
Auch die in Abbildung 7.2 b.) aufgetragenen Offsets der Kalibration ergeben eine gute Stabilität der gemessenen Offsets der Auslesekanäle mit einer Streuung von ca. 3.5% bei einem Mittelwert von $200.7 ADC_{Einheiten}$.
Die Abbildung 7.2 c.) zeigt das Rauschen für die durchgeführten Kalibrationen mit einer unteren Grenze bei $0.6 ADC_{Einheiten}$, was gut mit einem durch die Ausleseelektronik vorgegebenen minimalen Rauschen von $0.77 ADC_{Einheiten}$ übereinstimmt, das durch die Eingangskapazität des FETs(vergl. Abschnitt 4.2.2) bestimmt wird. Hierbei muß noch berücksichtigt werden, daß zu den Einträgen bei 0.6 - $0.8 ADC_{Einheiten}$ in der Hauptsache Rechteckdetektoren mit einer Fläche von $20 cm^2$ und damit einer geringeren Kapazität beitragen, die nicht in der theoretischen Berechnung des Rauschen berücksichtigt worden sind. Die Verschiebung der Verteilung zu größeren Werten ist durch die Schädigung der Detektoren während der Strahlzeit und des daraus resultierenden Dunkelstromanstieges zu erklären.
Abbildung 7.2 d.) zeigt den relativen Anteil defekter Detektoren in Prozent für die Strahlzeiten '94 und '95. Man erkennt, daß dieser Anteil in der '95 Strahlzeit deutlich geringer ist. Hauptgrund dafür ist die Verwendung von besseren Detektoren(überwiegend aus den Baujahren 93/94), die teilweise bereits 1994 eine gute Stabilität gezeigt haben. Dies wurde ermöglicht durch ein Reduzierung der PLUG-Ebenen und dadurch eine bessere Aus-

---

[2] 18 Kalibrationen $\equiv$ 18 * 336Kanäle = 6048Meßwerte

wahlmöglichkeit der Detektoren. Als weitere Gründe sind die Verringerung der in einem Spannungskanal zusammengefaßten Detektoren und die bessere Erdung der Adapter- und Analogboxen(vergl. Kapitel 5) anzuführen.

7.2 Analyse des Rauschverhaltens in der Strahlzeit '95

In den beiden Abbildung 7.3 und 7.4 werden die Strom- und Rauschentwicklungen exemplarisch für den Quadranten Q4 des PLUG-Kalorimeters der Strahlzeit '95 gezeigt. Diese sind jeweils auf eine Detektor des gezeigten Spannungsringes normiert, d.h. der gemessene nicht temperaturkorrigierte Dunkelstrom, der nur für den gesamten Spannungsring gemessen werden kann, wird durch die Anzahl der im jeweiligen Spannungsring liegenden Detektoren geteilt. Gleiches gilt für das Rauschen, wobei zu beachten ist das die Rauschbeiträge der einzeln Detektoren im jeweiligen Spannungsring quadratisch summiert worden sind.
Die Abbildung 7.3 beinhaltet die Entwicklungen des Stroms und Rauschen für die Spannungsringe dicht am Strahlrohr mit wachsender Entfernung vom Wechselwirkungspunkt.
Die Abbildung 7.4 zeigt die Entwicklungen für die Spannungsringe in der vom Wechselwirkungspunkt am weitesten entfernten Ebene mit wachsendem Radius zum Strahlrohr. Zu erkennen sind die Strommessungen für den jeweiligen Spannungsring in der linken Spalte und die entsprechenden Kurven für den Zuwachs des Rauschen während der Strahlzeit '95 in der rechten Spalte der Abbildungen. Begonnen wird mit der Auswertung des Rauschens am 185ten Tag des Jahres, da es am Beginn der Strahlperiode technische Probleme mit der Ausleseelektronik gab.

Aus den Abbildung 7.3 und 7.4 erkennt man eine gute Korrelation zwischen den IV- und Rauschkurven, was darauf schließen läßt, daß das Rauschen vom Strom hervorgerufen wird.
Der Anstieg des Dunkelstroms ist auf ein Schädigung der Detektoren durch die im HERA-Betrieb auftretende Strahlenbelastung zurückzuführen und ist abhängig von der Entfernung des gemessenen Spannungsringes vom Wechselwirkungspunkt und vom radialen Abstand zum Strahlrohr,wie aus den Abbildung 7.3 und 7.4 zu entnehmen ist. Die Korrelation zwischen der Höhe der auftretenden Strahlenbelastung und der Entwicklung des Dunkelstroms in Abhängigkeit vom Radius R(starker Dunkelstromanstieg für kleines R, abnehmend zu großen R) entspricht den Erwartungen und wird von den durch-

geführten Dosismessungen bestätigt(hohe Strahlenbelastung in der Nähe des Strahlrohrs und Abnahme nach außen)[JAR96].

Der Anstieg des Dunkelstroms und der dadurch hervorgerufene Anstieg des Rauschens ist in guter Übereinstimmung mit Abschnitt 4.2.2, in dem theoretisch gezeigt wurde, daß der Hauptanteil des Rauschens ab einem Strom von ca. $10\mu A$ vom Stromrauschen geliefert wird.
Daher soll im nachfolgenden ein Vergleich zwischen dem Anstieg des Dunkelstroms und dem aus den Kalibrationsdaten ermittelten Rauschzuwachs gemacht werden.

Zur Berechnung des Zuwachs des Rauschens aus den aus der Kalibration gewonnen Daten macht man den Ansatz, daß sich das Gesamtrauschen am Tag X aus zwei Komponenten zusammensetz, dem Rauschen am Tag X_0 und dem durch den Anstieg des Dunkelstroms hervorgerufenen Zuwachs. Tag X (bzw. Tag X_0) ist der letzte (bzw. erste Tag) der für die Strahlzeit ausgewerteten Kalibrationen. Die Rauschkomponenten ausgedrückt in der Anzahl von Elektronen-Loch-Paaren(ELP) addieren sich für das Gesamtrauschen quadratisch und man erhält folgende Gleichung:

$$N_{Zuwachs} = \sqrt{N(X)^2 - N(X_0)^2} \tag{7.1}$$

Diese Werte sind in den Abbildung 7.3 und 7.4 in der rechten Spalte für die ausgewählten Spannungsringe gezeigt. Die Umrechnung von $ADC_{Einheiten}$ in ELP erfolgt mit der Beziehung:

$$N_{ELP}[ELP] = \frac{80keV}{3.6eV} * Rauschzuwachs[ADC_{Einheiten}], \tag{7.2}$$

wobei 80keV der aus der Kalibration des PLUG-Kalorimeter ermittelte Wert für $1ADC_{Einheiten}$ ist, und 3.6eV die zur Erzeugung eines Ladungsträgerpaares benötigte Energie.
Die errechneten Werte sind in der Tabelle 7.1 in der Reihefolge der Abbildungen unter $N_{exp.}$ aufgeführt.

Ein rechnerischer Vergleich unter Berücksichtigung der gemessenen Stromwerte ergibt, für die im Abschnitt 4.2.2 hergeleitete Beziehung:

$$< N^2_{Strom} >= \frac{Ie^2\tau_0}{4q} \tag{7.3}$$

Abbildung	$I_{345}[\mu A]$	$\Delta I[\mu A]$	$N_{theor}[ELP]$	$N_{exp}[ELP]$	$\frac{N_{exp}}{N_{theor}}$
1	30	20	21500	16400	0.763
2	48	36	28800	16900	0.587
3	52	40	30400	19600	0.645
4	43	31	26700	20000	0.749
5	43	31	26700	20000	0.749
6	40	28	25400	15600	0.614
7	32	22	22500	14400	0.640
8	22	14	18000	11600	0.644

Tabelle 7.1: *Vergleich der aus Rausch- und IV-Kurven abgelesenen Werte zur Berechnung von Elektronen-Loch-Paare mit aus der Theorie ermittelten Werten.*

mit den nicht temperaturkorrigierten Stromwerten $I(X)$ und $I(X_0)$ für den Tag der Strahlzeit X bzw. X_0:

$$N_{theor}[ELP] = \sqrt{\frac{\Delta I e^2 \tau_0}{4q}} \tag{7.4}$$

mit $\Delta I = I(X) - I(X_0$, die in der Tabelle 7.1 unter N_{theor} gezeigten Werte.

Man erkennt aus der Tabelle 7.1 ein schlechte Übereinstimmung zwischen den theoretisch hergeleiteten Werten für den Zuwachs und den experimentell gemessenen Werten.
Um dies näher zu diskutieren wurde das Verhältnis von N_{exp} zu N_{theor} gebildet(s. Tabelle 7.1). Man erhält für die Verhältnisse einen Mittelwert von 0.674 ± 0.069. Erwartet wird hier jedoch ein Wert von 1, wenn alle Annahmen richtig sind.
Betrachtet man das Verhältnis aufgetragen in einer Graphik gegen $\Delta I[\mu A]$ (Abbildung 7.5) so erkennt man ein relativ große Streuung der Werte um diesen Mittelwert. Diese wird verursacht durch die Ungenauigkeiten der gemessenen Stromwerte, da diese starken Schwankungen aufgrund von Temperaturschwankungen und Strahlenschädigung der Detektoren[3] ausgesetzt sind. Daher wurde hier ein Mittelwert für den Strom am Tag X bzw. X_0 ermittelt. und der für alle Kanäle als gleich angenommenen Shapingzeit(τ_0), die einer

---

[3] Starke Strahlenschädigungen und Anstiege des Dunkelstroms treten korreliert zu Fehler im Betrieb des HERA-Ringes auf[JAR96]. Ausgeschlossen werden konnte der Einfluß der Synchrotronstrahlung als Ursache für die Strahlenschädigung[BUC96].

Variation von ca 3% unterliegt. Des weiteren betrachtet man in den Graphiken des Dunkelstroms und des Rauschens auf einen Detektor normierte Werte, von denen man annimmt, daß sie für alle Detektoren gültig sind. Unter diesen Voraussetzungen ist die Streuung zu erwarten; die Tendenz scheint jedoch für das Verhältnis konstant zu sein.

Die hohe Abweichung des Mittelwertes vom erwarteten Wert 1 ist zu erklären, durch die in die Berechnung der theoretischen Wert einfließenden Annahmen. Zum einen sind die Berechnung für einen einfachen RC-Integrator und CR-Differentiator Shaper vorgenommen worden, während in der Ausleseelektronik des PLUG-Kalorimeters ein Gauß-Shaper verwendet wird. Ein Vergleich des Gauß-Shapers und eines RC-CR-Shapers gegenüber einem idealen Shaper ergibt einen Faktor von:

$$\frac{\text{RC-CR-Shaper}}{\text{Gauß-Shaper}} = \frac{1.87}{1.30} = 1.44 \tag{7.5}$$

um den der Gauß-Shaper ein besseres Rauschverhalten hat und daher die theoretischen Daten skaliert werden müssen. Man erhält dann für das Verhaltnis $\frac{N_{exp}}{N_{theor}}$ einen Wert von 0.971 ± 0.099. Dies entspricht gut den Erwartungen und man schließt daraus, daß der Anstieg des Dunkelstroms für das Rauschen verantwortlich ist.

7.3 Überprüfung der Detektorqualität mittels Kalibrationsdaten

Die Überprüfung der Detektorqualität ist eine wichtige Aufgabe zur Qualitätssicherung der vom PLUG-Kalorimeter genommenen Meßdaten. Ein Instrument zur Erkennung defekter Detektoren stellt die Aufnahme einer Rausch-Spannungs-Kennlinie(RV-Kennlinie) dar, die im Rahmen einer CV-Messung mit durchgeführt wird. Nachteil dieser Meßmethode ist die lange Meßdauer, die bis zu 3 Stunden betragen kann.

Aufgrund der Zusammenfassung von mehreren Detektoren in einem Spannungsring bzw. einem Triggersegment beobachtet man in Einzelfällen ein Übersprechen zwischen den einzelnen Detektoren eines Spannungsringes. So ist es möglich, daß ein Detektor, der ein stark erhöhtes Rauschen zeigt, im gleichen Spannungsring bzw. Triggersegment liegende Detektoren so beeinflußt, das auch sie ein Erhöhung des Rauschniveaus zeigen. Einen Effekt dieser Art kann man in Abbildung 7.6 sehen, die das Ergebnis einer RV-Messung für ein Detektormodul zeigt. Man erkennt, daß der Detektor Q92147 defekt ist, da seine RV-Charakteristik ab einem bestimmten Spannungswert stark erhöht ist. Dadurch beeinflußt er seine direkten Nachbarn und die im gleichen Spannungsring liegenden Detektoren.

Dies ist insofern unerwünscht, als daß Detektoren, die eine solch Beeinflußung durch defekte Detektoren zeigen, zum einen aus Datenannahme entfernt werden müssen, obwohl sie ein ansonsten gutes Rauschverhalten haben, oder sie erhöhen das Gesamtdetektorrauschen, wenn ihr Rauschen unterhalb von $5ADC_{Einheiten}$ liegt. Um diese beiden Effekte zu Unterdrücken ist es notwendig, die defekten Detektoren zu erkennen und nach Möglichkeit auszutauschen.
Dies kann in einem außerplanmäßigen Zugang zum Detektor durchgeführt werden, der innerhalb der H1-Kollaboration beantragt werden muß und zeitlich stark beschränkt ist. Die Durchführung einer bzw. mehrerer CV-Messungen zur Überprüfung der Detektoren während einer kurzfristigen Zugangsphase ist aufgrund ihrer zeitlichen Dauer(ca. 3h) nicht möglich.
Eine Alternative stellt hier die Durchführung einer Kalibration dar, die ca. 20min (inklusive Auswertung) dauert und ebenfalls Auskunft über das Rauschverhalten der Detektoren gibt. Man könnte somit auch eine mehrmalige Überprüfung der vornehmen.
Ein Vergleich der aus der Rausch-Spannungs-Messung ermittelten defekten Detektoren mit denen aus der Kalibration ergab eine gut Übereinstimmung. Die in der Kalibration gewonnen Daten stellen somit eine weitere Möglichkeit zur Überprüfung der PLUG-Detektoren dar.

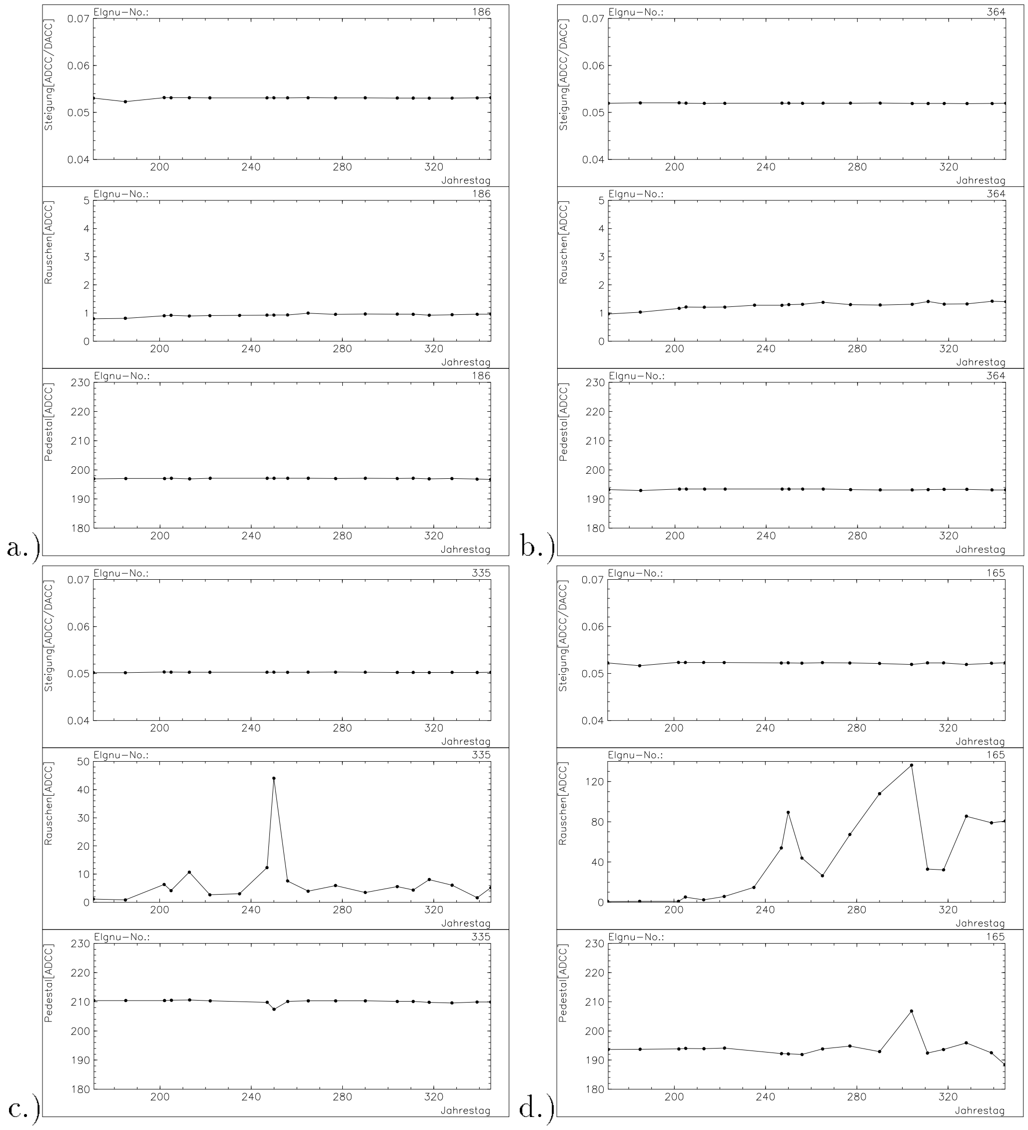


Abbildung 7.1: *Stabilität der Kalibration in der Strahlzeit '95 am Beispiel der elektronischen Kanäle 186, 364, 335, und 165(Abbildung a.) bis d.))*
a.) Kanal 186: gute Stabilität der gemessen Werte; nur leichter Anstieg des Rauschen über die Strahlzeit; sehr guter Auslesekanal bzw. Detektor
b.) Kanal 364: gute Stabilität der Steigung und der Offsets; Anstieg des Rauschens
c.) Kanal 335: Steigung sehr stabil; starke Schwankungen in der Rauschmessung um $5ADC_{Einheiten}$*; höchster Meßwert der Rauschmessung beeinflußt die Messung des Offsets; schlechter Auslesekanal, da er nicht in allen Kalibrationen erkannt wird*
d.) Kanal 165: gute Stabilität der Steigung; ab dem 200ten Tag Anstieg des Rauschens mit starken Schwankungen, die jedoch oberhalb von $5ADC_{Einheiten}$ *liegen, daher wird der Kanal in allen folgenden Kalibrationen als defekt erkannt.*

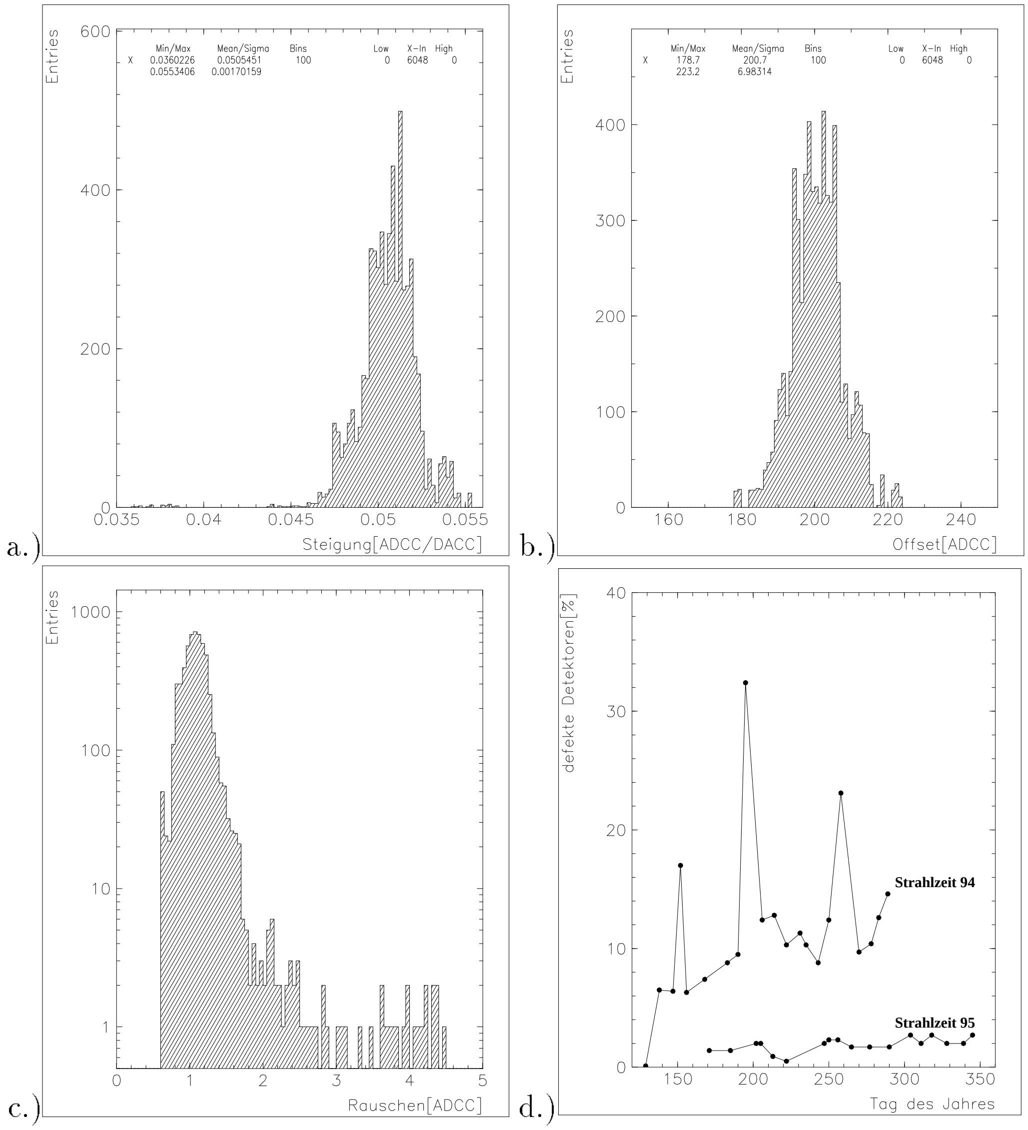


Abbildung 7.2: *Statistische Auswertung der in den Kalibrationen genommenen Daten; ausgewertet wurden 18 Kalibrationen mit 336 Kanälen ≡ 6048 Meßwerte*
a.) Histogram der in der Kalibration ermittelten Steigungen der Eichgeraden für alle elektronischen Kanäle; gute Stabilität mit einem Fehler von ca. 3.3% b.) Histogram der gemessenen Offsets; Schwankungsbreite ca. 3.5% c.) Histogram des gemessenen Rauschens mit einer Verschiebung zu höheren Werten durch die Erhöhung des Dunkelstroms während der Strahlzeit d.) Vergleich der während der Strahlzeit '94 und '95 durch die Kalibrationen als defekt markierten Detektoren; starke Reduzierung von '94 zu '95, aufgrund anderer Betriebsbedingungen(Detektoren nur an Spannung während der Luminositätsphase des HERA-Betriebs, '95 bis max. 7 Detektoren '94 bis max. 14 Detektoren in einem Spannungsring zusammengefaßt, '95 bessere Erdung der Ausleseelektronik(Kapitel 5))

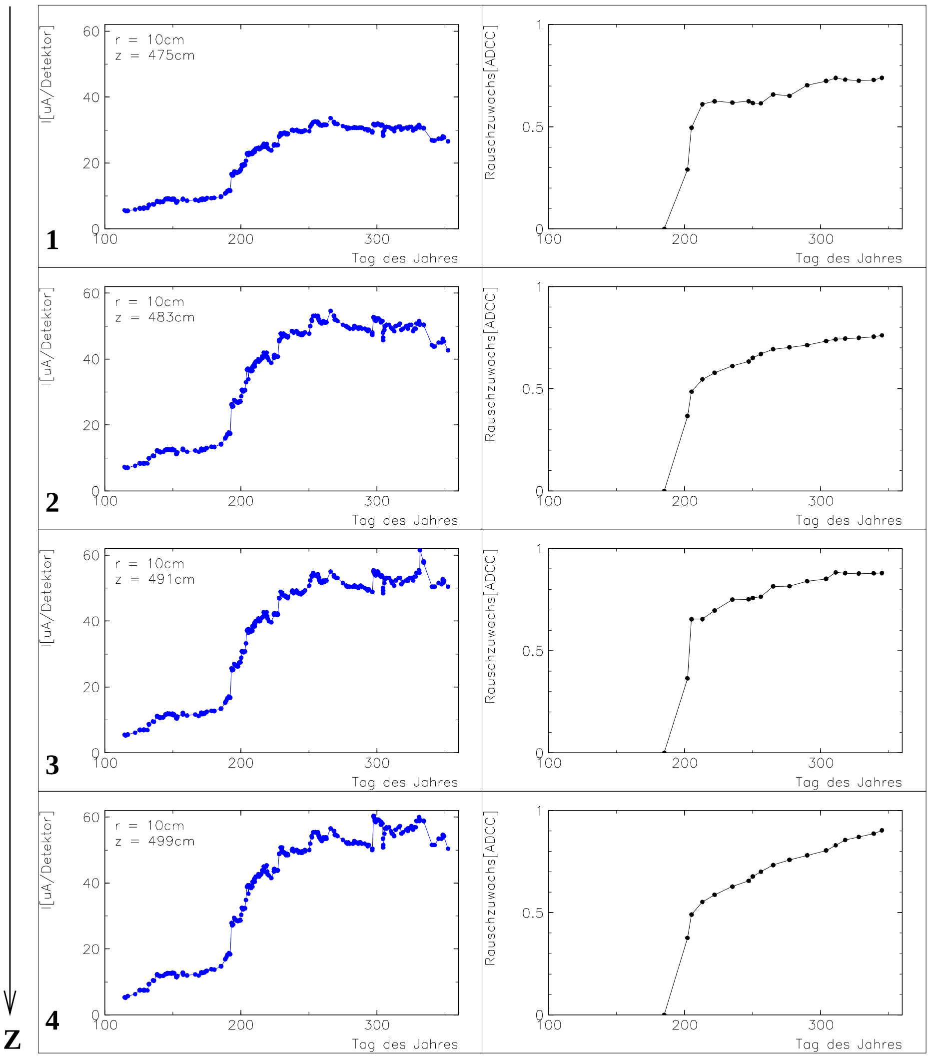


Abbildung 7.3: *Vergleich der Resultate der IV-Messungen mit aus der Kalibration ermittelten Rauschwerte für die '95 Strahlzeit.*
linke Spalte: Entwicklung der IV-Messungen bei Betriebsspannung normiert pro Detektor für den Quadranten Q4 im innersten Spannungsring. Die oberste Kurve repräsentiert den zum Wechselwirkungspunkt am nächsten gelegenen Spannungsring; weitere Anordnung mit wachsendem Abstand zum Wechselwirkungspunkt.
rechte Spalte: entsprechende Anordnung wie links jedoch Rauschwert summiert über alle Quadranten des innersten Ringes normiert pro Detektor.

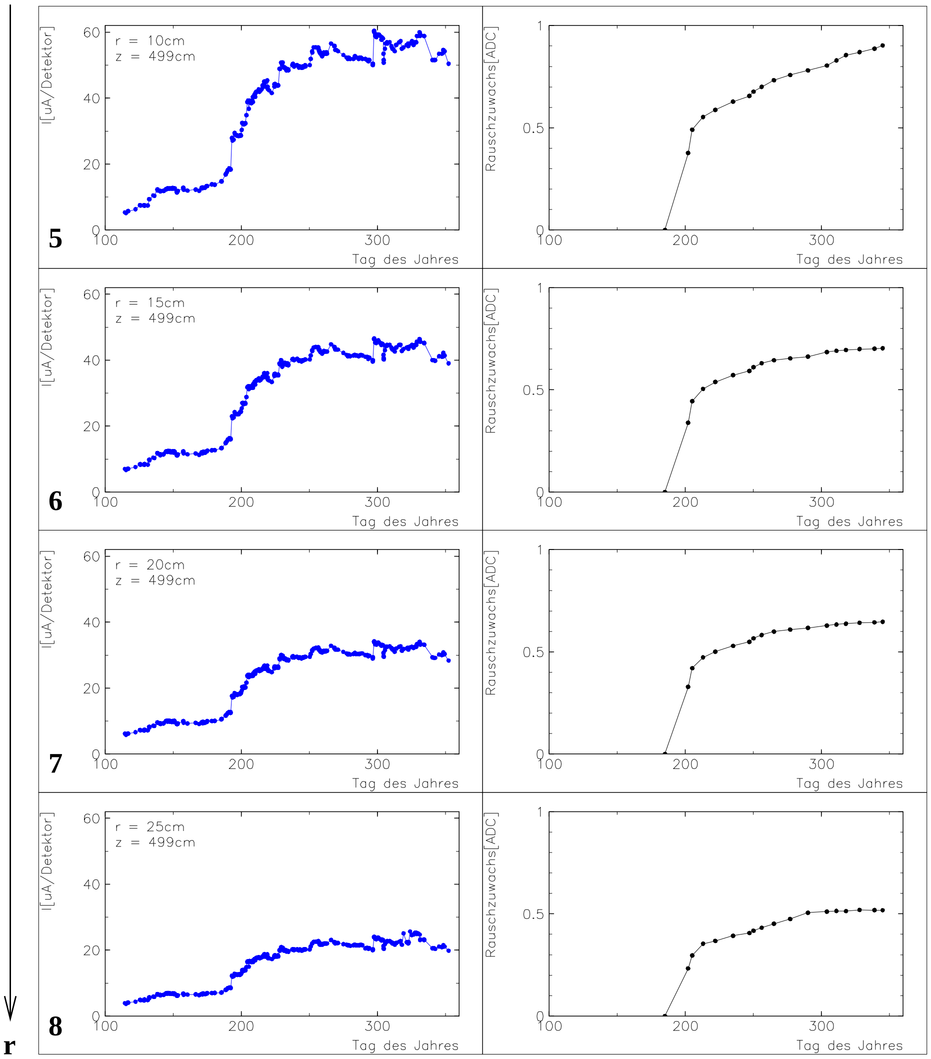


Abbildung 7.4: *Vergleich wie in Abbildung 7.3 mit wachsendem Abstand zum Strahlrohr innerhalb der 4. Ebenen des PLUG-Kalorimeters*

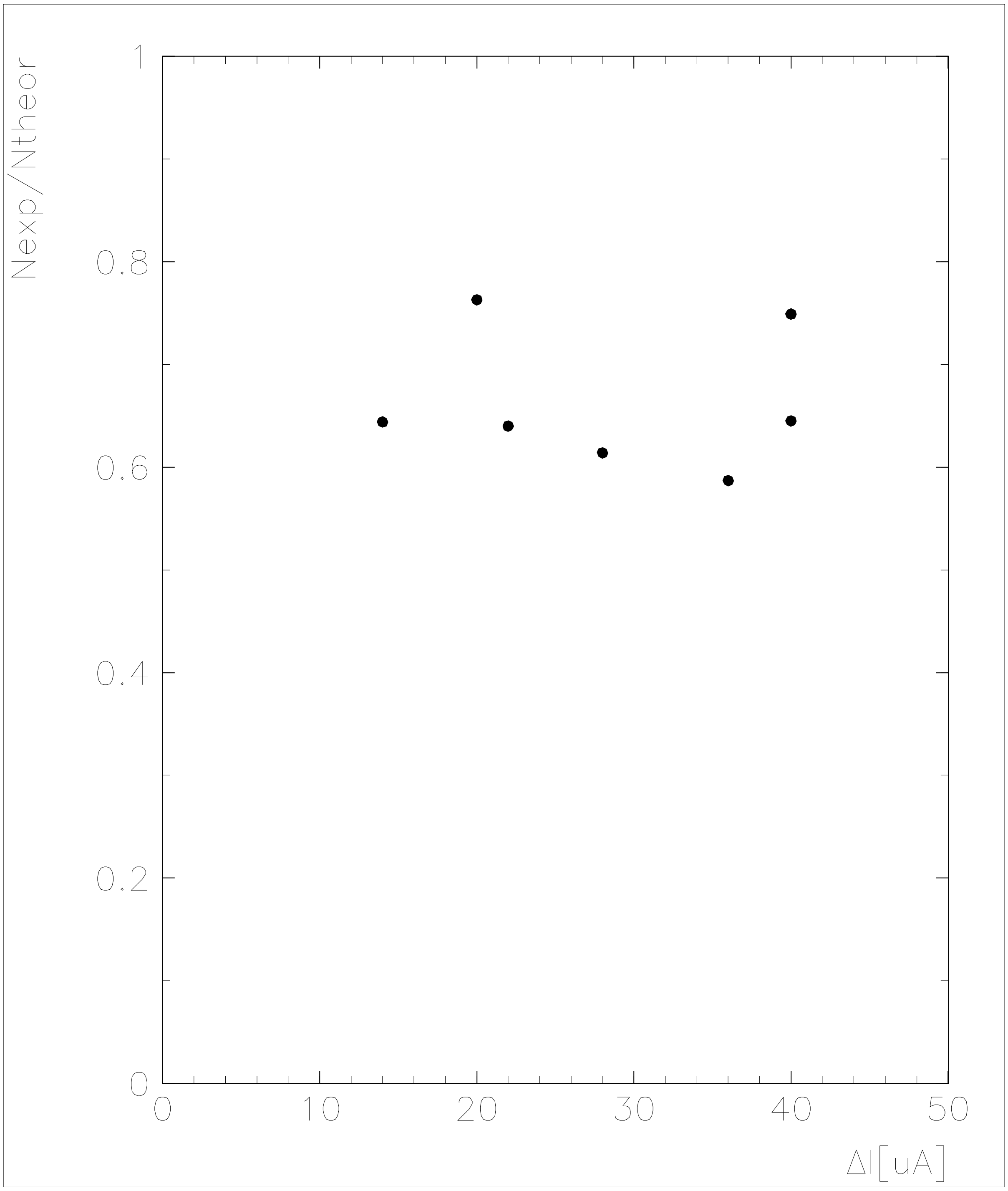


Abbildung 7.5: *Verhältnis des experimentell und theoretisch ermittelten Rauschen aufgetragen in Abhägigkeit von* ΔI

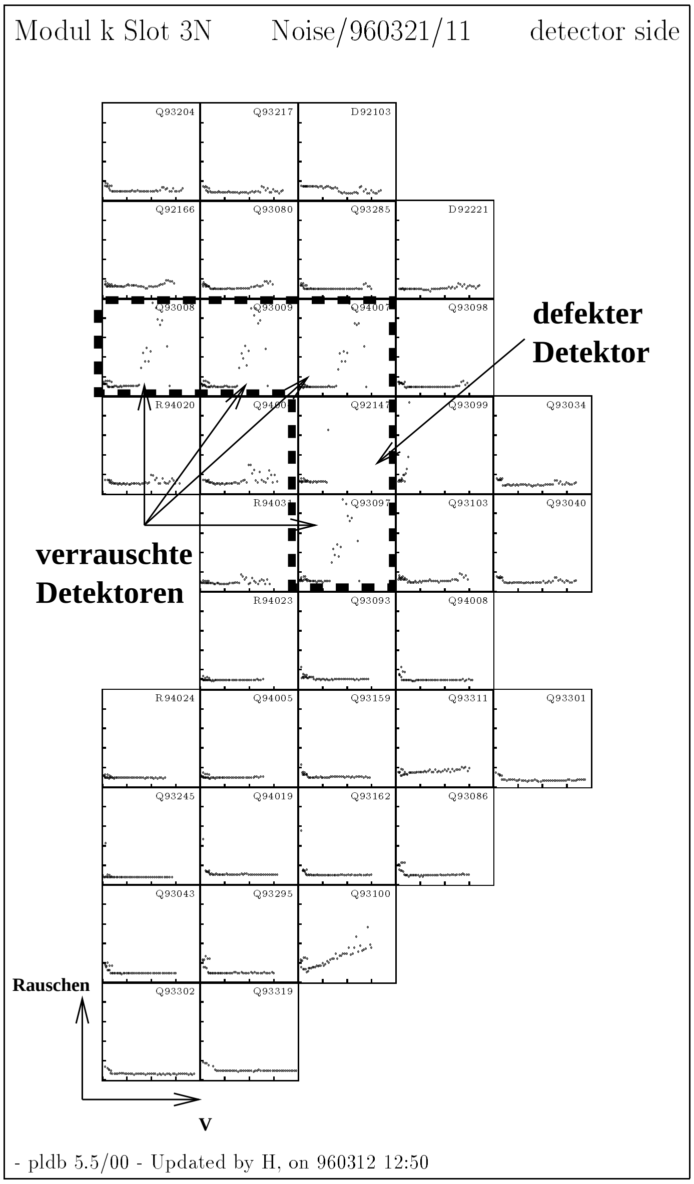


Abbildung 7.6: *Rausch-Spannungs-Messung eines Detektormoduls mit einem Spannungsring, in dem ein defekter Detektor instrumentiert ist, der Auswirkungen auf den gesamten Spannungsring zeigt*

Kapitel 8

Zusammenfassung

Das PLUG-Kalorimeter wird seit 1992 als Subdetektor innerhalb des H1-Experiment betrieben.
Seit dieser Zeit gab es signifikante Unterschiede zwischen den für das PLUG-Kalorimeter in Monte-Carlo-Simulationsrechnungen ermittelten und den im PLUG-Kalorimeter gemessenen Daten. Dieses Problem wurde zunächst auf das „tote“ Material vor dem PLUG-Kalorimeter zurückgeführt, das in bestimmten Winkelbereichen bis zu 5 Wechselwirkungslängen beträgt[RUF92]. Detailierte Untersuchungen zeigten jedoch, daß man die gemessenen Daten durch eine einfache Skalierung der Energie mit den simulierten Verteilungen in Übereinstimmung bringen konnte. Daraus entstand die Vermutung, daß bei der Kalibrierung der elektronischen Kette ein Fehler unterlaufen war.
Im Rahmen dieser Arbeit sollte daher eine erneute Kalibration des PLUG-Kalorimeters durchgeführt werden.
Außerdem sollten umfangreiche Umbaumaßnahmen am Gehäuse der Frontend-Elektronik vorgenommen werde, um die Erdung zu verbessern und so das durch eingestreute Störsignale hervorgerufene Rauschen zu verringern.

Die erneute Kalibration der Ausleseelektronik des PLUG-Kalorimeters wurde im März '95 durchgeführt. Dazu wurde im Labor eine künstliche Ladungsquelle mit Hilfe einer α-Teilchenquelle(^{244}Cm, α-Linie bei 5805keV) kalibriert. Diese Ladungsquelle wurde anstatt eines Detektors in die elektronische Kette des PLUG-Kalorimeters integriert. So konnte man das äquivalente Signal eines mit einem α-Strahler bestrahlten Detektors in die Ausleseelektronik einkoppeln und die Signalauslese des H1-Experiments mit der eingekoppelten Ladungsmenge vergleichen. Dieser Vergleich ergab einen Eichfaktor für die ausgelesene Energie von 81.5keV pro ADC-Kanal, während in der 1992 durchgeführte Kalibration ein Eichfaktor von 32.6keV pro ADC-Kanal ermittelt wurde.

Daraus ergibt sich ein Korrekturfaktor von $C_{corr} = 2.5$, mit dem die vom PLUG-Kalorimeter gemessenen Daten hochskaliert werden müssen.
Ein Vergleich der für das PLUG-Kalorimeter simulierten mit den gemessene Daten unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors ergab eine sehr gute Übereinstimmung dieser Daten(s. 6. Kapitel Abbildung 6.8).
Dies bedeutet für das H1-Experiment, daß mit dem PLUG-Kalorimeter die Messung des Energieflußes im extremen Vorwärtsbereich des H1-Detektors vorgenommen werden kann.

1995 wurde der Umbau des Gehäuses der Adapter- und Analogboxen, die die Frontend-Elektronik des PLUG-Kalorimeters enthalten, zur Verbesserung des Signal-Rauschverhältnisses vorgenommen. Dazu wurde die Adapter- und Analogboxen vollständig demontiert und das Gehäuse, das aus eloxiertem Aluminium gefertigt war, durch verzinktes Stahlblech ersetzt. Außerdem wurde die nach den damaligen Herstellungsvorgaben vollständige Trennung von Signalerde und Erdung des Gehäuses aufgehoben, in dem alle isolierenden Bauteile entfernt wurden. Hierdurch wurde die Erdung der Frontend-Elektronik entscheidend verbessert, was sich in einem Rückgang des Rauschens(vergl. Abbildung 5.4) ausdrückt.
Dies ist aber nicht nur auf den Umbau zurückzuführen, sondern auch auf die im Gegensatz zur Strahlzeit '94 in der Strahlzeit '95 gänzlich anderen Betriebsbedingungen des PLUG-Detektors. Dazu gehört die Verringerung der sensitiven Ebenen von 8 auf 4, die damit verbunden Verringerung der in einem Spannungsring zusammengefaßten Detektoren um den Faktor 2, und die Anlegung der Verarmungsspannung an die Detektoren nur während der Luminositätsphase des HERA-Ringes.
Außerdem konnte aus den zur Verfügung stehenden Detektoren ein besser Auswahlbezüglich ihrer Stabilität getroffen werden.
Durch diese Maßnahmen konnten die Ausfälle von Detektoren von bis zu 31% Ausfälle 1994 auf ca. 2 - 3% Ausfälle 1995(vergl. Abbildung 7.2 gesenkt werden.

Weiterhin konnte der Anstieg des Rauschen mit einem Mittelwert für den Gesamtdetektor von 24keV pro Detektor und einem Maximalwert von 80keV pro Detektor für einen Detektor in der Nähe des Strahlrohrs direkt mit dem Anstieg des Dunkelstroms korreliert werden(s. Abbildung 7.3 u. 7.4), der durch Strahlenschädigung hervorgerufen wird(s. 7. Kapitel). Hauptursache für diese Strahlenschädigung ist die hohe Untergrundstrahlung und unkontrollierter Protonenverlust während der Injektion von Protonen und Positronen in den HERA-Ring[JAR96]. Eine Verbesserung des Ablaufes der

Injektion von Protonen und Positronen in den HERA-Ring würde zu einer Verringerung des Rauschenanstieges führen.

Ein Vergleich der in der Kalibration als defekt markierten Detektoren mit denen in der Kapazitäts- bzw. Rausch-Spannungsmessung als defekt zu erkennenden Detektoren ergab ein gut Übereinstimmung. Aus diesem Grund stellt die Kalibration ein sehr wichtiges Instrument zur Überprüfung der Detektorqualität dar, das im Vergleich zur Kapazitäts- bzw. Rausch-Spannungsmessung, die bis zu 3h dauern kann, den Vorteil hat, daß die Meßdauer nur ca. 20min beträgt, und somit eine schnelle Überprüfung der Detektorqualität darstellt.

Literaturverzeichnis

[BER92] R. Bernier, D. Breton, R.L. Chase, C. Pascaud; H1 Calorimeter Electronics (between shaper and ADC); H1-07/92-237; 1991

[BER86] G. Bertolini and A. Coche; Semicoductor Detectors; North-Holland Publishing Company-Amsterdam; 1968

[BRÄ89] D.Bräunig; Wirkung hochenergetischer Strahlung auf Halbleiterbauelemente; Springer-Verlag; 1989

[BUC96] M. Buck; Diplomarbeit I. Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg; Monte-Carlo-Simulationen zum Einfluß der Synchrotronstrahlung auf die Silizium-Detektoren des PLUG-Kalorimeters; 1996

[BUE91] H.Büker; Halbleiterdetektoren für Kernstahlung; Springer-Verlag; 1971

[FEI96] H. Feick; Vortrag: Kennlinien von Si-Teilchendetektoren und deren Veränderung durch Strahlenbelastung; 1996

[FRE90] E.Fretwurst; Silicon Detector Development for Calometry; NIM A288; 1990

[FRE95] E. Fretwurst, persönliche Mitteilungen; 1995

[GOU82] F. S. Goulding and D. A. Landis; Signal Processing for Semiconductor Detectors; , Lawrence Berkeley Laboratory; IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-29, No. 3, June 1982

[H1C95] H1-Collaboration; First of the Deep-Inelastic Structure of Proton Diffraction; DESY-95-036 / P.L. B348(1995)681

[HIL95] W. Hildesheim, M. Seidel; An Investigation into the Radiation Damage of the Silicon Detectors of the H1-PLUG Calorimeter within the HERA Environment; DESY 95-139; 1995

[HNE65] H. Neuert; Kernphysikalische Meßverfahren; Verlag G.Braun Karlsruhe; 1965

[JAR96] H. Jarck; Diplomarbeit I. Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg; Untersuchungen zum Langzeitverhalten der Siliziumdetektoren des H1-PLUG-Kalorimeter; 1996

[NAG85] J. Nagel; Diplomarbeit I. Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg: Untersuchungen an oxidpassivierten Oberflächensperrschichtdetektoren mit Mosaik-Konfiguration; 1985

[NIC82] E. H. Nicollian, J. R. Brews; MOS(Metal Oxide Semiconductors) Physics and Technology; John Wiley & Sons; 1982

[PAN96] E. Panaro; Doktorarbeit I. Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg; in Arbeit

[DATEN] Daten erstellt von E. Panaro; I. Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg; in Arbeit

[PAN95] E. Panaro, M. Krüger, M. Seidel; Calibration of the H1-PLUG Calorimeter and comparison of Data with Monte-Carlo-Simulations; HH1-09/95-455

[PAU95] H.J.Paus; Physik in Experimenten und Beispielen; Carl Hanser Verlag; 1995

[PLUG94] Hildesheim, Riech, Seidel;The Plug Calorimeter Users Guide; 1994

[RUF92] M.Ruffer; Doktorarbeit I. Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg; Implementierung des siliziuminstrumentierten Plug-Kalorimeters in den H1-Detektor; DESY; Hamburg 1992

[SCH95] P. Schlichthärle; Diplomarbeit I. Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg: Untersuchung von Oberflächeneffekten in Silizium-Detektoren nach Schädigung mit 20keV Elektronen; 1995

[SEI89] M. Seidel; Diplomarbeit I. Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg: Simulationen siliziuminstrumentierter Sandwichkalorimeter mit GEANT3; 1989

[SEI95] M. Seidel; persönliche Mitteilungen; 1995

[SZE82] Sze; Physics of Semiconducter Devices; John Wiley & Sons; 1981

[WUN86] R. Wunstorf; Staatsexamensarbeit I. Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg: Untersuchungen zur Diodencharakteristik von Silizium-Oberflächensperrschichtdetektoren; 1986

Danksagung

Ich möchte mich bedanken bei:

- Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Lindström und Herrn Dr. Fretwurst für die interessante Aufgabenstellung und die richtungsweisenden Diskussion;
- den Mitgliedern der H1-PLUG-Gruppe Dr. M. Seidel, Dr. W. Hildesheim, Dr. V. Riech, Dr. G. Lopez und Dipl. phys. E. Panaro für die anregenden Diskussionen, freundliche Unterstützung und das angenehme Arbeitsklima;
- meine Mitdiplomanden M. Buck und H. Jarck für die vielen Gespräche und die schöne Zeit;
- allen Mitgliedern der Gruppe für Nukleare Meßtechnik für die gute Arbeitsatmosphäre;
- meiner Freundin Uli, die mich in allen Höhen und Tiefen begleitet hat;

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir diese Ausbildung ermöglicht haben.

Erklärung

Ich versichere, daß ich diese Arbeit selbstständig ohne die Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hinweise angefertigt habe.

Hamburg, den

Michael Krüger