Z-Kalibration der zentralen Spurenkammer des H1-Detektors bei HERA

Martin Tluczykont

Diplomarbeit am
II. Institut für Experimentalphysik
der Universität Hamburg

Februar 1999

Meinem Vater

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit beschreibt einen Algorithmus zur Z-Kalibration der zentralen Spurenkammer CJC des H1-Detektors an der Speicherringanlage HERA beim DESY, der eine iterationslose Kalibration der Daten ermöglichen soll. Die Kalibration beruht auf einer Anpassung an den zentralen Silizium Vertex-Detektor CST, der seit 1997 aktiv ist.

Bei den im Rahmen dieser Diplomarbeit erfolgten Untersuchungen wurde eine systematische Verschiebung der Z-Koordinate der zentralen Spurenkammer beobachtet. Diese Verschiebung hängt von der Summe der aus der Ladungsteilung gemessenen Pulsintegrale ab. Es wird beschrieben, wie eine Korrektur eingeführt wurde, die diese Verschiebung teilweise aufhebt.

Abstract

This work describes an algorithm for the calibration of the central jet chamber CJC of the H1-detektor at the collider facility HERA (DESY). The algorithm allows a calibration without iteration over the data and is based upon a fit to the central silicon-vertex-tracker CST, which is operating since 1997.

A systematic shift of the Z-coordinate of the central jet chamber has been observed, which depends on the sum of the charges, that are calculated by the charge division method. A correction has been introduced, which partly reduces this effect.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1

Einleitung

Die Hochenergiephysik beschäftigt sich mit der Beobachtung und der quantitativen Erfassung der kleinsten Bausteine der Materie und deren fundamentalen Wechselwirkungen. Je weiter man in das Innere der Materie vordringen will, desto höhere Energien sind dafür notwendig.

Seit 1990 besteht am **D**eutschen **E**lektronen **Sy**nchrotron **DESY** die Speicherringanlage **HERA**, mit der Elektronen und Protonen in zwei voneinander unabhängigen Speicherringen auf hohe Energien beschleunigt werden (27.5 GeV für Elektronen und 820 Gev für Protonen). An verschiedenen Wechselwirkungspunkten werden die Elektronen und Protonen zur Kollision gebracht. Die Schwerpunktenergie der Kollision ist etwa 300 GeV.

Das Proton hat eine Ausdehnung in der Größenordnung von 10^{-13}m. Bis heute ist es in keinem Experiment gelungen, eine Struktur des Elektrons nachzuweisen. Es ist jedoch möglich, eine *obere Grenze* für die Ausdehnung des Elektrons experimentell zu bestimmen. Die obere Grenze für den Radius des Elektrons ist in der Größenordnung von 10^{-18}m. Bei der Kollision des Elektrons und des Protons kann daher das Elektron als punktförmig angenommen werden. Bei der Streuung am Proton wird das Elektron wie eine Sonde benutzt. Dabei findet eine Wechselwirkung zwischen dem Elektron und den Bestandteilen des Protons statt, die durch die Austauschteilchen der fundamentalen Wechselwirkungen vermittelt wird, so daß Rückschlüsse auf die Struktur des Protons gezogen werden können. Die dabei erreichte Auflösung ist mit 10^{-18}m in der Größenordnung der Grenze der Elektronenausdehnung.

Aus der hohen Schwerpunktenergie der Kollision entstehen neue Teilchen, die teilweise wieder in andere Teilchen zerfallen. Zum Nachweis der Zerfalls- und Reaktions-Produkte befinden sich an den Wechselwirkungspunkten Teilchendetektoren. Einer dieser Detektoren ist der Detektor der H1-Kollaboration, der aus verschiedenen Detektorkomponenten besteht. Der zentrale Bereich des H1-Detektors besteht aus einem Spurendetektor, dessen größter Teil die zentrale Spurenkammer CJC ist. Im Zentrum der zentralen Spurenkammer befindet sich seit 1996 ein weiterer Detektor: der zentrale Silizium Vertex Detektor CST.

Um die Genauigkeit eines Detektors zu optimieren, muß eine Kalibration durchgeführt werden. Diese Diplomarbeit entstand im Rahmen der H1-Kollaboration und stellt eine Methode zur Kalibration der Z-Messung der zentralen Spurenkammer vor, die gegenüber der bisher verwendeten Methode folgende Unterschiede aufweist:

1. Die wesentlich höhere Genauigkeit des CST Detektors soll bei der Kalibration ausgenutzt werden.
2. Die Methode benötigt keine Iteration über die Daten und ermöglicht somit eine Kalibration während der Datenauslese.

Die vorliegende Arbeit ist in 5 Kapitel gegliedert:
Auf die Einleitung in diesem Kapitel folgt in Kapitel 2 eine allgemeine Beschreibung der Speicherringanlage HERA und des H1-Detektors, sowie eine genauere Beschreibung der Detektoren CJC und CST.
Kapitel 3 stellt die Kalibrationsmethode und eine Untersuchung derselben auf der Basis einer Monte Carlo Simulation vor.
In Kapitel 4 soll die Anwendung der Kalibrationsmethode auf Daten aus dem Jahr 1997 beschrieben werden.
Abschließend wird in Kapitel 5 eine Zusammenfassung gegeben.

2

Der H1 Detektor bei HERA

2.1 Der Speicherring HERA

Im Speicherring HERA[1] werden Protonen und Elektronen in zwei voneinander unabhängigen Ringen gespeichert und an zwei Wechselwirkungspunkten zur Kollision gebracht. Die Bahnführung der Elektronen mit einer Energie von 27.5 GeV wird durch ein *warmes* Magnetsystem mit 0.165 T gewährleistet. Im Protonenring sind bei einer Energie von 820 GeV stärkere Ablenkungsmagnete nötig: supraleitende, Helium gekühlte Dipolmagnete mit einer Feldstärke von 4.68 T gewährleisten hier die Bahnführung.
Der HERA-Ring hat einen Umfang von 6.3 km und befindet sich ca. 20 m unter der Erde. In Abbildung 2.1 ist die gesamte Anlage schematisch dargestellt. In den Tabellen 2.1 und 2.2 sind einige Betriebsparameter des Speicherrings aufgelistet. Nähere Informationen finden sich zum Beispiel bei [1].
Es werden Elektronen- und Protonen-Pakete (*bunches*) beschleunigt. Die Beschleunigung

Schwerpunktenergie [GeV]	300
maximaler Impulsübertrag [GeV^2/c^2]	98400
Luminosität [cm^{-2}s^{-1}]	$1.5 \cdot 10^{31}$
Zeitlicher Bunch-Abstand [ns]	96
Umfang [m]	6336

Tabelle 2.1: Betriebsparameter für HERA

geschieht stufenweise über Linearbeschleuniger und die Ringanlagen DESY und PETRA (vgl. 2.1):

- In einem H^--Linearbeschleuniger werden H^--Ionen auf 50 MeV vorbeschleunigt, um dann in das Synchrotron DESY III injiziert zu werden.
- Beim Eintritt in das Synchrotron werden die Elektronen vom Wasserstoffkern abgestreift. Die Wasserstoffkerne (Protonen) werden in DESY III auf 7.5 GeV beschleunigt. Dann werden sie in PETRA injiziert.
- PETRA erhöht die Energie der Protonen auf ihre Einschußenergie für HERA von 40 GeV.

[1] *H*adron *E*lektron *R*ing *A*nlage

- Im Speicherring HERA werden die Protonen schließlich auf ihre Maximalenergie von 820 GeV beschleunigt.

Die Elektronen werden nach dem gleichen Schema über den Elektronen-Linearbeschleuniger, DESY II und PETRA auf die Einschußenergie von 14 GeV beschleunigt. Die Maximalenergie der Elektronen nach der Beschleunigung in HERA beträgt 27.5 GeV. Die Schwerpunktenergie bei der Kollision der Elektronen- und Protonen-Pakete beträgt 300 GeV.

Parameter	e^-**-Ring**	**p-Ring**
Krümmungsradius [m]	608	588
Teilchenpakete	210	210
Teilchenzahl	$0.8 \cdot 10^{13}$	$2.1 \cdot 10^{13}$
Teilchenstrohm [mA]	60	160
Paketlänge [mm]	30	440
Injektionsenergie [GeV]	14	40
Maximalenergie [GeV]	30	820
Führungsfeld [T]	0.165	4.68

Tabelle 2.2: Betriebsparameter für die unabhängigen Speicherringe von HERA

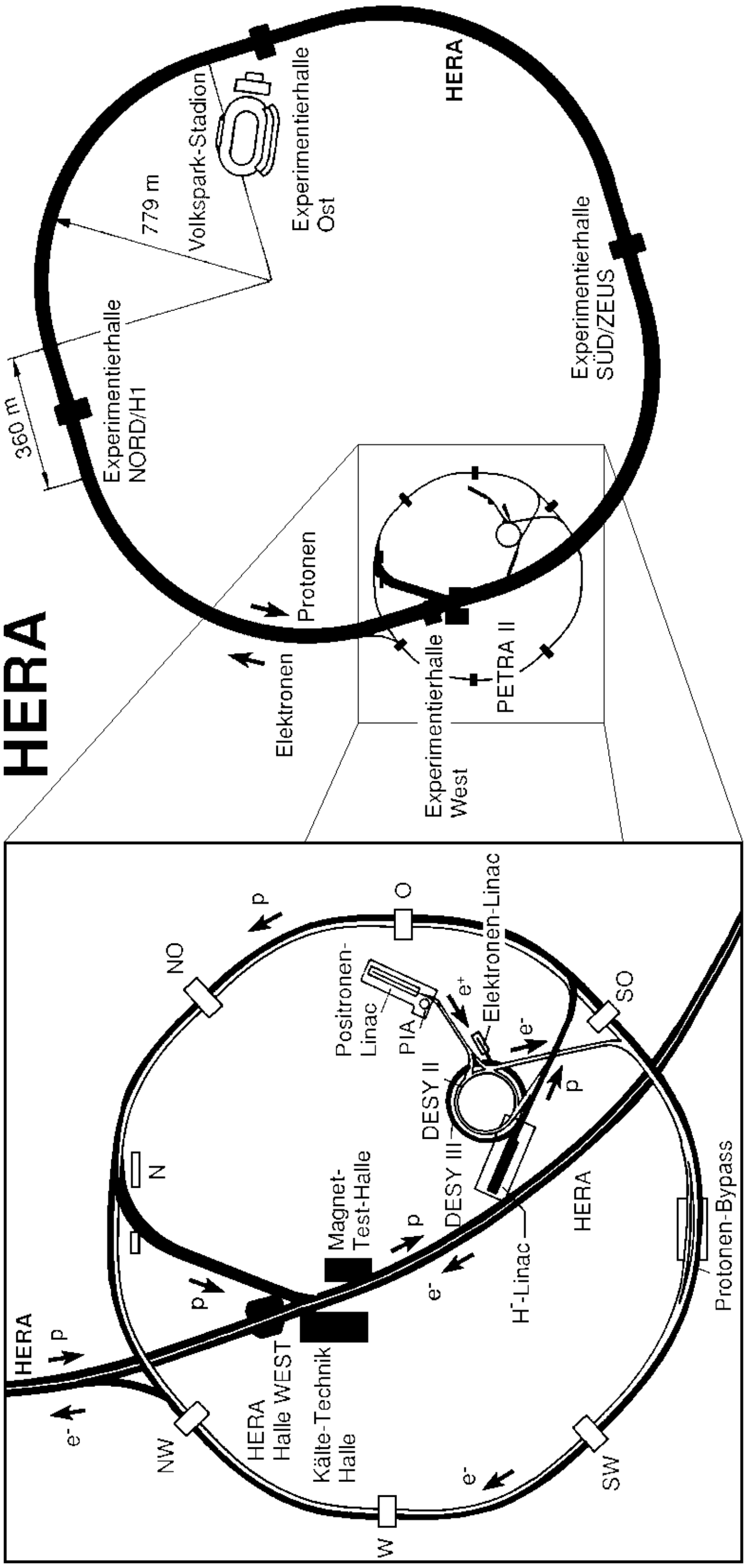


Abbildung 2.1: Die Speicherringanlage HERA

2.2 HERA-Physik

In der Einleitung wurde bereits erwähnt, daß der Elektron-Proton-Speicherring HERA die Untersuchung der Struktur des Protons anhand der Studie der tief inelastischen Elektron-Proton-Streuung, mit Impulsüberträgen von bis zu $Q^2_{\max} = 10^5$ GeV^2, ermöglicht. Bei der Beschreibung des Streuprozesses wird von dem *Zuschauermodell* ausgegangen, bei dem das Elektron (e^-) mit einem der drei Quarks des Protons eine Wechselwirkung eingeht, und die beiden anderen Quarks nicht an der Wechselwirkung teilnehmen (*Zuschauerquarks*). In den Abbildungen 2.2 und 2.3 sind die Feynmandiagramme der wichtigsten dabei auftretenden Prozesse dargestellt. In Abbildung 2.2 ist die Elektron-Quark-Streuung dargestellt: Bei diesem Prozess tauscht das Elektron mit einem der drei Quarks des Pro-

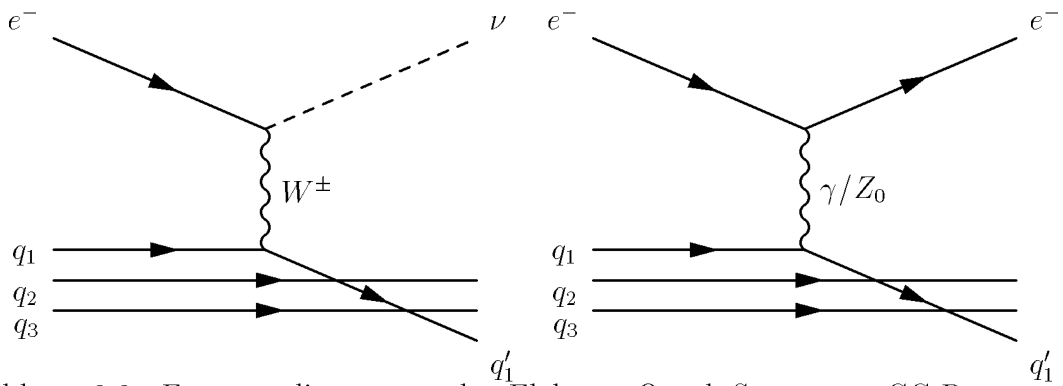


Abbildung 2.2: Feynmandiagramme der Elektron-Quark-Streuung: CC-Prozess (links) und NC-Prozess (rechts).

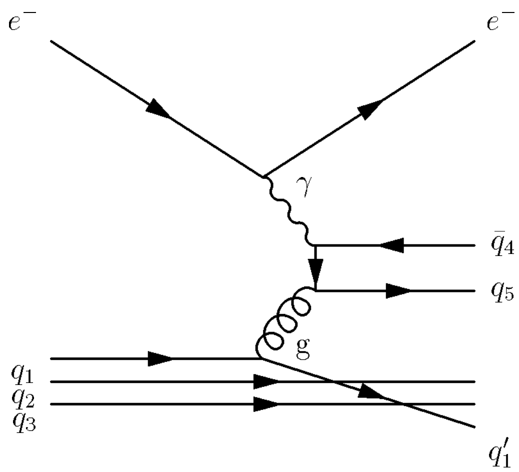


Abbildung 2.3: Feynmandiagramm der Photon-Gluon-Fusion.

tons ein Wechselwirkungsquant aus und geht in ein Lepton über. Das *Stromquark* q_1 geht dabei in das Quark q_1' über. Man unterscheidet zwischen neutralen Strömen (NC[2]), bei de-

[2]Neutral currents

nen das Austauschteilchen ein Z^0-Boson oder ein γ-Quant ist (*elektroschwache* WW), und geladenen Strömen (CC[3]), bei denen die Wechselwirkung durch $W^{\pm}$-Bosonen übertragen wird. In Abbildung 2.3 ist der Prozess der Photon-Gluon-Fusion dargestellt: Eines der Quarks des Protons (q_1) emittiert ein Gluon, welches mit einem vom Elektron emittierten Photon fusioniert, um ein Quark-Antiquark-Paar (q_5, $\bar{q}_4$) zu erzeugen. Näheres zur Physik bei HERA findet sich z.B. bei [17].

[3] Charged currents

2.3 Auswirkungen der Z-Kalibration

In diesem Abschnitt soll stichwortartig auf die Auswirkungen einer verbesserten Z-Kalibration auf die Messungen und die Physik bei H1 eingegangen werden.
Grundsätzlich verbessert die Z-Kalibration die Bestimmung der Z-Koordinate durch die zentrale Spurenkammer. Die aus der erhöhten Präzision der Messung resultierenden Vorteile sollen im Folgenden angesprochen werden:

- Eine Verbesserung der Genauigkeit in Z erleichtert das Anbinden von CJC-Spuren an andere Detektorkomponenten.

- Eine höhere Auflösung in Z bewirkt eine Verbesserung der Bestimmung der Spurparameter θ (Polarwinkel) und z_0 (Z-Koordinate am dca-Punkt). Die Spurqualität der CJC-Spuren wird somit erhöht.

- Eine höhere Genauigkeit in θ ermöglicht eine Verbesserung der e^--Kinematik: der Impulsübertrag Q^2 der Elektronen ist gegeben durch:

  $$Q^2 = 4EE' \cos\frac{\theta}{2}$$

  Für die Auflösung von Q^2 ergibt sich eine Abhängigkeit von der θ-Auflösung σ_θ:

  $$\sigma_{Q^2} = 2EE' \cdot \sigma_\theta \cdot \sin\frac{\theta}{2},$$

  wobei E und E' die Strahlenergieen der Protonen und der Elektronen sind.

- Der Z-Vertex ist die Z-Koordinate des Wechselwirkungspunktes der e^--Proton Strahlen. Er wird ereignisweise aus den Spuren der CJC bestimmt. Die Erhöhung der Spurqualität bewirkt auch eine Verbesserung der Z-Vertex-Bestimmung. Die Verbesserung des Z-Vertex hat umgekehrt eine Auswirkung auf die Bestimmung der Spurparameter θ und Z_0 von vertexangepaßten Spuren.

- Bei der Berechnung der Masse eines Teilchens werden die Viererimpulse der beobachteten Zerfallsprodukte zum Gesamtviererimpuls $\mathbf{P}$ zusammenadiert. $\mathbf{P}$ ist der Viererimpuls des zerfallenden Teilchens und hängt vom Dreierimpuls $\vec{p}$ ab. Die Masse m des Teilchens ergibt sich dann aus der Quadrierung des Gesamtviererimpulses. In der CJC werden der Transversalimpuls p_t und θ gemessen. Der Betrag des Dreierimpulses $|\vec{p}|$ hängt von diesen Größen ab: $p = p_t/\tan(\theta)$. Eine Verbesserung der Z-Auflösung kann somit auch eine Verbesserung der Massenauflösung herbeiführen.

2.4 Der H1-Detektor und seine Komponenten

Am Wechselwirkungspunkt in der Halle Nord befindet sich der Detektor des H1-Experimentes. Der H1-Detektor ist ein Hybrid-Detektor aus verschiedenen Subsystemen. Abbildung 2.4 zeigt eine dreidimensionale Ansicht des Detektors und in Bild 2.5 ist eine Seitenansicht dargestellt. Im Folgenden werden einzelne Komponenten des Detektors angesprochen. Auf die für diese Arbeit relevanten Detektoren CJC und CST wird in den Kapiteln 2.5 und 2.6 näher eingegangen.

Der Spurendetektor Der Spurendetektor von H1 (Abbildungen 2.6, 2.7) ermöglicht das simultane *triggern*[4] von Spuren, Spurmessung und Energieverlust-Messung (dE/dx). Die Energieverlustmessung kann zur Teilchenidentifikation verwendet werden. Der Spurendetektor wurde zur Rekonstruktion von Jets mit hohen Teilchen-Dichten und zur Messung von Impuls und Winkel geladener Teilchen konzipiert [1]. Der Spurendetektor besteht aus drei Teilen: dem zentralen Spurendetektor CTD[5], dem Vorwärts-Spurendetektor FTD[6] und der Rückwärts-Driftkammer BDC [7] . FTD und CTD sind mechanisch voneinander unabhängig gebaut worden. Die einzelnen Kammern besitzen alle ihr eigenes Gasvolumen. In Abschnitt 2.5 wird weiter auf die Funktionsweise einer Spurenkammer eingegangen.

- Im zentralen Bereich des Spurendetektors (siehe Abbildung 2.6) befinden sich die zentralen Spurenkammern CJC I und CJC II[8]. Die CJC ermöglicht die Spurrekonstruktion und eine Teilchenidentifikation durch Messung des spezifischen Energieverlustes dE/dx (hierzu siehe z.B. [4], [15]).

- Die Z-Kammern CIZ[9] und COZ[10] liefern eine genauere Z-Messung, als es die zentrale Spurenkammer ermöglicht. Die CIZ befindet sich innerhalb der CJC I, und die COZ liegt zwischen CJC I und II.

- Die Zentral- und Vorwärts-Vieldraht-Proportional-Kammern CIP, COP und FWPC ermöglichen eine schnelle Rekonstruktion des Vertex zur Auslösung der Datenauslese über den gesamten Raumwinkel.

- 1996 wurden zwei weitere Detektoren im zentralen und im rückwärtigen Bereich eingebaut: Der zentrale Silizium-Vertexdetektor CST[11] und der Rückwärts-Silizium-Spuren-Detektor BST[12]. Der CST Detektor besteht aus zwei Lagen Silizium(Si)-Sensoren und liefert eine wesentlich höhere Auflösung als die zentrale Spurenkammer, sowohl in $r\phi$ als auch in Z.

[4] Auslösen der Datenauslese
[5] *C*entral *T*rack *Detector*
[6] *F*orward *T*rack *Detector*
[7] *B*ackward *D*rift *C*hamber
[8] *C*entral *J*et *C*hamber
[9] *C*entral *I*nner *Z*-chamber
[10] *C*entral *O*uter *Z*-chamber
[11] *C*entral *S*ilicon *T*racker
[12] *B*ackward *S*ilicon *T*racker

Das Kalorimeter In einem Kalorimeter werden hochenergetische Teilchen durch totale Absorption nachgewiesen. Ein auftreffendes Teilchen wechselwirkt mit dem Detektormaterial und erzeugt dabei Sekundärteilchen, die wiederum über Wechselwirkungen mit dem Detektormedium ihre Energie verlieren. Die gesamte Energie des Teilchens wird im Detektor absorbiert und kann so nachgewiesen werden [2]. Das H1-Kalorimeter besteht aus einem elektromagnetischen und einem hadronischen Teil. Es ermöglicht die Bestimmung der Energie sowohl geladener, als auch neutraler Teilchen. Im Vorwärts- und Zentralbereich besteht das elektromagnetische Kalorimeter aus alternierenden Lagen von Bleiplatten (2.4mm) und Flüssig-Argon Schichten (3mm) (Flüssig-Argon Kalorimeter). Die Bleiplatten dienen als Absorbermedium und die Schichten aus flüssigem Argon als Auslesemedium. Auch im hadronischen Kalorimeter ist flüssiges Argon das Auslesematerial. Die Absorberschichten bestehen hier jedoch aus Edelstahl. Ein Kupfer-Silikon-Sandwich dient der Messung von hadronischen Spuren unter sehr kleinem Winkel ($0.7° \leq \theta \leq 4°$). Im Rückwärtsbereich befindet sich das SPACAL (SPAghetti CALorimeter), das ebenfalls aus einem elektromagnetischen und einem hadronischen Teil besteht.

Der Magnet Der Magnet des H1-Detektors besteht aus einer supraleitenden Solenoidspule, die ein Feld parallel zur Z-Achse erzeugt, und einem Eisenjoch. Das Eisen dient der Rückführung des magnetischen Flusses. Es ist mit Spalten versehen, in denen Streamerkammern eingebaut sind. Das so *instrumentierte* Eisen dient als äußerste Absorptionsschicht des hadronischen Kalorimeters und dem Nachweis von Myonen. Das erzeugte Feld ist nahezu homogen mit einem mittleren Wert von 1.15 T.

Die Myonenkammern Die Myonenkammern liegen zwischen dem *instrumentierten* Eisen und der Betonabschirmung. Sie bestehen aus drei Lagen Driftkammern. Im Vorwärtsbereich sind es vier Lagen Driftkammern und ein Myonenspektrometer.

Nähere Informationen zu den einzelnen Detektorkomponenten und dem H1-Experiment finden sich bei [1].

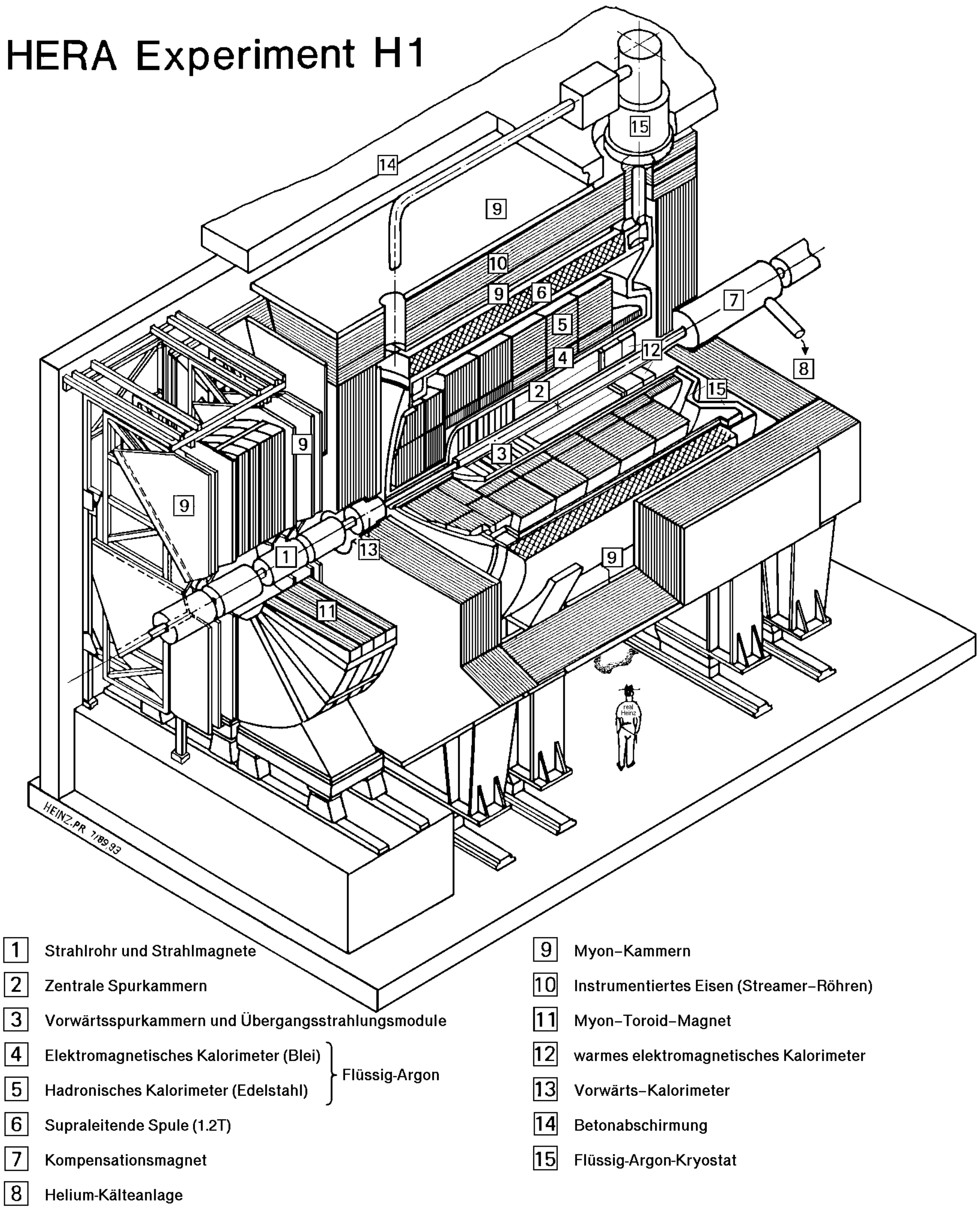


Abbildung 2.4: Der H1-Detektor

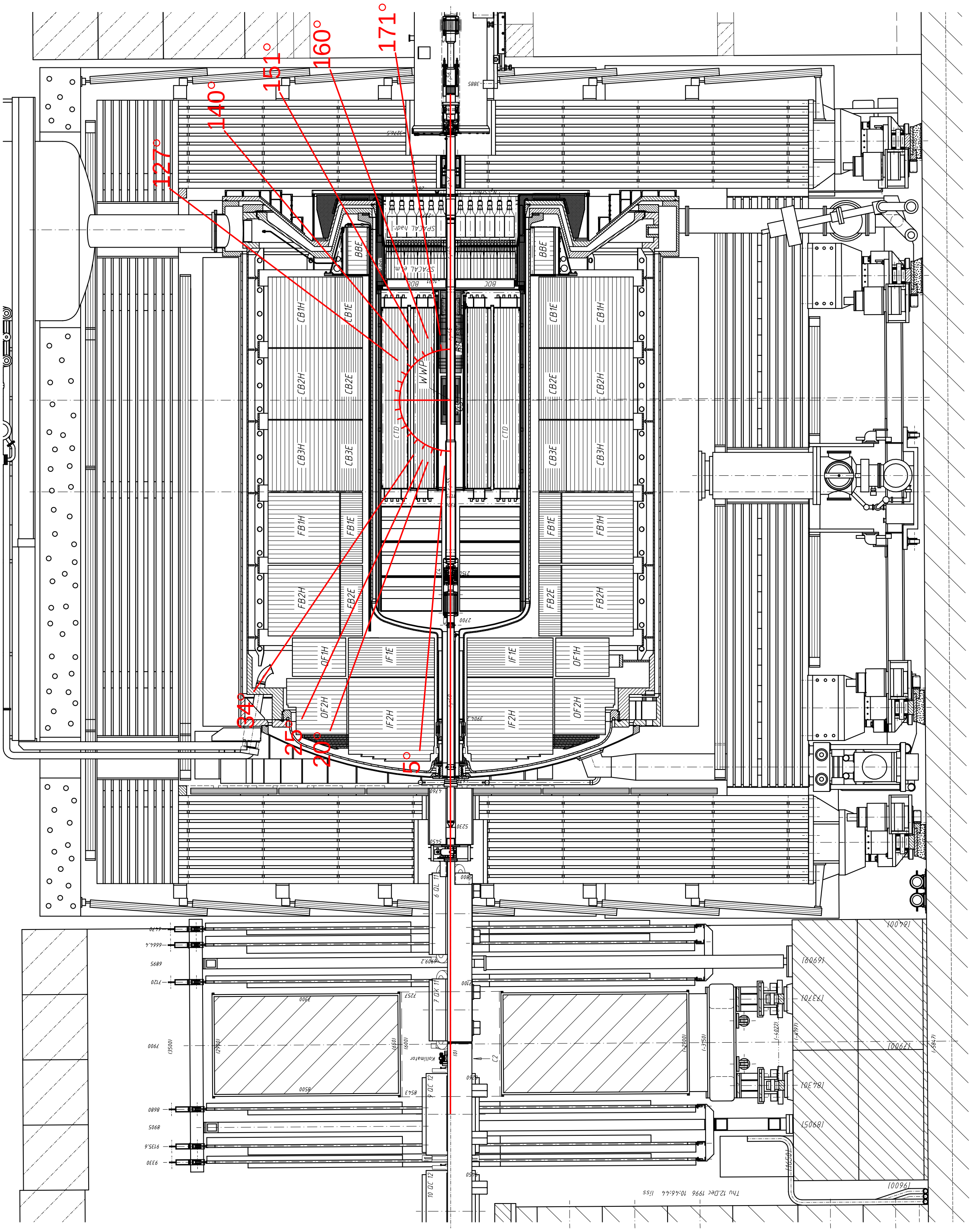


Abbildung 2.5: Der H1-Detektor, technische Zeichnung

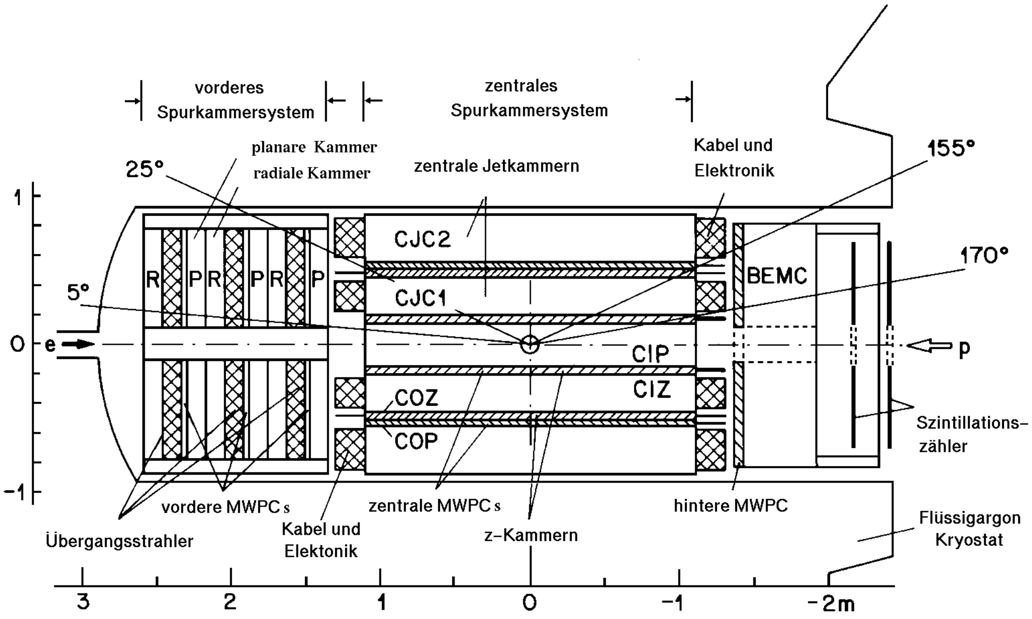


Abbildung 2.6: Der Spurendetektor bei H1

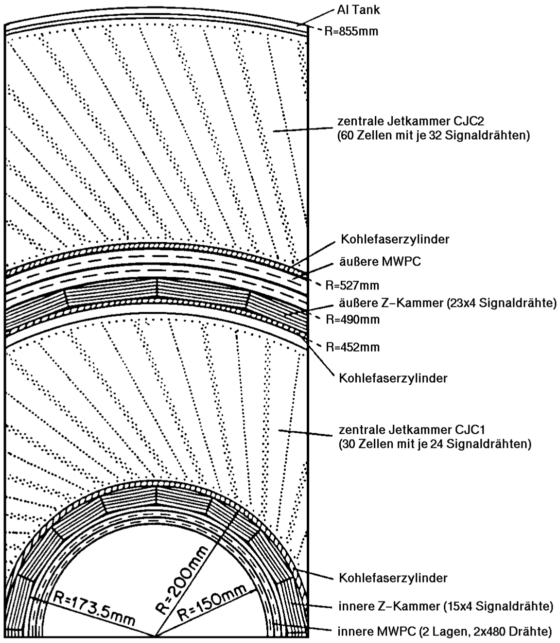


Abbildung 2.7: Der Spurendetektor bei H1, Sicht in Strahlrichtung.

2.5 Die zentrale Spurenkammer CJC

2.5.1 Der Detektor

Detektor Parameter Die zentrale Spurenkammer CJC ist in CJC I und CJC II unterteilt. Die Gas-Volumina der beiden Teile der Kammer sind nicht voneinander getrennt. In Tabelle 2.4 sind einige Betriebsparameter aufgelistet. Die Designwerte der Kammer lassen sich der Tabelle 2.3 entnehmen.

$r\phi$-Auflösung $\sigma_{r\phi}$ [μm]	100
Doppelspurauflösung [mm]	2.5
Z-Auflösung σ_Z [mm]	22
Energieverlustauflösung $\sigma_{dE/dx}$ [%]	6
Endwanddicke [X_0]	0.15
Zylinderwanddicke [X_0]	0.01

Tabelle 2.3: CJC-Designwerte

Parameter	CJC I	CJC II	CJC
Signaldrähte	720	1920	2640
Potentialdrähte	1500	3960	5460
Felddrähte	300	600	900
Kathodendrähte	1470	3900	5370
Zellen	30	60	90
Drähte pro Zelle			
Signaldrähte	24	32	
Potentialdrähte	50	66	
Felddrähte	10	10	
Kathodendrähte	49	65	
Abmessungen			
Innerer Radius [mm]	203.5	527.0	
Äußerer Radius [mm]	454.0	843.0	
Aktive radiale Länge [mm]	224.5	296.0	520.5
Maximale Driftlänge, innerster Signaldraht [mm]	44.5	43.1	
Maximale Driftlänge, äußerster Signaldraht [mm]	22.9	28.5	
Signaldrahtabstand [mm]	10.16	10.16	10.16
Länge in Z-Richtung [cm]	220	220	220
Gasvolumen [m^3]	1.14	3.08	4.22
Mittlere Zellneigung [°]	30	30	30

Tabelle 2.4: In diser Tabelle sind einige CJC-Betriebsparameter aufgelistet. *Quelle:* [7]

Detektor-Geometrie Die hohlzylindrische Form der CJC garantiert eine Abdeckung des gesamten Azimutal-Winkelbereiches ($\phi = 0$ bis 2π). CJC I und II sind in Z gleich lang. Mit der CJC I lassen sich Spuren unter dem Winkel θ im Bereich von 10° bis 170°

messen.
Die zentrale Spurenkammer ist im Bereich der CJC I in 30 Zellen und im Bereich der CJC II in 60 Zellen aufgeteilt. In der CJC I besitzt jede Zelle 24 Signaldrähte (*Anoden*), 49 *Kathoden*drähte und 50 Potentialdrähte. In der CJC II sind es 32 Signal-, 65 Kathoden- und 66 Potentialdrähte. Alle Drähte sind parallel zur Strahlachse (Z-Richtung) gespannt und bilden in jeder Zelle eine um 30° zur Radialrichtung geneigte Ebene. Diese Neigung bringt unter anderem folgende Vorteile mit sich:

- Durch das Magnetfeld in der Kammer verändert sich die Driftrichtung der Elektronen (*Lorentzwinkel*). Die Zellneigung kompensiert diesen Effekt teilweise, so daß die Elektronen senkrecht zu hochenergetischen Spuren (*stiff tracks*) driften. Dadurch wird die $r\phi$-Auflösung verbessert.

- Zunächst kann nicht entschieden werden, ob ein Signal auf dem Draht von einem Teilchen links oder rechts vom Draht herrührt. Ein Spursegment in einer Zelle hat immer eine *Spiegelspur*. Aufgrund der Zellneigung läßt sich jedoch nur das richtige Spursegment in einer benachbarten Zelle fortsetzten, so daß aus der Aneinanderreihung der richtigen Spursegmente auch die richtige Spur rekonstruiert werden kann.

Zwei benachbarte Signaldrähte sind durch zwei Potentialdrähte getrennt. Dadurch wird die Oberflächenfeldstärke und die gegenseitige Beeinflussung (*cross talk*) der Signaldrähte um den Faktor 2, verglichen mit nur einem Potentialdraht, reduziert. Genaueres hierzu findet sich bei [7].

Detektor-Physik Abbildung 2.8 ist eine schematische Darstellung der Anordnung der Signal-, Potential- und Kathodendrähte in einer Driftkammer. Das Bild zeigt einen Ausschnitt aus einer Zelle. In Abbildung 2.7 auf Seite 21 ist die Anordnung der Drähte in der zentralen Spurenkammer erkennbar. Eine ganze Zelle besteht in der CJC I aus 24 ähnlichen Anordnungen und in der CJC II aus 32. Zwischen den Signaldrähten (Anoden) und den Kathodendrähten liegt eine Hochspannung an. Durch die Potentialdrähte bilden sich zwei Bereiche mit unterschiedlichen elektrischen Feldern aus. Fliegt ein geladenes Teilchen durch die Kammer, so werden Gasatome ionisiert. Die bei dieser *Primärionisation* erzeugten negativen und positiven Ladungsträger driften in entgegengesetzten Richtungen auseinander. Die Driftrichtung der Elektronen ist in Abbildung 2.8 dargestellt: sie driften zum Signaldraht. In dem Bereich um den Signaldraht, in dem das elektrische Feld $\overrightarrow{E}$ eine annähernd radialsymmetrische Form hat, gilt $|\overrightarrow{E}| \sim 1/r$. Dieser Bereich wird Gasverstärkungsbereich genannt. Die elektrische Feldstärke steigt im Gasverstärkungsbereich zum Signaldraht hin an. Durch die Beschleunigung gewinnen die Elektronen mehr Energie als sie durch elastische Stöße verlieren, so daß mit der dazugewonnenen Energie mehr Gasatome ionisiert werden können, deren Elektronen wiederum beschleunigt werden und dann ionisieren, so daß sie eine weitere *Verstärkung* erzielen können. Die zentrale Spurenkammer des H1-Detektors wird im *Proportionalbereich* betrieben, in dem die auf dem Draht deponierte Ladung proportional zur Ladung aus der Primärionisation ist.

Material Die Signaldrähte bestehen aus goldplattiertem Wolfram mit einem Anteil von 3% Rhenium. Sie haben einen Durchmesser von 20 μm und sind mit dem bloßen Auge

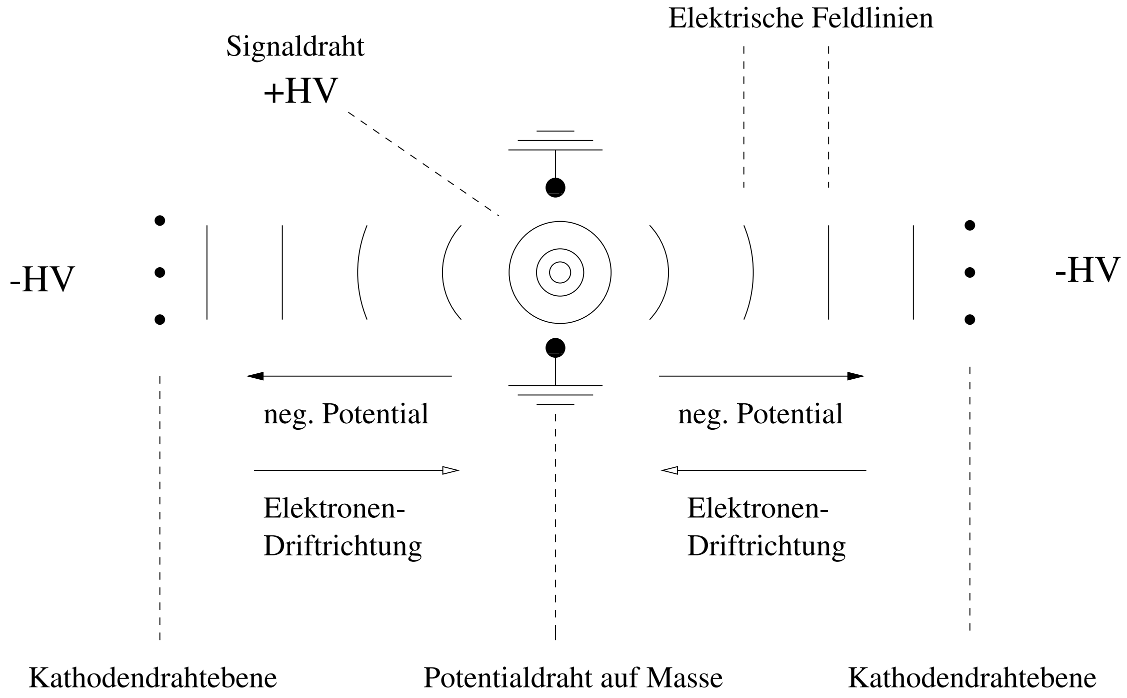


Abbildung 2.8: Diese Abbildung zeigt die schematische Darstellung einer Zelle aus einer Driftkammer. Zum Signaldraht hin wird das elektrische Feld stärker. Die Elektronen driften in die zum negativen Potential entgegengesetzte Richtung.

kaum erkennbar. Der erste und der letzte Draht jeder Zelle ist mit 25 μm etwas dicker. Ende 1997 wurde die CJC neu verdrahtet.
Die Wände der CJC bestehen aus 10 mm (Endwände) bzw. 1 mm (Seitenwände) dickem Glasfaser verstärktem Kunststoff (GfK). Dieses Material zeichnet sich durch eine geringe Materialbelegung, eine große mechanische Festigkeit und gute Isolationseigenschaften aus. Als Driftkammergas wird ein Argon-Ethan-Gemisch im Verhältnis 50:50 mit wenigen ppm Wasser verwendet.

2.5.2 Das Prinzip der Z-Messung

Da im zentralen Spurendetektor die Signaldrähte parallel zur Z-Achse gespannt sind, wird die Messung der Z-Koordinate in der CJC über das Prinzip der Ladungsteilung [3] durchgeführt. Wie in Abbildung 2.9 angedeutet, teilt sich die von einem ionisierenden Teilchen erzeugte und auf dem Draht deponierte Ladung auf, und fließt zu den Drahtenden ab. Das Verhältnis der an den Drahtenden gemessenen Ladungen ist ein Maß für die Position des Teilchendurchganges (Treffer) entlang des Drahtes. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 2.9 dargestellt.

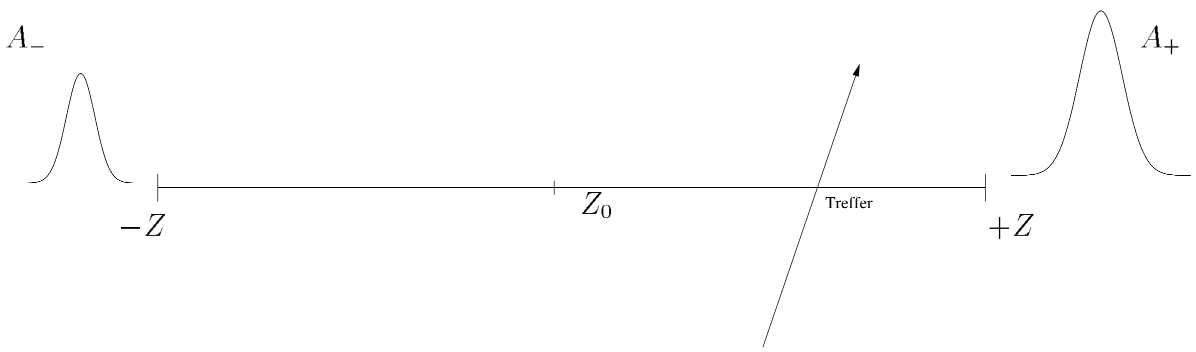


Abbildung 2.9: Signale auf einem Draht der zentralen Spurenkammer

Die am Ort Z deponierte Ladung Q teilt sich gemäß den Drahtwiderständen in zwei Teile Q_+ und Q_- auf. Der Quotient beider Ladungsteile entspricht dem Quotienten der entsprechenden Drahtabschnitte und ist durch

$$\frac{Q_+}{Q_-} = \frac{R_+}{R_-} = \frac{\frac{L_{\text{eff}}}{2} + (Z - Z_0)}{\frac{L_{\text{eff}}}{2} - (Z - Z_0)} \tag{2.1}$$

gegeben, wobei Z_0 die Drahtmitte ist. Die hier eingeführte halbe *effektive Drahtlänge* $L_{\text{eff}}/2$ erhält man durch Berücksichtigung der an die Signaldrähte angeschlossenen Koppelkondensatoren und der Ausleseelektronik: diese Bauteile sind zusätzliche Widerstände und lassen den Draht länger erscheinen, als er ist. Die analogen Ladungspulse an den Kondensatoren werden mit FADCs[13] digitalisiert (siehe Abschnitt 2.5.3 auf der nächsten Seite). Das Ergebnis der Messung und der Digitalisierung sind die Rohdaten A_- und A_+ (Pulsintegrale). Um die Eigenschaften der Elektronik zu berücksichtigen, werden *Verstärkungsfaktoren* g_+ und g_- eingeführt. Sie sind so definiert, daß das Produkt aus deponierter Ladung $Q_\pm$ und *Verstärkungsfaktor* $g_\pm$ das Pulsintegral $A_\pm$ ergibt:

$$A_- = Q_- \cdot g_- \qquad\qquad A_+ = Q_+ \cdot g_+ \tag{2.2}$$

Setzt man 2.2 in 2.1 ein, so erhält man die ***Z-Bestimmungs-Gleichung* 2.3** [4]:

$$\boxed{Z_{\text{cjc}} = Z_0 + \frac{L_{\text{eff}}}{2} \frac{1 - \frac{A_-}{A_+}\frac{g_+}{g_-}}{1 + \frac{A_-}{A_+}\frac{g_+}{g_-}} \qquad (2.3)}$$

Hierbei wurde Z aus Gleichung 2.1 durch Z_{cjc} ersetzt. A_-/A_+ wird, wie beschrieben, aus der Messung der Ladungspulse gewonnen. Die Werte $L_{\text{eff}}/2$ und g_+/g_- können abgeschätzt werden: das Verhältnis der Verstärkungsfaktoren muß in der Nähe von eins liegen (siehe Abbildung 4.2 auf Seite 59). Die halbe effektive Länge läßt sich aus den beteiligten Widerständen berechnen:

$$\frac{L_{\text{eff}}}{2} = \frac{(R_{\text{Draht}} + 2R_{\text{C}}) + 2R_{\text{Elektr.}}}{R_{\text{Draht}}} \tag{2.4}$$

[13] *F*lash *A*nalog *D*igital *C*onverter

Dies sind jedoch nur grobe Abschätzungen für die 2640 unterschiedlichen effektiven Drahtlängen. Um die Z-Auflösung der zentralen Spurenkammer zu optimieren, muß ein *Kalibration* durchgeführt werden, die genauere Werte g_+/g_- und $L_{\text{eff}}/2$ für jeden der 2640 Drähte bestimmt.

2.5.3 Digitalisierung und Qt-Analyse

Nach der Digitalisierung wird in der Qt-Analyse aus den digitalisierten Pulsen die für die Spurrekonstruktion und die Teilchenidentifikation relevanten Größen berechnet. Die Digitalisierung und die QT-Analyse sollen im Folgenden in ihrem Ablauf skizziert werden.

- **Digitalisierung** Die Digitalisierung der analogen Signale erfolgt über FADC's mit einer auf die HERA-*bunch-crossing*-Frequenz abgestimmten Taktfrequenz von 10.4 MHz. Die FADC's haben eine nichtlineare Kennlinie (Abbildung 2.10), welche den Vorteil mit sich bringt, daß der relative Digitalisierungsfehler oberhalb 10% der maximalen Eingangsspannung auf 1.5% abfällt und dann konstant bleibt.

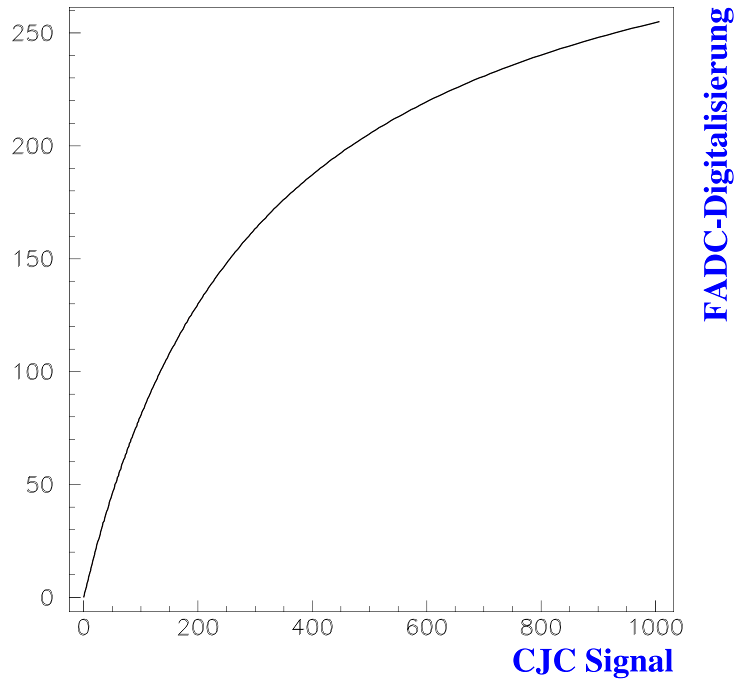


Abbildung 2.10: In dieser Abbildung ist die nichtlineare Kennlinie der FADC's dargestellt. Die Amplitudensignale der CJC (A_-, A_+) werden auf den Digitalisierungsbereich der FADC's abgebildet. *Quelle:* [14].

- **Linearisierung** Aufgrund der nichtlinearen Kennlinie der FADC's müssen die Digitalisierungen mit Hilfe einer Konversionstabelle linearisiert werden, damit die Proportionalität zu der auf dem Draht deponierten Ladung wieder hergestellt ist.

- **Trefferbestimmung** Eine Messung auf einem Draht wird als Signalpuls identifiziert, wenn gewisse Werte, die bestimmten Eigenschaften (Höhe, Form und Trefferseparation) zugeordnet sind, ihre Schwellenwerte überschreiten.

- ***Pedestal*bestimmung**[14] Der Pedestalwert ist die Grundhöhe, von der aus die Pulshöhe gemessen wird. Aus den sechs Unterteilungen (*Bins*) (*presamples*) vor dem digitalisierten Signal (Abbildung 2.11) wird der Median gebildet. Dieser Median ist der Pedestalwert für den gesamten Signalpuls und muß von den Einträgen der Signalbins abgezogen werden.

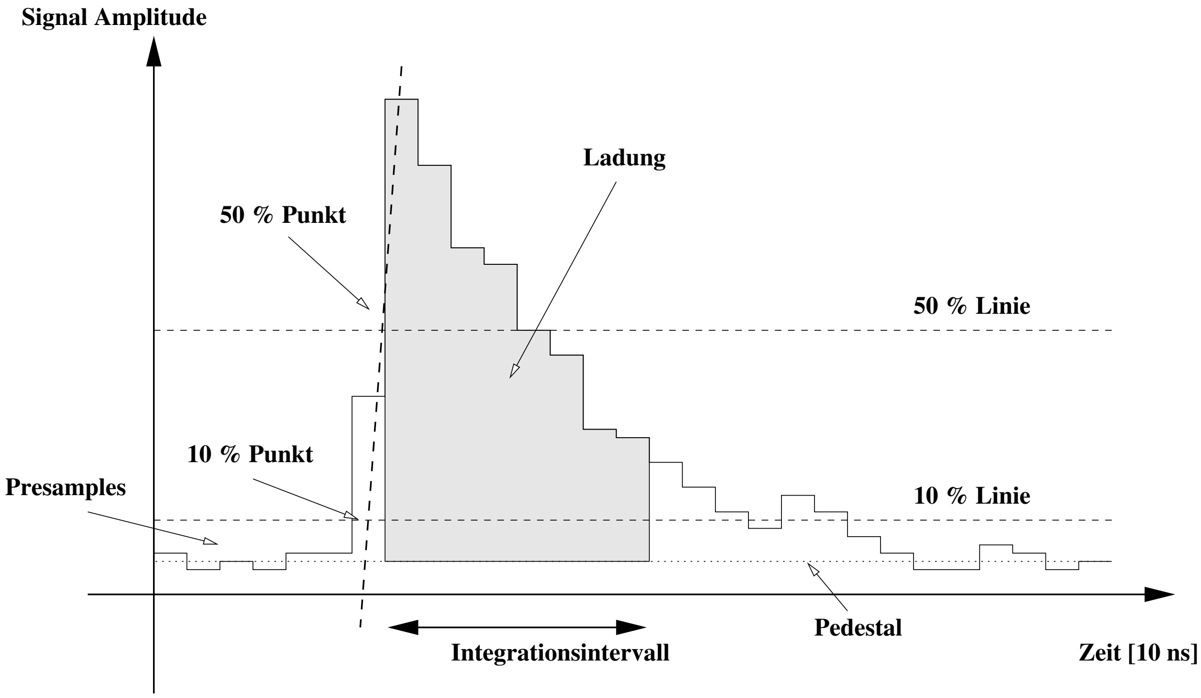


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung eines typischen Signalpulses aus der Qt-Analyse [8]. Die Steigung $\overline{S_{\text{max}}}$ ist durch eine gestrichelte Linie dargestellt. $\overline{S_{\text{max}}}$ entsteht durch eine Mittelung der beiden maximalen Steigungen der Signale an beiden Drahtenden. Hier ist jedoch nur eines der beiden Signale schematisch dargestellt, so daß der Zeitpunkt $t_{50\%}$ nicht ganz auf dieser Linie liegt.

- **Pulszuordnung** Werden insgesamt z.B. vier Signalpulse auf einem Draht in einem kurzen Zeitabstand gemessen, so liegen zwei Treffer vor. Dann werden jeweils zwei Signale an beiden Enden des Drahtes gemessen. Jedes Signal am $-Z$-Ende muß dem richtigen Signal am $+Z$-Ende zugeordnet werden. Zwei Signalpulse auf einem Draht werden dann einander zugeordnet, wenn ihre Anstiegsflanken sich nicht um mehr als zwei Zeiteinheiten (*clockbins*) unterscheiden. Es findet auch dann eine Zuordnung statt, wenn die Bereiche der Pulse zwischen Anstiegsflanke und Pulsmaximum überlappen.

- **Driftzeitbestimmung** Die Driftzeit der Elektronen zum Signaldraht wird trefferweise bestimmt. Zunächst werden für jeden der zwei Signalpulse des Treffers die

[14] Pedestal=*Sockel*, *Grundlage*

Zeitpunkte an den beiden Drahtseiten $t^+_{50\%}$ und $t^-_{50\%}$ ermittelt. Wie in Abbildung 2.11 durch die 50%-Linie angedeutet, sind dies die Zeitpunkte, an denen die Amplituden ihren halben Maximalwert erreicht haben. Die zwei Zeitpunkte werden zu einem Zeitpunkt $t_{50\%}$ gemittelt:

$$t_{50\%} = \frac{1}{2}(t^+_{50\%} + t^-_{50\%})$$

Zudem werden im Bereich des Signalanstieges die maximalen Steigungen $S^{\pm}_{\max}$ zwischen zwei Bins ermittelt und ebenfalls zu einer Steigung $\overline{S_{\max}}$ gemittelt:

$$\overline{S_{\max}} = \frac{1}{2}(S^+_{\max} + S^-_{\max})$$

Mit $t_{50\%}$ und $\overline{S_{\max}}$ läßt sich nun die Zeit $t_{10\%}$ bestimmen, die der Ankunftszeit der Elektronen gleichgesetzt wird. Weiterhin wird ein Wert t_0 ermittelt, der dem Zeitpunkt entspricht, an dem die Driftzeit (nahezu) null ist. Der Wert von t_0 wird ereignisweise bestimmt und wird dem Zeitpunkt der Primärionisation gleichgesetzt. Die Driftzeit t_D ist die Differenz zwischen $t_{10\%}$ und der Zeit t_0:

$$t_D = t_{10\%} - t_0$$

Unter der Annahme einer konstanten Driftgeschwindigkeit v kann mit t_D ein Abstand s, unter dem das ionisierende Teilchen den Draht passiert hat, berechnet werden. In der Realität ist die Driftgeschwindigkeit in Drahtnähe nicht konstant. Dieser Effekt wird durch Korrekturen berücksichtigt.

- **Pulsintegration** Zur Bestimmung der Pulsintegrale A_+, A_- wird das Signal zwischen $t_{10\%}$ und $t_{10\%}$ + 8 Bins integriert. Die Wahl der Integrationslänge (8 Bins $\approx$ 80ns) ist für die Genauigkeit der Ladungsmessung relevant: eine zu kurze Integrationslänge führt zur Integration eines zu kleinen Teils des Signales. Eine zu lange Integrationslänge erhöht den Einfluß der starken Schwankungen im abfallenden Teil des Signals.

- **Pulssubtraktion** Falls zwei aufeinanderfolgende Signalpulse zeitlich so dicht beieinander liegen, daß ein Überlappen der Signale zustande kommt, wird durch eine Pulssubtraktion der Effekt korrigiert: an den ersten Puls wird eine Standardpulsform angepaßt und von diesem subtrahiert. Der zweite Puls kann dann ohne den Überlapp des ersten bearbeitet werden. Das Verfahren der Pulssubtraktion verbessert die Doppelspurauflösung.

Die Größen A_+, A_- und t_D werden in die Bank CRJE (siehe Anhang D) geschrieben.

2.5.4 Spurparametrisierung

Da die magnetischen Feldlinien in der CJC parallel zur Z-Achse verlaufen, fliegen geladene Teilchen, die eine Ablenkung aufgrund der Lorentzkraft erfahren, auf Helix-förmigen Bahnkurven in Z-Richtung [13].

Die Projektion einer solchen Helix auf die xy-Ebene ergibt einen Kreis, der durch drei Parameter charakterisiert werden kann:

$$\frac{1}{2}\kappa(r^2 + dca^2) - (1 + \kappa \cdot dca)r \cdot \sin(\phi_S - \phi) + dca = 0$$

Hierbei bedeuten:

κ	=	$1/r$, Spurkrümmung
dca	=	kleinster Abstand vom Ursprung
ϕ_S	=	Azimutalwinkel der Spur am dca

Im Magnetfeld werden die geladenen Teilchen gemäß der Lorentzkraft abgelenkt. Die Stärke der Ablenkung kann durch die Spurkrümmung κ ausgedrückt werden. κ erlaubt eine Berechnung des Impulses p, bzw. des Transversalimpulses $p_t = p \cdot \sin\theta$ des spurerzeugenden Teilchens: $p_t = 0.3 \cdot B/\kappa$ [GeV] (mit B in [T] und κ in [1/m]).
Eine Projektion in die sZ-Ebene (s ist die *Spurlänge*, siehe Abbildung 3.1, Abschnitt 3.1) ergibt eine Gerade, die mit zwei Größen parametrisiert werden kann:

z_0	=	Z-Koordinate am dca (nicht zu verwechseln mit Z_0 aus Bild 2.9)
θ	=	Polarwinkel zwischen Spur und Z-Achse

Die Spurparameter κ und dca sind vorzeichenbehaftet. Die Konvention über ihr Vorzeichen läßt sich Abbildung 2.12 auf der nächsten Seite entnehmen.

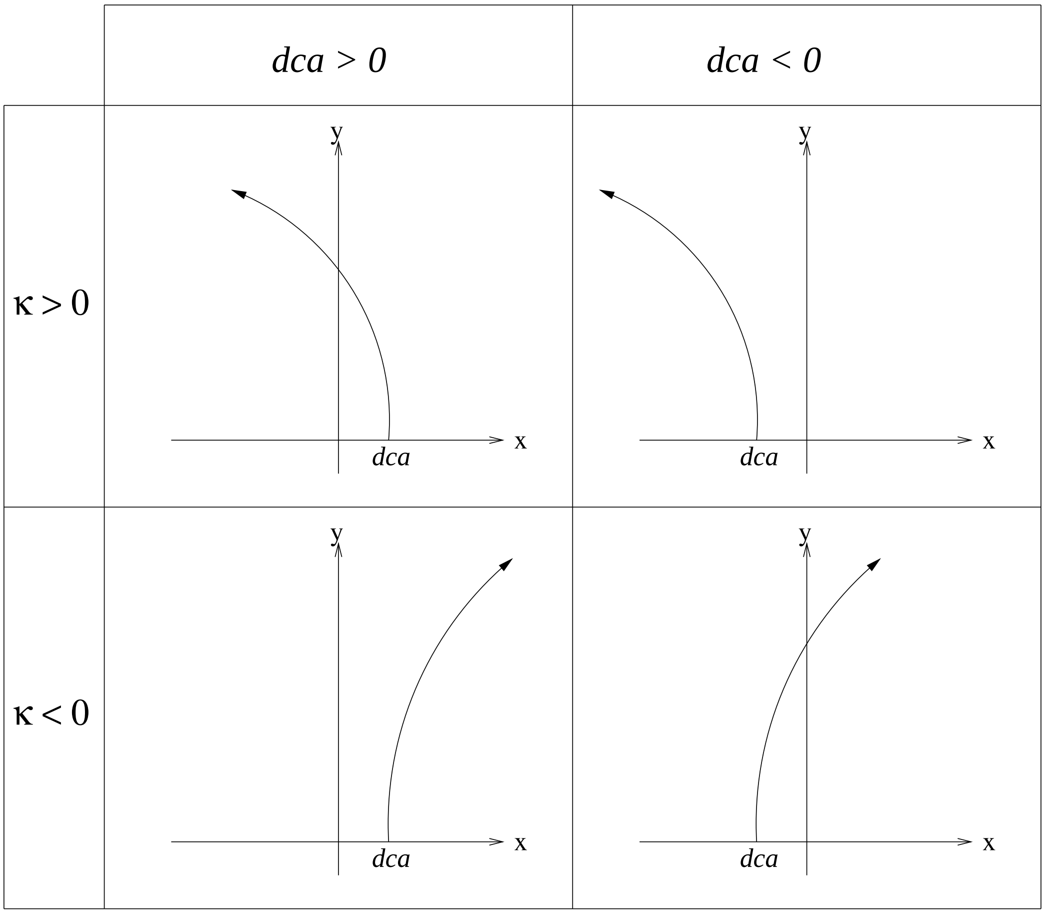


Abbildung 2.12: Vorzeichenkonvention für $\kappa = 1/r$ und dca

2.6 Der Silizium Vertex Detektor CST

Seit 1997 werden mit dem zentralen Vertex Detektor CST[15] Daten genommen. Mit dem CST steht ein Instrument zur Verfügung, mit dem die Spurparameter verbessert werden können, um eine Separation des Primär- und etwaiger Sekundär*vertices* [16] zu ermöglichen. Der Silizium-Vertex-Detektor CST liefert eine Messung sowohl in $r\phi$ als auch in Z. Aufgrund der hohen Genauigkeit dieses Detektors, auch in Z, ist es möglich, die Parameter der zentralen Spurenkammer durch Anpassung an den Vertex-Detektor zu verbessern. Die zu diesem Zweck entwickelten Methoden werden in den Kapiteln 3.1 und 3.3 vorgestellt.

Detektorgeometrie In Abbildung 2.14 ist der zentrale Vertex-Detektor in der $r\phi$-Ebene schematisch dargestellt. Eine seitliche Ansicht ist in Abbildung 2.13 zu sehen. Der CST besteht aus zwei Lagen Silizium-Streifen-Detektoren, die zylindrisch um das

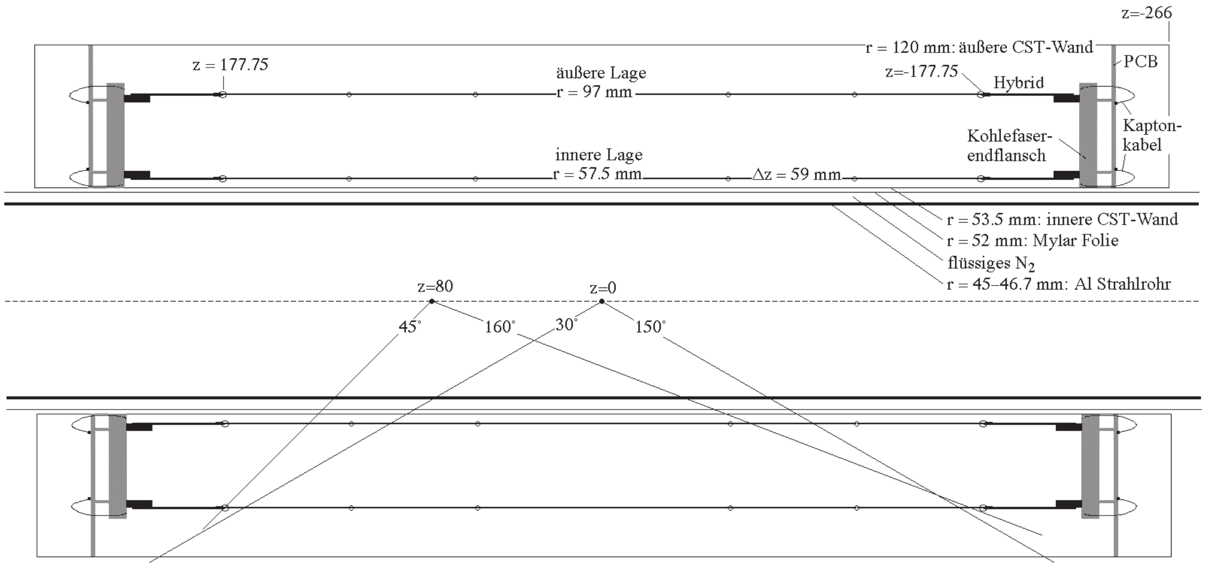


Abbildung 2.13: Seitenansicht des zentralen Silizium-Vertex-Detektors CST

Strahlrohr angeordnet sind. Die Radien der beiden Lagen betragen $R_1 = 57.5$ mm und 97 mm. Die Ausdehnung in Z beträgt 358 mm. Der Detektor besteht aus 81920 Streifendetektoren auf 192 beidseitigen Si-Sensoren. Die Sensoren sind jeweils zu sechst in $2 \cdot 32$ *Halbleitern*[17] angeordnet (Abbildung 2.13). Eine Halbleiter hat eine Länge von 17.7 mm und besteht aus 3 Si-Sensoren. Aufgrund seiner zylindrischen Form ist der CST im ganzen Azimutalwinkel-Bereich ($0 < \phi < 2\pi$) sensitiv. Im Polarwinkel liegt der Sensitivitätsbereich bei $30° < \theta < 150°$. In Tabelle 2.5 sind einige Eigenschaften des zentralen Vertex Detektors zusammenfassend dargestellt.

Detektorprinzip Ein Si-Sensor besteht aus einem Si-Halbleiter[18], mit einer p-dotierten und einer n-dotierten Seite. Die Beidseitigkeit der Sensoren macht eine Messung sowohl

[15] *C*entral *S*ilicon *D*etector

[16] Der Vertex ist der Punkt, an dem die betrachtete Wechselwirkung stattgefunden hat.

[17] *Die* Halbleiter = halbe Leiter: Bezeichnung in Anlehnung an die Leiterform.

[18] *Der* Halbleiter: Festkörpertyp [11]

Halbleitern	64
Sensoren pro Halbleiter	3
Sensoren gesamt	192
Länge in Z [mm]	358
Innerer Radius [mm]	57.5
Äußerer Radius [mm]	97
Mittlere Auflösung in $r\phi$ [μm]	14
Mittlere Auflösung in Z [μm]	25

Tabelle 2.5: Geometrische Eigenschaften des CST

in $r\phi$ (p-Seite) als auch in Z (n-Seite) möglich. Zwischen p-Seite und n-Seite liegt eine Spannung an. Fliegt ein geladenes Teilchen durch den Sensor, so entstehen Elektron-Loch-Paare. Die negativen und positiven Ladungsträger driften im elektrischen Feld zur n- (Elektronen) und p-Seite (Löcher) des Sensors, wo sie ausgelesen werden können. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 2.15 dargestellt.

$r\phi$- und Z-Messung Auf der p-Seite werden die Signale zur Messung der Koordinate ϕ ausgelesen. Die n-Seite liefert die Z-Messung. Da aus technischen Gründen die Auslese auf der n-Seite in Z-Richtung erfolgt und die Si-Streifen senkrecht zu dieser Richtung orientiert sind, müssen die Signale je einer Halbleiter zu den Enden $+Z$ und $-Z$ geführt werden. In Abbildung 2.16 auf Seite 35 ist eine Halbleiter von beiden Seiten dargestellt, mit den Ausleserichtungen senkrecht und parallel zur Halbleiterrichtung. Näheres zum zentralen Vertex Detektor findet sich z.B. bei [9]

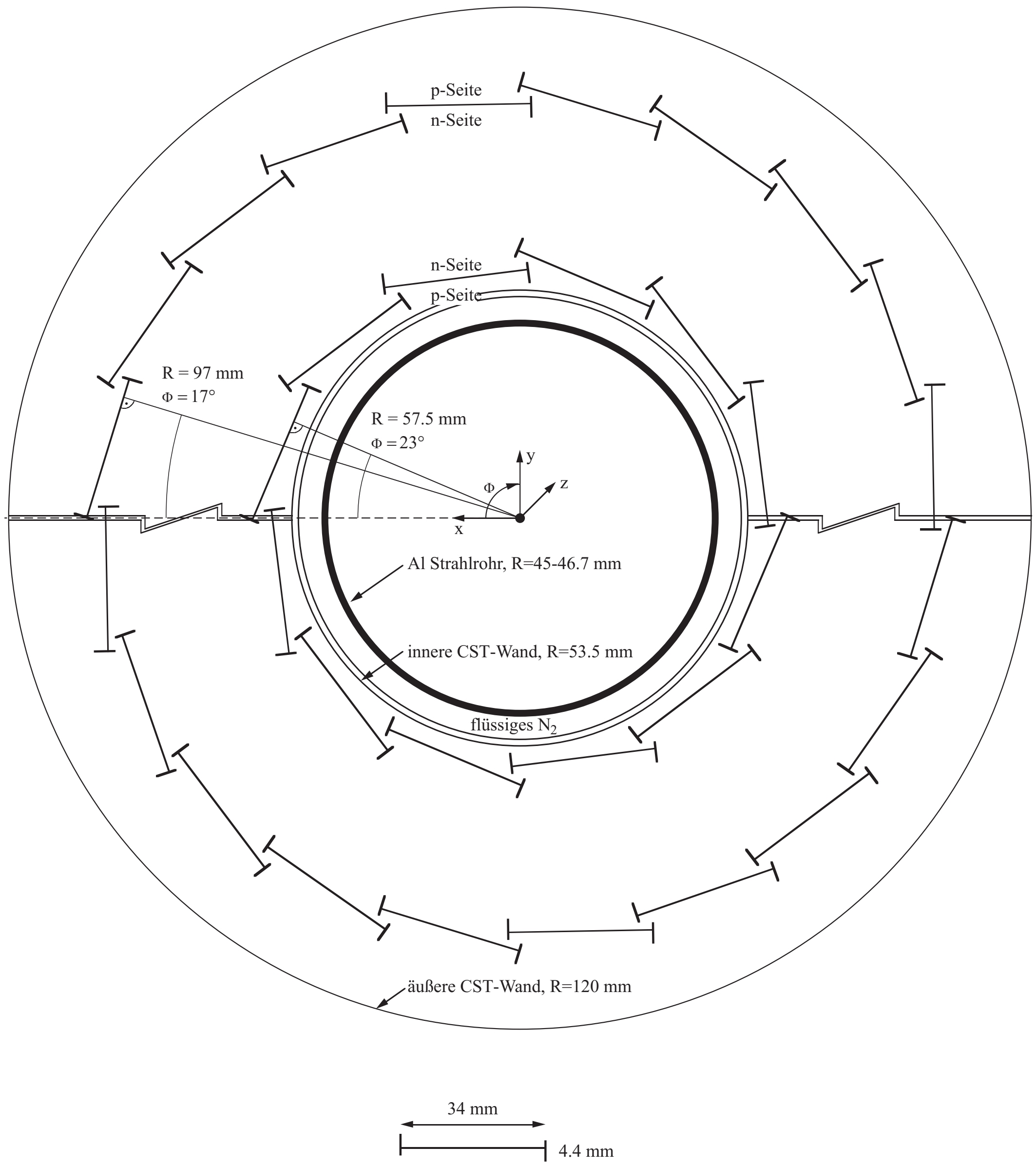


Abbildung 2.14: CST, Blickrichtung auf die $r\phi$-Ebene

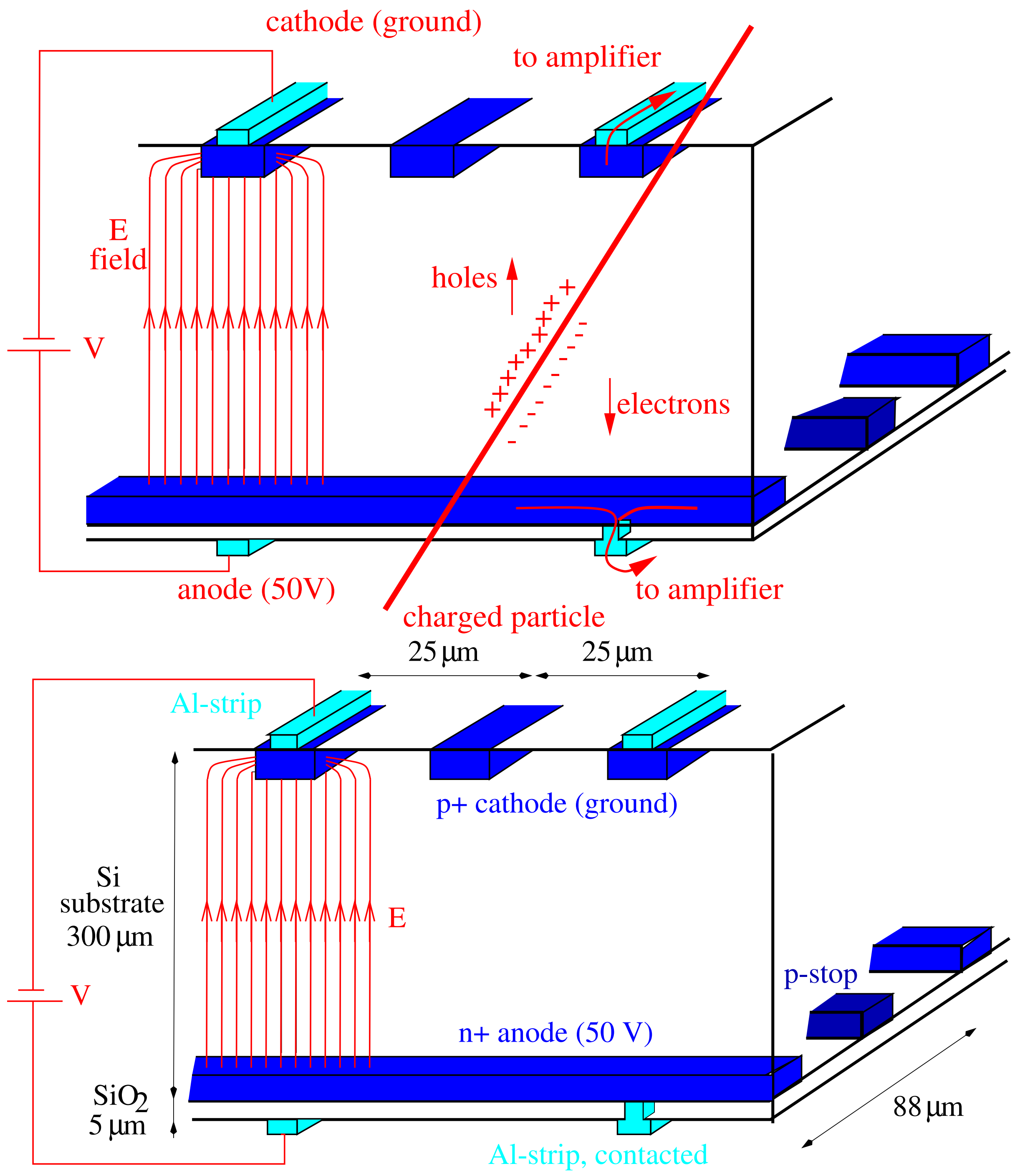


Abbildung 2.15: Prinzip eines Si-Detektors. Oben: ein geladenes Teilchen erzeugt beim Durchqueren des Si e^{-}-Loch-Paare, die im Feld zur n- und p-Seite driften. Unten: n- und p- Dotierungen. [12]

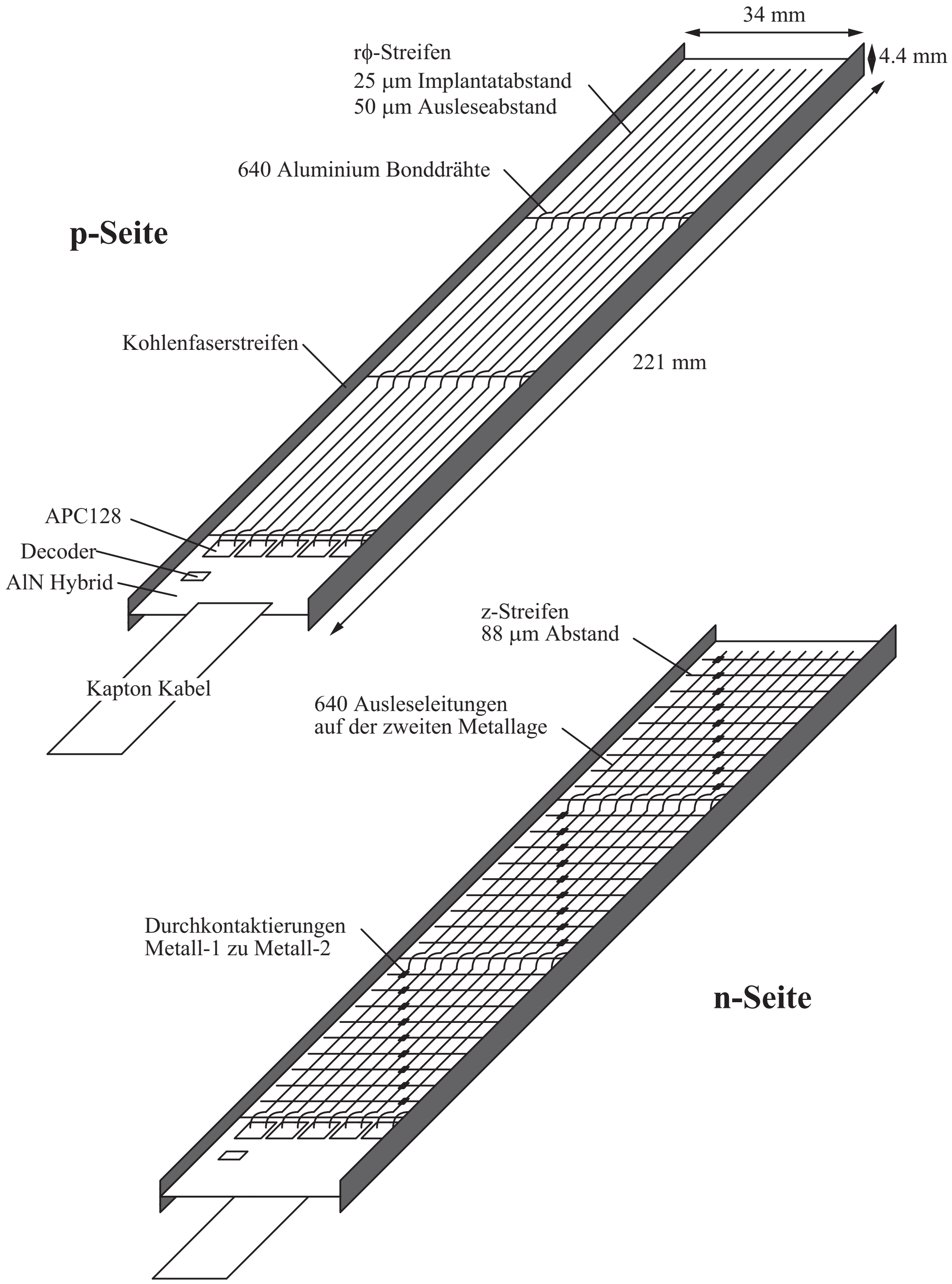


Abbildung 2.16: p- (oben) und n-Seite (unten) einer Halbleiter des CST Detektors. [10]

3

Die Methode der CJC-Z-Kalibration

3.1 Zielsetzung

Motivation Bisher wurden bei der Z-Kalibration der zentralen Spurenkammer die Daten der Z-Kammern CIZ und COZ benutzt. Die höhere Genauigkeit der CIZ und COZ in der Z-Koordinate ermöglicht eine Optimierung der Parameter der CJC [4]. Durch den Einbau des Silizium Vertex Detektors CST steht seit 1997 ein Instrument zur Verfügung, dessen Daten eine wesentlich höhere Genauigkeit als die entsprechende Information aus den Z-Kammern aufweisen (siehe Kapitel 2.5 und 2.6 auf Seite 31). Diese höhere Genauigkeit soll ausgenutzt werden, um die drahtabhängigen Kalibrationskonstanten g_+/g_- und $L_{\text{eff}}/2$ der CJC zu verbessern, und so die Auflösung dieses Detektors zu erhöhen. Somit besteht die Aufgabe darin, einen Algorithmus zu entwickeln, der die genauere Z-Information des CST zur Optimierung der Drahtparameter der CJC nutzt.

Die bisher standardmäßig eingesetzte Kalibration erfordert eine Iteration über die Daten der CJC, welche sehr zeitaufwendig ist, da die Daten bei jedem Iterationsschritt neu gelesen werden müssen. In Kapitel 3.3 soll eine Methode zur Z-Kalibration der zentralen Spurenkammer vorgestellt werden, die es ermöglicht, ohne Iteration über die Daten eine optimale Bestimmung der Kalibrationsparameter $L_{\text{eff}}/2$ und g_+/g_- durchzuführen.

Zur Überprüfung der Konvergenzeigenschaften (Abschnitt 3.4) der Algorithmen wurde eine Simulation (Abschnitt 3.2) durchgeführt, die die zu erwartenden Daten in den beiden Detektoren CJC und CST beschreiben soll. Diese Methode Testdaten zu generieren, basiert auf der Erzeugung von Zufallszahlen (Monte-Carlo-Methode) und wird im Kapitel 3.2 beschrieben.

Methode

- **Zuordnung von CST-Treffern zu CJC-Spuren** [1] Den rekonstruierten Spuren aus der CJC können Treffer aus dem zentralen Vertex Detektor zugeordnet werden. Dies geschieht dann, wenn CJC-Treffer einer Spur und Treffer aus dem CST eine einzige, durch beide Detektoren verlaufende Spur zu bilden scheinen. Die Treffer können dann so behandelt werden, als gehörten sie zu der selben Spur (also auch

[1] *Linking*

zu dem selben Teilchen), mit dem Unterschied, daß die von der CST stammenden Treffer eine wesentlich höhere Genauigkeit besitzen.

- **Die Z-s-Ebene** Wird eine Spur in der Z-s-Ebene dargestellt, so ergibt sich eine Gerade, wie in Abbildung 3.1 dargestellt. Hierbei ist s die Spurlänge, gemessen vom *dca*-Punkt bis zum Treffer (Bild 3.2). Der Fehler der CST-Treffer kann als klein gegen den CJC-Fehler angenommen werden und wird vernachlässigt. Durch die zwei CST-Treffer ist eine Gerade gezogen. Die Einträge aus der CJC in diesem Bild folgen dem Verlauf dieser Geraden, da es sich um die selbe Spur handelt.

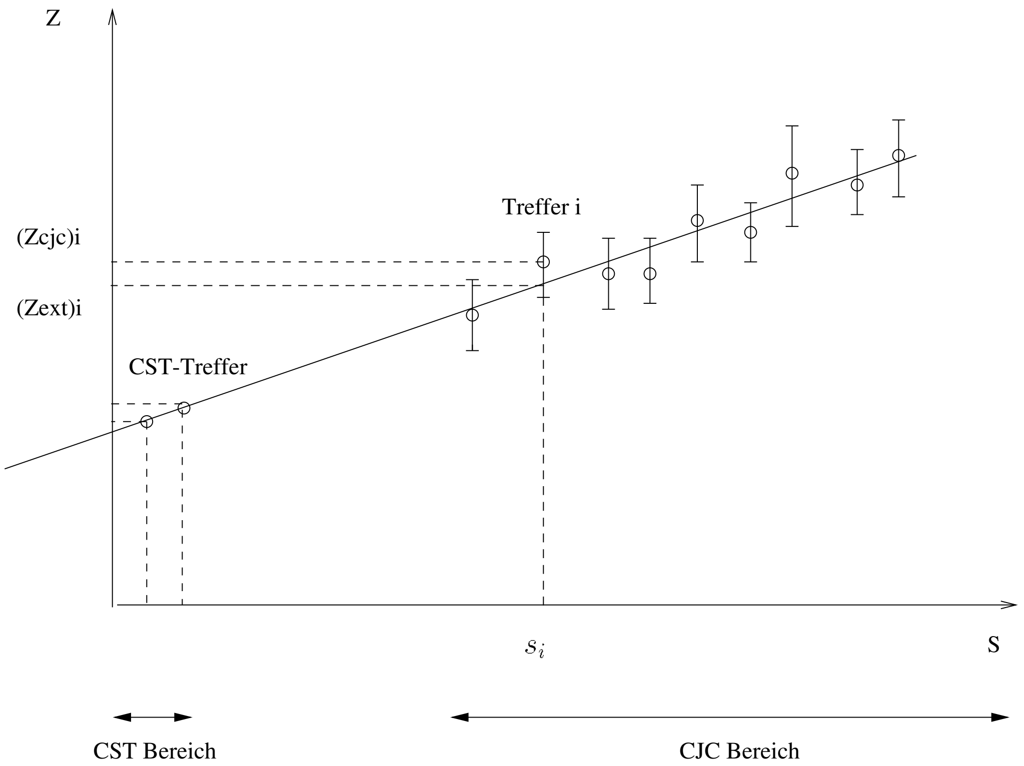


Abbildung 3.1: Darstellung der Methode zur Extrapolation der von dem CST vorhergesagten Z-Koordinate Z_{ext} eines CJC-Treffers in der Z-s-Ebene

- **Die Anpassungsgrößen** Um mit den CJC- und CST-Daten die Kalibrationskonstanten (siehe Kap. 2.5.2) zu optimieren, müssen zwei vergleichbare Größen aus beiden Detektoren gefunden werden. Diese Größen sind die indirekten Messgrößen Z_{cjc} und Z_{ext}. Die Größe Z_{cjc} ist die Z-Koordinate aus der zentralen Spurenkammer, wie sie mit Gleichung 2.3 bestimmt wird. Z_{ext} ist die aus der CST extrapolierte Z-Koordinate. Ihre Berechnung wird unter dem nächsten Punkt erläutert.

- **Ermittlung von Z_{cjc} und Z_{ext}** Betrachtet man in der Abbildung 3.1 einen bestimmten Treffer i aus einer Spur in der CJC (CJC-Bereich in der Abbildung),

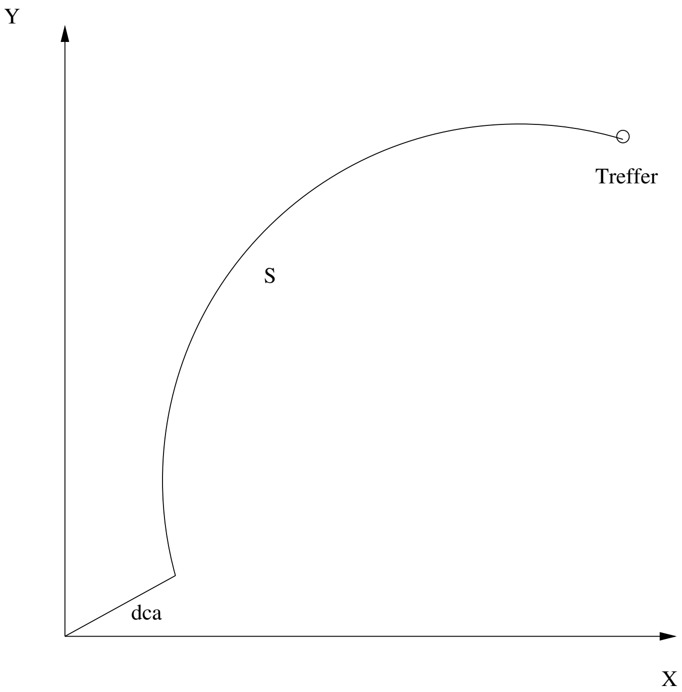


Abbildung 3.2: Darstellung einer Spur in der X-Y-Ebene. *dca* = *d*istance of *c*losest *a*pproach

so läßt sich aus den zugehörigen Pulsintegralen $(A_-)_i$ und $(A_+)_i$ und Gl. 2.3 die Koordinate $(Z_{\mathrm{cjc}})_i$ bestimmen. Aus der $r\phi$-Messung erhält man, wie in Bild 3.2 dargestellt, die Spurlänge s_i. Der Funktionswert der Geraden in Bild 3.1 bei s_i ist $(Z_{\mathrm{ext}})_i$. Dies ist der aus der *CST extrapolierte* Z-Wert des Treffers. Die der Spur zugeordneten CST-Treffer seien z_{cst1}, z_{cst2} (CST-Bereich in Bild 3.1). Ihre jeweiligen Spurlängen sind s_{cst1}, und s_{cst2}; dann ist die Steigung τ der Geraden in Abbildung 3.1 durch

$$\tau = \frac{z_{\mathrm{cst2}} - z_{\mathrm{cst1}}}{s_{\mathrm{cst2}} - s_{\mathrm{cst1}}}$$

gegeben. Der CST-extrapolierte Z-Wert $(Z_{\mathrm{ext}})_i$ des Treffers ist dann:

$$(Z_{\mathrm{ext}})_i = z_{\mathrm{cst1}} + (s_i - S_{\mathrm{cst1}}) * \tau$$

Aufgrund der höheren Genauigkeit des zentralen Vertex Detektors kann man im Falle einer richtigen CST-Treffer-Zuordnung der Spur annehmen, daß der Wert $(Z_{\mathrm{ext}})_i$ sehr nahe an dem *wahren* Z-Wert ist. Der Einfachheit halber soll der Index i im Folgenden weggelassen werden.

- **Anpassungsalgorithmus** Die Algorithmen (Kap. 3.3) zur Optimierung der CJC-Parameter stützen sich auf die Methode der kleinsten Quadrate[2]. Den Messwerten Z_{cjc} werden die als Modell-Daten gesetzten Werte Z_{ext} zugeordnet.

[2]Eine ausführliche Beschreibung dieser Methode findet sich z.B. bei [5]

3.2 Simulation der Daten

Die Struktur der *Monte-Carlo-Simulation* Bei der Simulation der Daten wird die Monte Carlo Methode angewandt; hierbei werden die Daten mit Hilfe von Zufallszahlen erzeugt. Bei der späteren Untersuchung der echten Daten stehen die drei Messgrößen Z_{ext}, A_- und A_+ zur Verfügung. Das Programm muß also diese drei Werte produzieren.

- Der Algorithmus erzeugt mit einem Zufallszahlengenerator eine Reihe von Zufallszahlen in einem Wertebereich von -110 bis +110. Diese Zahlen stellen die Werte von Z_{ext} dar.

- Diese Werte werden dann Gauß-verschmiert, mit der Varianz σ_Z^2, und in eine Variable $Z_{\text{Gauß}}$ geschrieben. σ_Z entspricht einer Abschätzung der Z-Auflösung der CJC.

- $Z_{\text{Gauß}}$ wird in Gleichung 2.1 auf Seite 25 eingesetzt:

$$\frac{Q_+}{Q_-} = \frac{\frac{L_{\text{eff}}}{2} + (Z_{\text{Gauß}} - Z_0)}{\frac{L_{\text{eff}}}{2} - (Z_{\text{Gauß}} - Z_0)} \tag{3.1}$$

Es wird eine Reihe von Zufallszahlen generiert, deren Verteilung der Verteilung der Summe $Q_+ + Q_-$ entsprechen soll. In Abbildung 3.3 (vgl. Abb. 4.1) ist diese Zufallszahlenverteilung dargestellt. Dieser Reihe wird für jeden zu simulierenden Treffer ein Wert $W_{\Sigma Q}$ für die zugehörige Summe $Q_+ + Q_-$ entnommen. Aus diesem

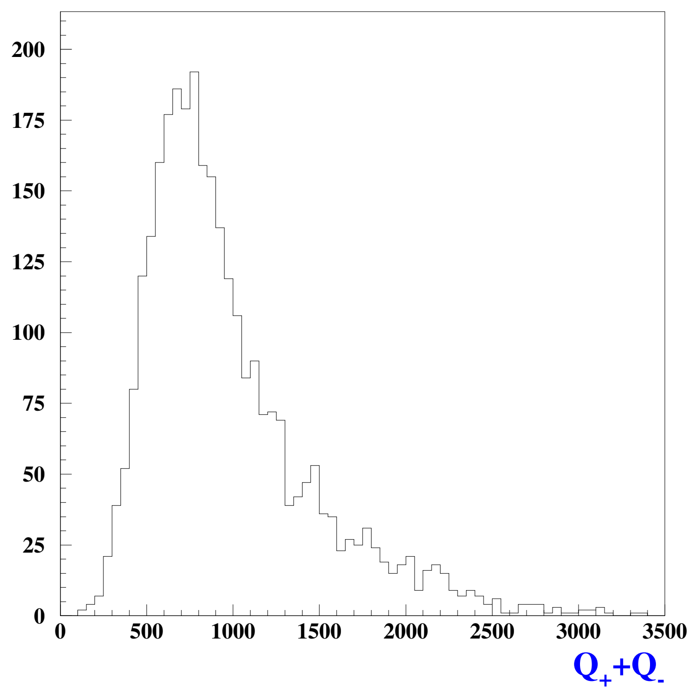


Abbildung 3.3: Simulierte Häufigkeitsverteilung - $W_{\Sigma Q} = Q_+ + Q_-$.

$W_{\Sigma Q}$ und Q_+/Q_- aus Gleichung 3.1 auf der vorherigen Seite können nun mit

$$Q_- = \frac{W_{\Sigma Q}}{1 + Q_+/Q_-} \qquad\qquad Q_+ = Q_- \frac{Q_+}{Q_-}$$

und

$$A_- = g_- Q_- \qquad\qquad A_+ = g_+ Q_+ \tag{3.2}$$

die Pulsintegrale A_- und A_+ berechnet werden. Aus ihnen läßt sich dann mit Gleichung 2.3 auf Seite 25 Z_{cjc} berechnen.

Untersuchung der simulierten Daten In diesem Modell wird davon ausgegangen, daß Z_{cjc} und Z_{ext} nur um einen statistischen Fehler voneinander abweichen. Trägt man beide Werte gegeneinander auf, so erhält man ein gerades Band mit Nulldurchgang und einer 45°-Steigung. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Die Simulation

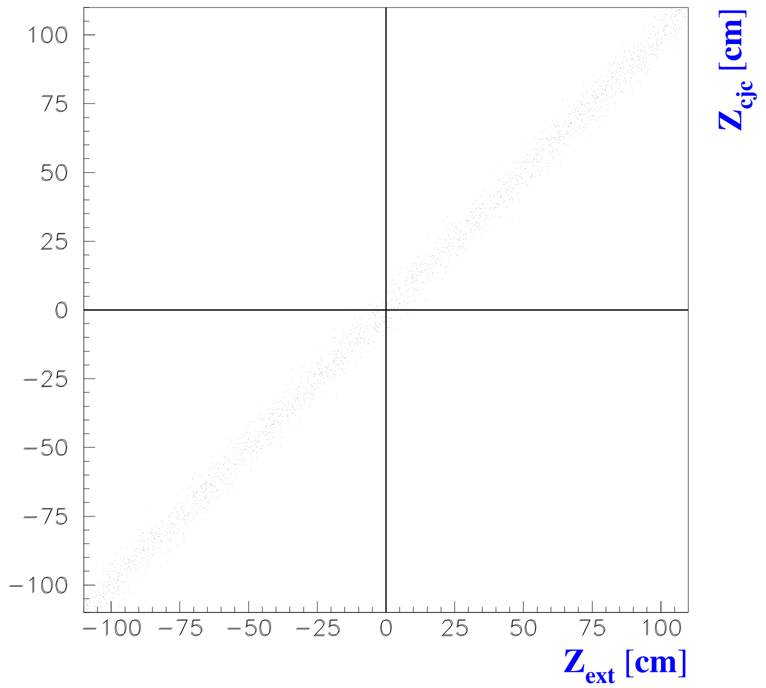


Abbildung 3.4: Z_{cjc} gegen Z_{ext} mit aus der Simulation generierten Daten. Die beiden Größen weichen nur um den statistischen Fehler voneinander ab.

erzeugt nur Daten für einen einzelnen Draht. Die Gleichungen 3.1 und 3.2 enthalten jeweils eine der Kalibrationskonstanten $L_{\mathrm{eff}}/2$ und g_+/g_- . An diesen beiden Stellen wird die gesamte Information über den simulierten Draht durch diese beiden Konstanten eingefügt. Es sind hier die *echten* Konstanten $L_{\mathrm{eff}}/2$ und g_+/g_- . Anhand der simulierten Daten, die so implizit die *echten* Konstanten enthalten, muß ein Kalibrationsalgorithmus

in der Lage sein, $L_{\text{eff}}/2$ und g_+/g_- zu bestimmen.
Der CST-extrapolierte, wahre Wert Z_{ext} wird direkt erzeugt. Z_{cjc} muß mit Gleichung 2.3:

$$Z_{\text{cjc}} = Z_0 + \frac{L_{\text{eff}}}{2} \frac{1 - \frac{A_-}{A_+}\frac{g_+}{g_-}}{1 + \frac{A_-}{A_+}\frac{g_+}{g_-}}$$

berechnet werden. Wählt man hierbei die richtigen Konstanten g_+/g_- und $L_{\text{eff}}/2$, so weicht Z_{cjc} nur um den statistischen Fehler von Z_{ext} ab. Wenn aber abweichende Kalibrationskonstanten gewählt werden, dann entsteht ein zusätzlicher Fehler. Die Auswirkung abweichender Kalibrationskonstanten ist in Abbildung 3.5 dargestellt. $\Delta Z = Z_{\text{ext}} - Z_{\text{cjc}}$ ist das Residuum. Die Residuenverteilung ist Gaußförmig, falls der Fehler σ_Z von Z_{cjc} nur statistischer Natur ist. Der Effekt wurde getrennt für ein abweichendes g_+/g_- und ein abweichendes $L_{\text{eff}}/2$ gezeichnet. Ein falscher relativer Verstärkungsfaktor bewirkt eine Verschiebung und eine Asymmetrie. Eine falsche effektive Länge verschmiert ΔZ. Beide Effekte lassen sich leicht aus Gleichung 2.3 verstehen.
Vor der Kalibration sind die Drahtparameter $L_{\text{eff}}/2$ und g_+/g_- naturgemäß unbekannt. Eine Kalibration muß die Parameter so korrigieren, daß der zusätzliche Fehler verschwindet, und nur noch der statistische Fehler übrigbleibt.

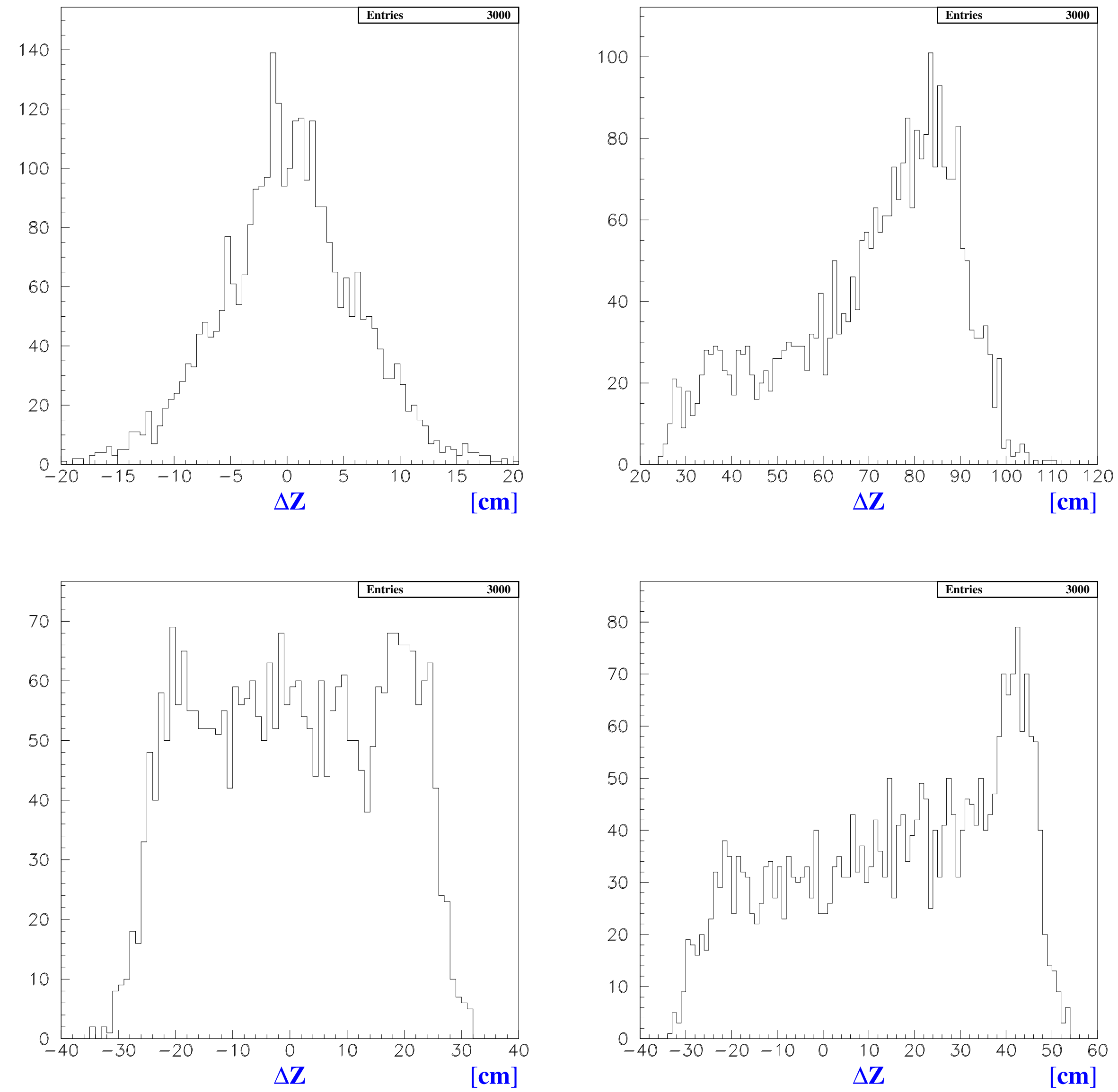


Abbildung 3.5: In dieser Abbildung ist die Residuenverteilung $\Delta Z = Z_{\text{ext}} - Z_{\text{cjc}}$ unter verschiedenen Vorraussetzungen dargestellt:
Bild *Oben links*: Das Residuum ΔZ wurde mit den richtigen Parametern berechnet;
Bild *oben rechts*: Der Parameter g_+/g_- wurde bei der Berechnung mit einer Abweichung von 10% gewählt;
Bild *unten links*: Hier wurde $L_{\text{eff}}/2$ abweichend (10%) gewählt;
Bild *unten rechts*: Bei der Berechnung wurden für beide Parameter abweichende Werte eingesetzt.

3.3 Der Kalibrationsalgorithmus

Der Ausgangspunkt einer Kalibration nach der Methode der kleinsten Quadrate ist eine *Anpassungsbedingung*, die einen Vergleich der gemessenen Daten mit einem Modell ermöglicht. Das Modell stellt sich hier in Form einer Funktion $F(Z_{\text{ext}}, L_{\text{eff}}/2, g_+/g_-)$ dar, die in Abschnitt 3.3.1 hergeleitet werden soll. Mit einer Linearisierung $L(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)$ der Funktion $F(Z_{\text{ext}}, L_{\text{eff}}/2, g_+/g_-)$ ist es dann bereits möglich, eine Anpassung durchzuführen. Diese Vorgehensweise wurde hier jedoch nicht gewählt, da, wie im Folgenden beschrieben wird, eine solche Methode eine Iteration über die Daten erforderlich macht. In Abschnitt 3.3.2 auf Seite 45 wird eine Methode vorgestellt, die eine solche Iteration nicht benötigt.

3.3.1 Datenmodell und Linearisierung

Der Ausgangspunkt einer Anpassung mit der Methode der kleinsten Quadrate ist ein Modell der Daten in Form einer von den zu bestimenden Parametern abängigen Funktion. In diesem Abschnitt soll diese Funktion für die Anpassung zur Z-Kalibration der zentralen Spurenkammer hergeleitet werden. Diese Funktion muß dann linearisiert werden, damit eine Anpassungsbedingung aufgestellt werden kann.

Datenmodell Aus den beiden Meßwerten A_- und A_+ wird die Größe Y berechnet:

$$Y = \frac{1 - \frac{A_-}{A_+}}{1 + \frac{A_-}{A_+}}. \tag{3.3}$$

In der Gleichung für Q_+/Q_- (2.1 auf Seite 25) wird für Z der aus der CST extrapolierte Z-Wert Z_{ext} eingesetzt. Z_0 ist kein unabhängiger Parameter und kann frei gewählt werden, da eine Kalibration der beiden anderen Parameter $L_{\text{eff}}/2$ und g_+/g_- die Wahl von Z_0 berücksichtigt. Daher wird für die folgenden Betrachtungen $Z_0 = 0$ gesetzt und es ergibt sich für Q_+/Q_-:

$$\frac{Q_+}{Q_-} = \frac{\frac{L_{\text{eff}}}{2} + Z_{\text{ext}}}{\frac{L_{\text{eff}}}{2} - Z_{\text{ext}}}$$

Aus dieser Gleichung und den Beziehungen $A_\pm = g_\pm \cdot Q_\pm$ folgt

$$\frac{A_-}{A_+} = \frac{L_{\text{eff}}/2 - Z_{\text{ext}}}{L_{\text{eff}}/2 + Z_{\text{ext}}} \cdot \frac{g_-}{g_+} = \frac{L_{\text{eff}}/2 - Z_{\text{ext}}}{L_{\text{eff}}/2 + Z_{\text{ext}}} \cdot \frac{1}{\frac{g_+}{g_-}} \tag{3.4}$$

Durch Einsetzen von 3.4 in 3.3 erhält man die Funktion $F(Z_{\text{ext}}, L_{\text{eff}}/2, g_+/g_-)$, die den funktionellen Zusammenhang zwischen Y und Z_{ext} , $L_{\text{eff}}/2$ und g_+/g_- darstellt ($Y = F(Z_{\text{ext}}, L_{\text{eff}}/2, g_+/g_-)$):

$$F(Z_{\text{ext}}, L_{\text{eff}}/2, g_+/g_-) = \frac{1 - \frac{L_{\text{eff}}/2 - Z_{\text{ext}}}{L_{\text{eff}}/2 + Z_{\text{ext}}} \cdot (\frac{g_+}{g_-})^{-1}}{1 + \frac{L_{\text{eff}}/2 - Z_{\text{ext}}}{L_{\text{eff}}/2 + Z_{\text{ext}}} \cdot (\frac{g_+}{g_-})^{-1}}$$

$$= \frac{L_{\text{eff}}/2 + Z_{\text{ext}} - L_{\text{eff}}/2(g_+/g_-)^{-1} + Z_{\text{ext}}(g_+/g_-)^{-1}}{L_{\text{eff}}/2 + Z_{\text{ext}} + L_{\text{eff}}/2(g_+/g_-)^{-1} - Z_{\text{ext}}(g_+/g_-)^{-1}}$$

$$= \frac{L_{\text{eff}}/2(1-(g_+/g_-)^{-1}) + Z_{\text{ext}}(1+(g_+/g_-)^{-1})}{L_{\text{eff}}/2(1+(g_+/g_-)^{-1}) + Z_{\text{ext}}(1-(g_+/g_-)^{-1})}$$

$\Rightarrow$

$$F(Z_{\text{ext}}, L_{\text{eff}}/2, g_+/g_-) = \frac{\frac{L_{\text{eff}}}{2}(\frac{g_+}{g_-}-1) + Z_{\text{ext}}(\frac{g_+}{g_-}+1)}{\frac{L_{\text{eff}}}{2}(\frac{g_+}{g_-}+1) + Z_{\text{ext}}(\frac{g_+}{g_-}-1)} \tag{3.5}$$

Linearisierung Bei der Anpassung der Kalibrationsparameter an die Daten sind naturgemäß zunächst $L_{\text{eff}}/2$ und g_+/g_- nicht bekannt. Daher werden *Startwerte* L_s und g_s eingeführt, welche von den zu bestimmenden, *wahren* Werten um δ bzw. ϵ abweichen. In Gleichung 3.5 werden die folgenden Substitutionen eingeführt:

$$\boxed{\frac{L_{\text{eff}}}{2} \longrightarrow L_s + \epsilon \qquad\qquad \frac{g_+}{g_-} \longrightarrow g_s + \delta} \tag{3.6}$$

Diese Substitutionen führen zu einer Transformation der Funktion $F(Z_{\text{ext}}, L_{\text{eff}}/2, g_+/g_-)$ zu neuen Parametern L_s, g_s, ϵ und δ:

$$F(Z_{\text{ext}}, L_{\text{eff}}/2, g_+/g_-) \longrightarrow F(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)$$

$$\begin{aligned} F(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta) &= \frac{(L_s+\epsilon)(g_s+\delta-1) + Z_{\text{ext}}(g_s+\delta+1)}{(L_s+\epsilon)(g_s+\delta+1) + Z_{\text{ext}}(g_s+\delta-1)} \\ &= \frac{L_s g_s + \delta L_s - L_s + \epsilon g_s + \epsilon\delta - \epsilon + Z_{\text{ext}} g_s + Z_{\text{ext}}\delta + Z_{\text{ext}}}{L_s g_s + \delta L_s + L_s + \epsilon g_s + \epsilon\delta + \epsilon + Z_{\text{ext}} g_s + Z_{\text{ext}}\delta - Z_{\text{ext}}} \end{aligned}$$

$\Rightarrow$

$$\boxed{F(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta) = \frac{L_s(g_s-1) + Z_{\text{ext}}(g_s+1) + \delta(Z_{\text{ext}}+L_s) + \epsilon(g_s-1) + \epsilon\delta}{L_s(g_s+1) + Z_{\text{ext}}(g_s-1) + \delta(Z_{\text{ext}}+L_s) + \epsilon(g_s+1) + \epsilon\delta}} \tag{3.7}$$

Auf der linken Seite dieser Gleichung steht die Größe $Y = F(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)$, die aus den Daten berechnet wird und auf der rechten Seite die Startwerte der Kalibrationsparameter, die Abweichungen derselben von den wahren Parametern und der aus der CST extrapolierte Z-Wert Z_{cst}. Bis zu diesem Punkt sind alle Rechnungen exakt. Um die Methode der kleinsten Quadrate in ihrer linearen Form anwenden zu können, muß Gleichung 3.7 linearisiert werden (siehe Anhang A). Das Ergebnis ist die Linearisierung $L(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)$ der Funktion $F(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)$:

$$L(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta) = B_0(Z_{\text{ext}}) + \delta B_1(Z_{\text{ext}}) + \epsilon B_2(Z_{\text{ext}}) \tag{3.8}$$

Hierbei bedeuten:

$$\begin{aligned} B_0(Z_{\text{ext}}) &= \frac{(g_s-1)L_s + (1+g_s)Z_{\text{ext}}}{(1+g_s)L_s + (g_s-1)Z_{\text{ext}}} \\ B_1(Z_{\text{ext}}) &= \frac{2(L_s^2 - Z_{\text{ext}}^2)}{((1+g_s)L_s + (g_s-1)Z_{\text{ext}})^2} \\ B_2(Z_{\text{ext}}) &= \frac{-4g_s Z_{\text{ext}}}{((1+g_s)L_s + (g_s-1)Z_{\text{ext}})^2} \end{aligned}$$

Die Größen B_0, B_1 und B_2 werden in Anhang A berechnet.

3.3.2 Polynom-Fit-Methode

In diesem Kapitel soll die Polynomfitmethode vorgestellt werden, die es ermöglicht, ohne Iteration über die Daten die Kalibrationskonstanten zu berechnen. Bei der Simulation in Kapitel 3.2 auf Seite 39 werden zwei Z-Werte für jede Messung auf einem Draht erzeugt. Z_{ext}, die aus der CST extrapolierte Koordinate des Treffers, die als fehlerlos angenommen wird, und Z_{cjc}, die Fehler-behaftete Koordinate, die die Messung aus der Spurenkammer darstellt. Z_{cjc} wird mit Gleichung 2.3 auf Seite 25 berechnet:

$$Z_{\text{cjc}} = Z_0 + \frac{L_{\text{eff}}}{2} \frac{1 - \frac{A_-}{A_+}\frac{g_+}{g_-}}{1 + \frac{A_-}{A_+}\frac{g_+}{g_-}}$$

Aus dieser Gleichung sei Y_0 die folgende Größe:

$$Y_0 \equiv \frac{1 - \frac{A_-}{A_+}\frac{g_+}{g_-}}{1 + \frac{A_-}{A_+}\frac{g_+}{g_-}}.$$

Z_0 sei wie im vorherigen Abschnitt gleich 0. Dann ist Z_{cjc} gegeben durch:

$$Z_{\text{cjc}} = \frac{L_{\text{eff}}}{2} \cdot Y_0 \tag{3.9}$$

Die Größe Y_0 ist bis auf den Faktor $L_{\text{eff}}/2$ mit Z_{cjc} identisch.

Bestimmung des Polynoms Trägt man Y_0 gegen die (bei der Simulation erzeugte) aus der CST extrapolierte Z-Koordinate Z_{ext} auf, so erhält man analog zu Bild 3.4 auf Seite 40 eine verschmierte Gerade, die durch den Ursprung geht und die Steigung $2/L_{\text{eff}}$ hat[3]. Dies ist im oberen Teil von Bild 3.6 dargestellt. Setzt man den relativen Verstärkungsfaktor g_+/g_- in Y_0 gleich eins und trägt dann die so erhaltene Größe (vgl. 3.3)

$$Y = \frac{1 - \frac{A_-}{A_+}}{1 + \frac{A_-}{A_+}}$$

auf, so verändert sich das Bild: es entstehen eine Krümmung und ein Versatz zum Ursprung, die umso stärker ausgeprägt sind, je stärker der tatsächliche Wert von g_+/g_- von 1 abweicht. Dies ist im unteren Teil der Abbildung 3.6 dargestellt.

Die Auswirkung von abweichenden Kalibrationskonstanten g_+/g_- und $L_{\text{eff}}/2$ kann näherungsweise durch ein Polynom zweiten Grades beschrieben werden:

$$\boxed{Y = \frac{1 - \frac{A_-}{A_+}}{1 + \frac{A_-}{A_+}} = a + bZ_{\text{ext}} + cZ_{\text{ext}}^2 \equiv P \qquad (3.10)}$$

Durch eine Polynomanpassung erhält man die Parameter a, b und c. Es gilt $P = P(Z_{\text{ext}}, a, b, c)$. Das angepaßte Polynom P ist unter 3.6 abgebildet. Der Verlauf von P in folgt dem Verlauf von Y im unteren Teil von Abbildung 3.6 sehr gut. Die Daten werden durch das Polynom also sehr gut beschrieben. Es ist möglich, aus den Polynomparametern a, b, und c eine genaue Bestimmung der Kalibrationsparameter zu erzielen.

[3] $Y_0 = Z_{\text{cjc}} \cdot \frac{2}{L_{\text{eff}}}$, $Z_0 = 0$

Näherungswerte für g_+/g_- und $L_{\mathrm{eff}}/2$ Zunächst werden Näherungswerte g_s und L_s für g_+/g_- und $L_{\mathrm{eff}}/2$ ermittelt. Die Rechnungen hierzu befinden sich im Anhang B. Die Näherungswerte sind gegeben durch:

$$g_s = \frac{1+a}{1-a} \tag{3.11}$$

$$L_s = \frac{1}{2}\left(L_{2,0}^- \cdot \frac{\frac{1-P(L_{2,0}^-)}{1+P(L_{2,0}^-)} g_s + 1}{\frac{1-P(L_{2,0}^-)}{1+P(L_{2,0}^-)} g_s - 1} + L_{2,0}^+ \cdot \frac{\frac{1-P(L_{2,0}^+)}{1+P(L_{2,0}^+)} g_s + 1}{\frac{1-P(L_{2,0}^+)}{1+P(L_{2,0}^+)} g_s - 1} \right) \tag{3.12}$$

Hierbei sind $L_{2,0}^-$ und $L_{2,0}^+$ zwei um Null symmetrische Werte für Z_{ext}.

Bestimmung der Kalibrationskonstanten In Abschnitt 3.3.1 wurde eine Linearisierung der Funktion $F(Z_{\mathrm{ext}}, L_{\mathrm{eff}}/2, g_+/g_-)$, bzw. $F(Z_{\mathrm{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)$ berechnet. Aus einer Anpassung von $L(Z_{\mathrm{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)$ an die Daten Y ist es möglich, die Kalibrationskonstanten $L_{\mathrm{eff}}/2$ und g_+/g_- zu bestimmen:

$$Y = B_0(\hat{z}) + \delta B_1(\hat{z}) + \epsilon B_2(\hat{z}) \tag{3.13}$$

Durch Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate auf Gleichung 3.13 (siehe C auf Seite 93) können die Parameter δ und ϵ bestimmt werden. Diese Parameter sind Korrekturen der Startwerte g_s und L_s. Mit den neuen Startwerten $g_s + \delta$ und $L_s + \epsilon$ wird dann iteriert und es werden erneut Korrekturen δ und ϵ berechnet. Die Iteration wird so lange fortgesetzt, bis δ und ϵ nahezu 0 ergeben. Dann sind die Startwerte g_s und L_s die richtigen Werte für die Kalibrationskonstanten g_+/g_- und $L_{\mathrm{eff}}/2$. Eine solche Vorgehensweise erfordert allerdings eine aufwendige Iteration über die Daten, die gespeichert und neu gelesen werden müssen (*offline*-Kalibration). Bei der Z-Kalibration der CJC wird standardmäßig bis heute eine ähnliche Methode benutzt [4]. Dies kann jedoch vermieden werden: Da das Polynom P die Daten sehr gut beschreibt, ist eine Anpassung von $L(Z_{\mathrm{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)$ an P äquivalent zur Anpassung an die Größe Y, die aus den Daten berechnet wird. In Gleichung 3.13 kann Y also durch das Polynom P ersetzt werden. So erhält man die **Anpassungsbedingung**

$$\boxed{a + bZ_{\mathrm{ext}} + cZ_{\mathrm{ext}}^2 = B_0(Z_{\mathrm{ext}}) + \delta B_1(Z_{\mathrm{ext}}) + \epsilon B_2(Z_{\mathrm{ext}}) \qquad (3.14)}$$

Das bedeutet, daß bei der Anpassung (Gleichung 3.13) die *Daten Y* durch die *Beschreibung* der Daten P ersetzt werden. Der Vorteil dieser Substitution ist, daß nicht über die Daten iteriert werden muß: Z_{ext} ist eine Variable, die keine direkte Information über die Drahtparameter enthält. Die gesamte Information steckt in den Polynomparametern a, b und c. Daher kann bei der Anpassung mit Gleichung 3.14 eine Reihe von gleichmäßig über den Z-Bereich $-110\mathrm{cm} < Z < 110\mathrm{cm}$ gelegenen Daten verwendet werden. Eine Iteration über diese Daten ist im Unterschied zu einer Iteration über die *echten* Daten nicht zu zeitaufwendig. Die eigentliche Information wird den *echten* Daten im ersten Schritt in Form von P entnommen. Es ist nicht mehr erforderlich, die Daten neu einzulesen, und die Kalibration kann direkt mit den Rohdaten durchgeführt werden (*online*-Kalibration).

In Abbildung 3.7 ist die Differenz $P - F(Z_{\text{ext}}, L_{\text{eff}}/2, g_+/g_-)$ gegen Z_{ext} aufgetragen. Die Funktion $F(Z_{\text{ext}}, L_{\text{eff}}/2, g_+/g_-)$ und das Polynom P wurden mit der oben erwähnten Reihe von Z-Werten berechnet, wobei in $F(Z_{\text{ext}}, L_{\text{eff}}/2, g_+/g_-)$ für g_+/g_- und $L_{\text{eff}}/2$ die Werte aus der hier vorgestellten Kalibration für einen Draht eingesetzt wurden. Aus diesem Bild läßt sich der Grad der Übereinstimmung zwischen P und $F(Z_{\text{ext}}, L_{\text{eff}}/2, g_+/g_-)$ ablesen.

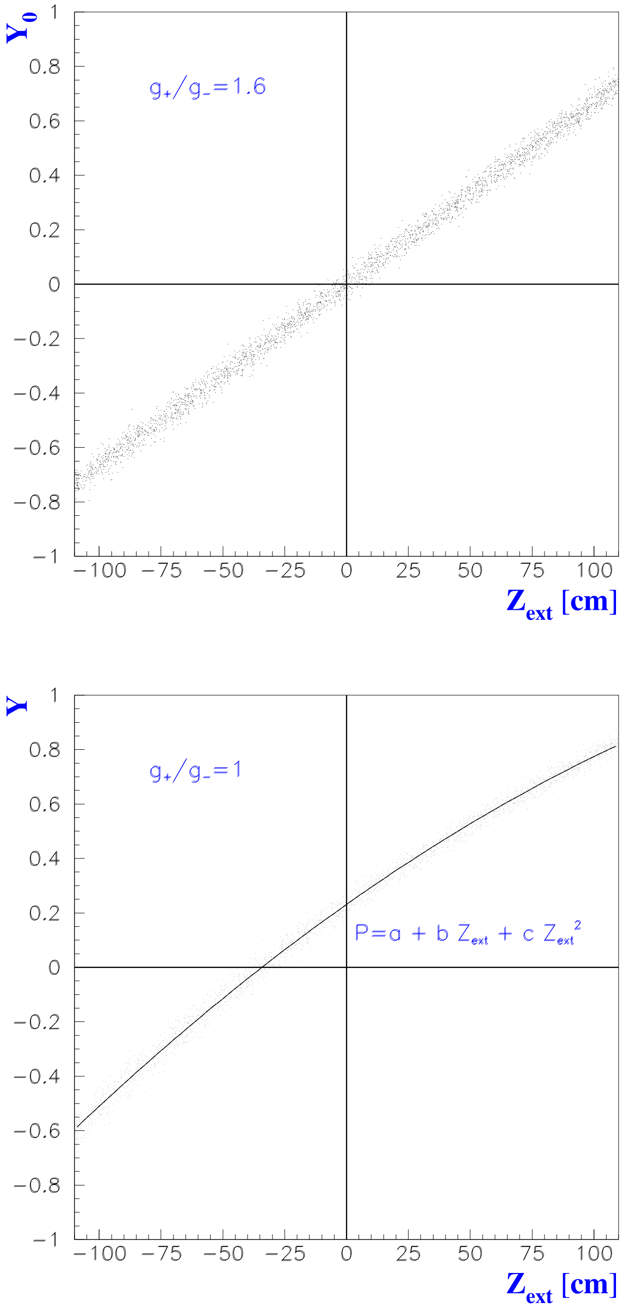


Abbildung 3.6: Das Verhältnis A_-/A_+ wurde mit einem relativen Verstärkungsfaktor von $g_+/g_- = 1.6$ generiert. $Y_0 = (1 - \frac{A_-}{A_+}\frac{g_+}{g_-})/(1 + \frac{A_-}{A_+}\frac{g_+}{g_-})$. Oben: Y_0 wurde mit $g_+/g_- = 1.6$ gegen Z_{ext} aufgetragen. Dieses g_+/g_- ist das richtige, d.h. das g_+/g_- , mit dem auch die simulierten Daten (A_-/A_+) generiert wurden. Im unteren Bild ist $g_+/g_- = 1$. Eine Berechnung von Y_0 mit einem abweichenden Wert für g_+/g_- verursacht eine Krümmung, aus der die tatsächlichen Werte für g_+/g_- und $L_{\text{eff}}/2$ ermittelt werden können. Für $g_+/g_- = 1$ ist $Y_0 = Y$ (unten). Y ist durch das Polynom $P = a + bZ_{\text{ext}} + cZ_{\text{ext}}^2$ überlagert (durchgezogene Linie).

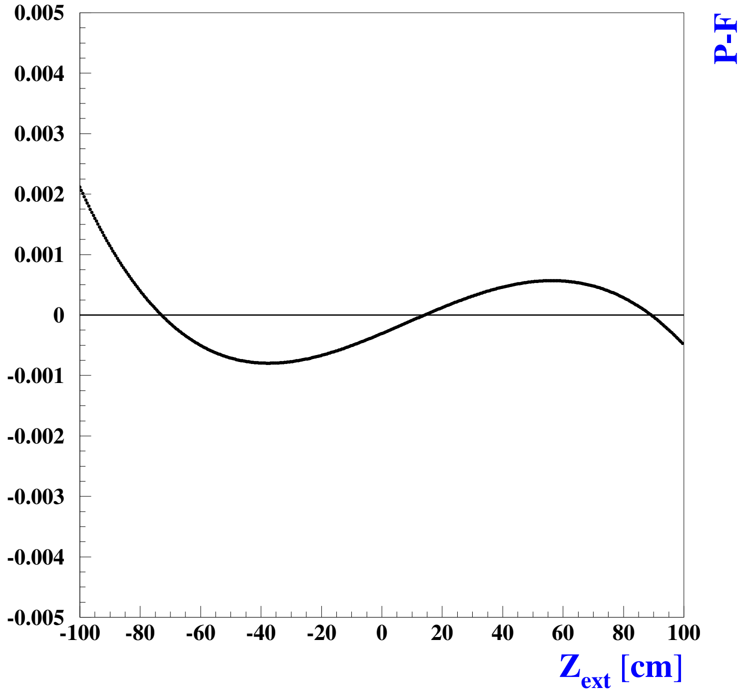


Abbildung 3.7: In dieser Abbildung ist die Differenz P-F gegen Z_{ext} dargestellt. Hierbei ist $P = a + bZ_{\mathrm{ext}} + cZ_{\mathrm{ext}}^2$ und $F = F(Z_{\mathrm{ext}}, L_{\mathrm{eff}}/2, g_+/g_-)$ aus 3.5. Die Funktion $F(Z_{\mathrm{ext}}, L_{\mathrm{eff}}/2, g_+/g_-)$ kann durch das Polynom P angenähert werden. Trägt man die Differenz $P - F$ gegen Z_{ext} auf, so wird der Grad der Übereinstimmung zwischen den Daten und der *Beschreibung* der Daten P in Abhängigkeit von Z_{ext} dargestellt.

3.4 Konvergenzüberprüfung

3.4.1 Konvergenzverhalten des Algorithmus

In der folgenden Tabelle 3.1 sind für unterschiedliche Werte von g_+/g_- die Werte für die aus dem Polynomfit-Algorithmus bestimmten Kalibrationsparameter nach jedem Schritt eingetragen. Die Kalibration wurde mit generierten Daten durchgeführt. Die Startwerte sind die Näherungswerte g_s und L_s. Im untersten Teil der Tabelle wurden die Startwerte nicht mit den Gleichungen 3.12 und 3.11 berechnet sondern auf stark von den tatsächlichen Parametern abweichenden Werten *gesetzt*.

Parameter	$L_{\mathbf{eff}}/2$	g_+/g_-
$g_+/g_- = 0.9$, $L_{\mathrm{eff}}/2 = 200$ cm		
Startwert	199.8964	0.90038
1. Iteration	199.9275	0.90066
2. Iteration	199.9275	0.90066
3. Iteration	199.9275	0.90066
$g_+/g_- = 1.6$, $L_{\mathrm{eff}}/2 = 200$ cm		
Startwert	198.9088	1.60115
1. Iteration	199.6716	1.601022
2. Iteration	199.6745	1.601024
3. Iteration	199.6745	1.601024
$g_+/g_- = 0.9$, $L_{\mathrm{eff}}/2 = 200$ cm, stark abweichende Startwerte		
Startwert	180.0	1.20
1. Iteration	200.9923	0.84634
2. Iteration	200.0806	0.89905
3. Iteration	199.9274	0.90066
4. Iteration	199.9275	0.90066

Tabelle 3.1: In dieser Tabelle sind für die Drahtparameter $L_{\mathrm{eff}}/2$ und g_+/g_- die Startwerte und die korrigierten Werte nach mehreren Iterationen eingetragen. Der Verlauf der Konvergenz wurde für simulierte Daten mit verschiedenen wahren Werten für g_+/g_- abgebildet.

Die aus 3.12 und 3.11 berechneten Startwerte sind bereits nahe an den tatsächlichen Werten. Bei gewöhnlichen Werten von g_+/g_- wird bereits nach der ersten Iteration keine Veränderung mehr berechnet. Auch bei stark abweichenden Startwerten (unterster Teil der Tabelle) konvergiert der Algorithmus schnell.

3.4.2 Abhängigkeit von der Trefferanzahl

Die Genauigkeit der Kalibrationskonstanten hängt in erster Linie von der Anzahl der Treffer auf dem zu kalibrierenden Draht ab. Eine hohe Anzahl von Treffern ermöglicht eine genauere Bestimmung der Konstanten durch die Kalibration. In den Abbildungen 3.8 und 3.9 ist dieser Zusammenhang dargestellt.

$g_+/g_- = 0.95$, $L_{\mathrm{eff}}/2 = 200$ cm In Abbildung 3.8 sind die drahtabhängigen Kalibrationskonstanten $L_{\mathrm{eff}}/2$ und g_+/g_- gegen die Anzahl der bei der Kalibration verwendeten Treffer für einen Draht aufgetragen. Für jede Anzahl von Treffern wurde eine Kalibration durchgeführt. Die simulierten Daten wurden für einen relativen Verstärkungsfaktor $g_+/g_- = 0.95$ und eine halben effektiven Länge $L_{\mathrm{eff}}/2 = 200$ cm generiert. Diese Werte liegen im typischen Bereich für die Konstanten aus der CJC (vgl. Abbildung 4.2 auf Seite 59). Ab ca. 1500 bis 2000 Treffern liegt die Amplitude der Fluktuationen für $L_{\mathrm{eff}}/2$ im Bereich von 0.1%. Für den relativen Verstärkungsfaktor sind die Fluktuationen wesentlich kleiner, jedoch gibt es eine systematische Abweichung vom tatsächlichen Wert, die mit 0.15% allerdings sehr klein ist.

$g_+/g_- = 1.6$, $L_{\mathrm{eff}}/2 = 200$ cm Im unteren Teil von Abbildung 3.8 befinden sich die gleichen Darstellungen, mit dem Unterschied, daß hier ein stark von 1 abweichendes g_+/g_- simuliert wurde: g_+/g_- =1.6. Solche Verstärkungsfaktoren kommen in der CJC nur äußerst selten (also für sehr wenige Drähte) vor. Diese Wahl von g_+/g_- erlaubt aber eine Untersuchung der Grenzen der Kalibrationsmethode. Der relative Verstärkungsfaktor g_+/g_- hat einen starken Einfluß auf die Güte der Polynomanpassung: Die Genauigkeit von g_+/g_- bleibt im gleichen Bereich; der Parameter $L_{\mathrm{eff}}/2$ wird jedoch mit einer Abweichung von 0.5 cm vom tatsächlichen Wert berechnet.

Um besser beurteilen zu können, wie stark die Auswirkungen einer Abweichung von $L_{\mathrm{eff}}/2$ auf die Genauigkeit der Z-Bestimmung des jeweiligen Drahtes sind, wird die im nächsten Abschnitt beschriebene Größe Z_E eingeführt.

Effektive Genauigkeit Z_E Die Größe Z_E ist der Z_{cjc} -Wert für das Amplitudenverhltnis $A_-/A_+ = 3$:

$$Z_E = Z_0 + \frac{L_{\mathrm{eff}}}{2} \frac{1 - 3\frac{g+}{g-}}{1 + 3\frac{g+}{g-}} \tag{3.15}$$

Dies entspricht für $g_+/g_- = 0.95$ und $L_{\mathrm{eff}}/2 = 200$ cm einem CJC-Treffer auf der negativen Z-Seite, am Rand der Kammer. Z_E eignet sich gut zur Abschätzung der Genauigkeit von Z_{cjc}. Die Größe der Fluktuationen von Z_E läßt im Gegensatz zu den einzelnen Kalibrationskonstanten $L_{\mathrm{eff}}/2$ und g_+/g_- *direkt* Rückschlüsse auf die Genauigkeit der Z-Messung auf dem Draht zu und kann als *effektive* Genauigkeit bezeichnet werden. In Abbildung 3.9 ist Z_E gegen die Anzahl der Treffer aufgetragen. Im oberen Teil wurden die simulierten Daten für den realistischen Wert $g_+/g_- = 0.95$ generiert. Im unteren Teil wurde bei der Simulation für g_+/g_- ein stärker von eins abweichender Wert für g_+/g_- benutzt: g_+/g_- 1.6. Auch hier sind die Fluktuationen ab einer Trefferanzahl von 2000 mit 0.1% sehr klein. Die bereits erwähnte Abweichung von $L_{\mathrm{eff}}/2$ bei $g_+/g_- = 1.6$ aus Abbildung 3.8 verursacht bei der Berechnung der Z-Koordinate eine Verschiebung nach innen, falls $L_{\mathrm{eff}}/2$ zu klein bestimmt wurde und nach außen, falls $L_{\mathrm{eff}}/2$ zu groß bestimmt wurde.

Die Kalibrationsmethode berechnet die Parameter für realistische Werte derselben mit einer guten Genauigkeit. Die bei $g_+/g_- = 1.6$ beobachteten Abweichungen haben zwar eine Auswirkung auf die Z-Auflösung des Drahtes, diese ist aber nicht zu groß. Weiterhin ist aus der Erfahrung mit echten Daten bekannt, daß der Anteil von Drähten mit stark abweichendem g_+/g_- in der Zentralen Spurenkammer, die mit 2640 Signaldrähten bestückt ist, verschwindend gering ist (vgl. Abbildung 4.2). Die Auswirkung auf die Z-Auflösung der ganzen Kammer ist daher vernachlässigbar.

3.4.3 Globale Z-Auflösung

Das Residuum ΔZ ist die Differenz zwischen dem *wahren* $Z = Z_{\mathrm{ext}}$ und dem aus Gleichung 2.3 bestimmten Z_{cjc}. In Abbildung 3.10 sind verschiedene Residuenverteilungen dargestellt. Bei der Erzeugung dieser Histogramme wurden 30 Werte für g_+/g_- und 20 für $L_{\mathrm{eff}}/2$ benutzt. Der Wertebereich der Parameter bewegt sich für g_+/g_- von 0.86 bis 1.15 und für $L_{\mathrm{eff}}/2$ von 177.5 cm bis 225 cm. Diese Verteilungen stellen also eine Mittelung über verschiedene Drähte dar. Setzt man in die Z-Bestimmungsgleichung (2.3) die richtigen Parameter ein, so erhält man eine Verteilung, die die bei der Simulation eingeführte Gauß-Verschmierung wiedergibt. Dies ist im ersten Bild in Abbildung 3.10 dargestellt. Die ΔZ-Verteilung für abweichende Kalibrationsparameter wurde mit um 5% Gauß-verschmierten Parametern erzeugt. In der letzten Verteilung wurde Z_{cjc} mit den aus der Kalibration stammenden Parametern berechnet. Vergleicht man diese Verteilung mit der Residuenverteilung für die *echten* Parameter im gleichen Bild, erkennt man, daß die Breiten der Verteilungen sich praktisch nicht unterscheiden. Die Kalibration optimiert die Parameter so, daß ein Unterschied zu den wahren Parametern nicht zu erkennen ist.

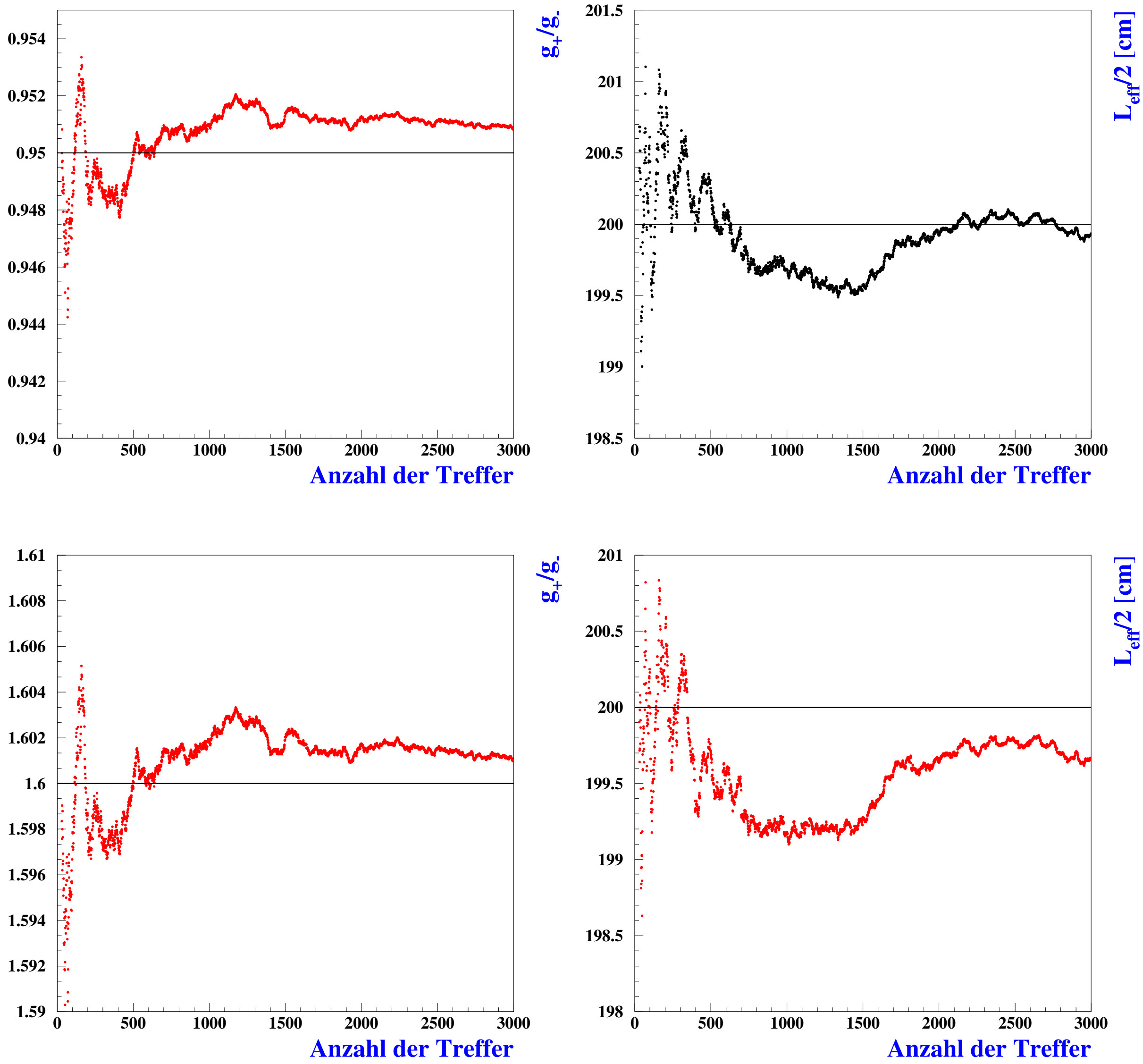
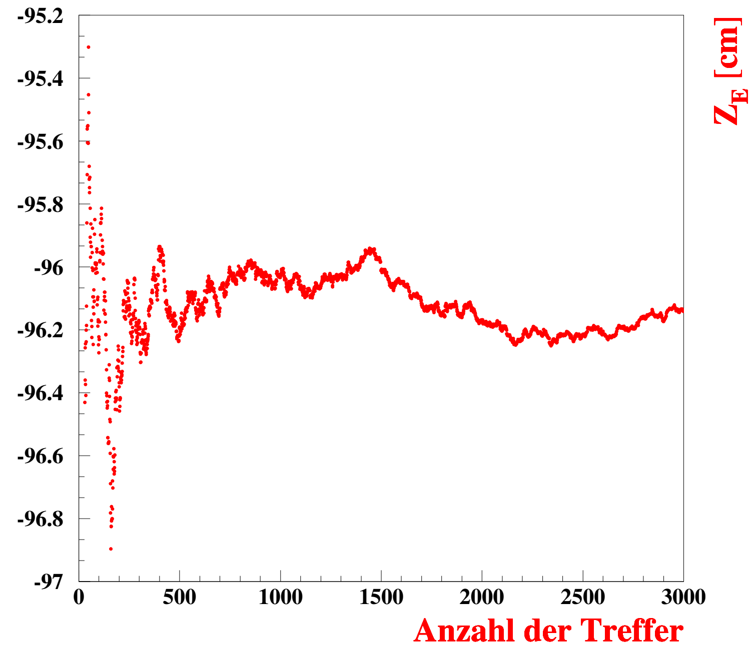


Abbildung 3.8: In dieser Abbildung sind die Kalibrationskonstanten $L_{\rm eff}/2$ und g_+/g_- gegen die bei der Kalibration verwendete Anzahl der Treffer auf dem Draht aufgetragen. Bei jeder Anzahl von Treffern auf dem Draht wurde eine Kalibration durchgeführt. Die Genauigkeit der Kalibration wächst mit der Statistik an, und die Fluktuationen werden kleiner. In der oberen Hälfte wurden die Daten mit g_+/g_- =0.95 simuliert, in der unteren Hälfte ist g_+/g_- =1.6. Die durchgezogenen Linien stellen jeweils den tatsächlichen, bei der Simulation eingegebenen Wert für die Konstante dar.



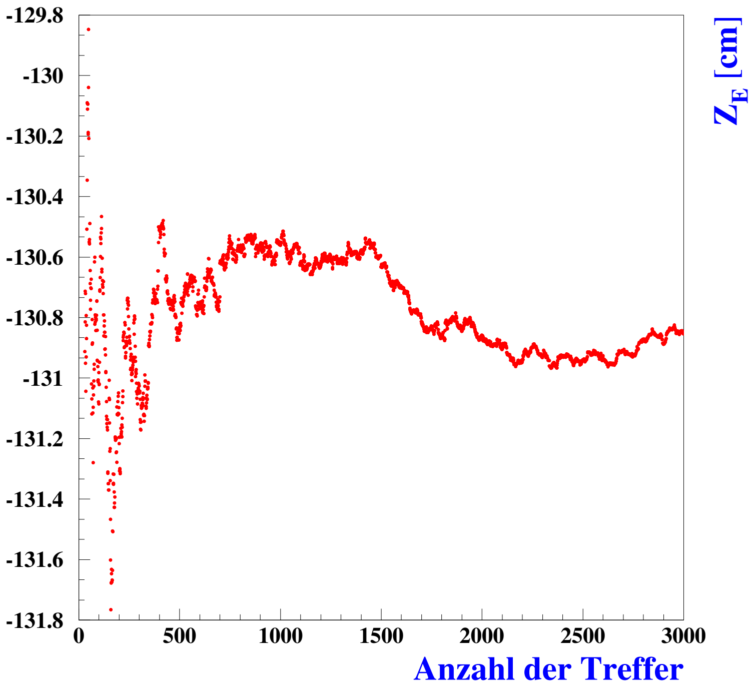


Abbildung 3.9: Die Größe Z_E gegen die verwendete Anzahl der Treffer auf dem Draht. Für jede Anzahl von Treffern auf dem Draht wurde eine Kalibration durchgeführt. Oben ist $g_+/g_- = 0.95$ und unten 1.6.

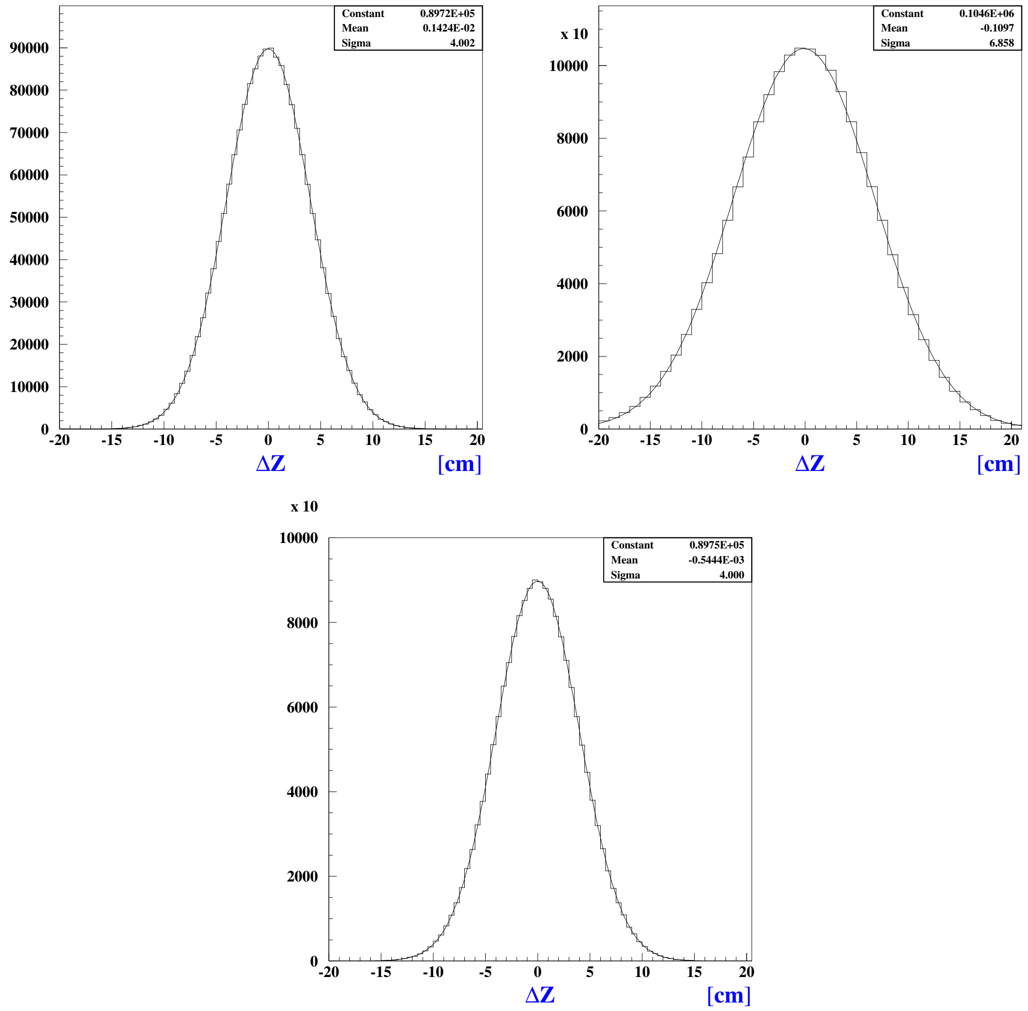


Abbildung 3.10: Die Residuenverteilungen $\Delta Z = Z_{\rm ext} - Z_{\rm cjc}$ geben Aufschluß über die globale Auflösung. $Z_{\rm cjc}$ hängt über Gleichung 2.3 von g_+/g_- und $L_{\rm eff}/2$ ab. Wie bereits erläutert sind die Verteilungen über verschiedene Drähte, also Kalibrationskonstanten, gemittelt. Die Kalibration wurde mit simulierten Daten durchgeführt.
Bild links, oben: $L_{\rm eff}/2$ und g_+/g_- sind die *wahren* Konstanten.
Bild rechts, oben: $L_{\rm eff}/2$ und g_+/g_- wurden um 5% falsch gewählt.
Bild unten: $L_{\rm eff}/2$ und g_+/g_- wurden aus der Kalibration bestimmt.
Die Größen $Z_{\rm ext}$ und $Z_{\rm cjc}$ wurden aus simulierten Daten berechnet.

4

Anwendung auf ep-Daten

4.1 Übersicht über die Daten

Bei der Anwendung der Kalibration auf die Daten wurden 1997er-Daten aus Elektron-Proton-Kollisionen (97er ep-Daten) aus dem Runbereich Nummer `199506` bis `199894` verwendet.

4.1.1 Organisation der Daten

Bei H1 sind die Daten in Bänken mit Hilfe des BOS Systems [6] organisiert. Eine Liste der benötigten Bänke und eine Beschreibung ihrer Abhängigkeiten befindet sich im Anhang D. Bei dieser Kalibration wurde zunächst von der Spurenbank CVFT ausgegangen, die neben den CJC-Spuren auch vier Adressen (*Pointer*) für die zugeordneten CST-Treffer (aus der CST-*Spacepoint bank* CVSP) enthält. Aus der Rohdatenbank CRJE erhält man die zu den Treffern aus der Spur gehörigen CJC-Informationen (A_-, A_+ und Drahtnummer).

Bei der Erzeugung der Bank CVFT werden die CJC-Spuren zunächst aus der Spurbank CJKR gelesen, um dann auf einen gemeinsamen, zentralen Vertex angepaßt zu werden. Diese Anpassung *verbessert* die Spurparameter der CJC-Spuren aus der Bank CJKR. Den so verbesserten Spuren werden dann CST-Treffer aus der Bank CVSP zugeordnet. Nach der Zuordnung wird eine Anpassung der CJKR Spuren (*nicht Vertex angepaßt*) und der zugeordneten CST-Treffer durchgeführt, um die Spurparameter zu verbessern. Die so in ihren Spurparametern verbesserten Spuren werden mit den zugeordneten CST-Treffern in die Bank CVFT geschrieben. Die Informationsverbesserung aus dem Vertexfit wird hier also nur zur Zuordnung der CST-Treffer verwendet. Die Spurbank CVFT existiert zu jedem *Ereignis* (*Event*) und enthält nur Spuren mit mindestens einem zugeordneten CST-Treffer.

4.1.2 Eigenschaften der Daten

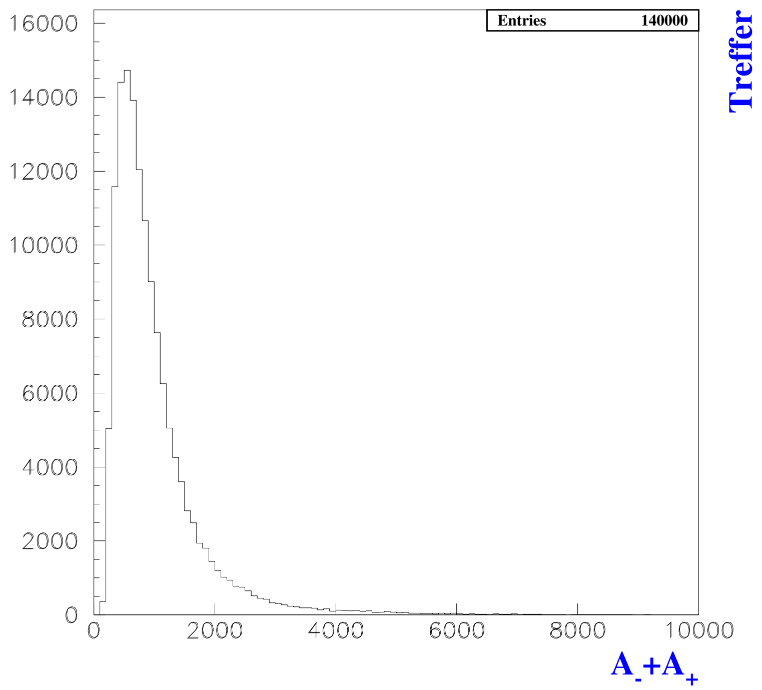
Die direkten Meßgrößen der zentralen Spurenkammer sind die Pulsintegrale A_- und A_+. Die Summe $A_- + A_+$ dieser beiden Größen ist ein Maß für die gesamte, durch das Teilchen in der Kammer deponierte Ladung. Eine Verteilung der Summe $A_- + A_+$ ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Im unteren Teil der Abbildung ist die Darstellungsweise so gewählt, daß abzulesen ist, wieviel Prozent der Daten sich unterhalb eines Wertes von $A_- + A_+$ befinden.

Die Kalibrationskonstanten $L_{\text{eff}}/2$ und g_+/g_- wurden bisher mit einer von S. Prell entwickelten Methode [4] bestimmt. In Abbildung 4.2 sind diese Kalibrationskonstanten gegen die Drahtnummer der zentralen Spurenkammer aufgetragen. Diese Kalibration soll im Folgenden mit Standard 1997 Kalibration bezeichnet werden. Abbildung 4.8 zeigt die gleichen Konstanten, wie sie von der in dieser Diplomarbeit vorgestellten Kalibration bestimmt werden. Der relative Verstärkungsfaktor liegt erwartungsgemäß ungefähr bei eins. Nur wenige Drähte haben ein g_+/g_- , daß stark von eins abweicht. Die Werte für die halben effektiven Längen liegen ebenfalls im (aus Gleichung 2.4) erwarteten Bereich. Ein negativer Wert von $L_{\text{eff}}/2$ bedeutet, daß der Signaldraht falschherum an die Auslese angeschlossen ist. Weiter erkennt man auch eine periodische Struktur von $L_{\text{eff}}/2$. Diese rührt daher, daß in der CJC der erste und der letzte Draht jeder Zelle dicker ist als die übrigen, was einen niedrigeren Widerstand und somit auch eine niedrigere effektive Drahtlänge (vgl. Gleichung 2.4) zur Folge hat.

In Abbildung 4.3 sind die Verteilungen von Z_{cjc}, Z_{ext} und des Winkels θ der Spur dargestellt. Bei der Berechnung von Z_{cjc} wurden für die Kalibrationskonstanten die Werte aus der Standardkalibration 1997 verwendet. Die Verteilungen spiegeln die Kinematik im Detektor wider: die Häufung in Vorwärtsrichtung entspricht der Strahlrichtung der Protonen, die einen höheren Impuls tragen.

Die Differenz $\Delta Z = Z_{\text{cjc}} - Z_{\text{ext}}$ ist ebenfalls abgebildet. Die Verteilung von ΔZ ist nicht gaußförmig. Dieser Effekt beruht auf der Tatsache, daß die Z-Auflösung σ_Z in der CJC von der Gesamtladung $A_- + A_+$ abhängt. Die ΔZ-Verteilung ist demzufolge eine Überlagerung mehrerer Gaußkurven mit unterschiedlichen Standardabweichungen.

Die Verteilung der Z-Koordinate z_{cst} der Treffer im zentralen Vertex Detektor CST sieht man in Abbildung 4.4. Diese Z-Koordinate ist der Z-Wert eines CST-Treffers *in der CST* und darf nicht mit der aus der CST extrapolierten CJC-Koordinate Z_{ext} verwechselt werden.



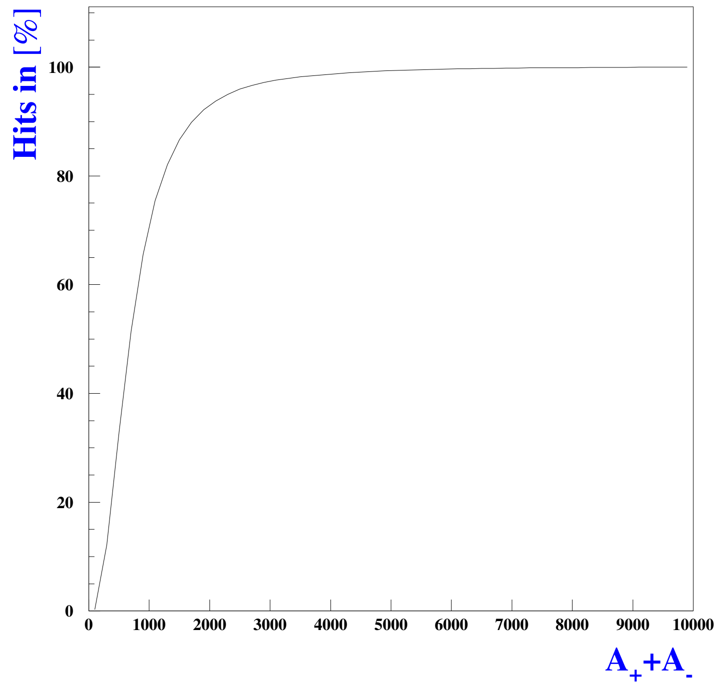


Abbildung 4.1: Die Summe der Pulsintegrale $A_- + A_+$ entspricht der auf dem Draht abgelegten Ladungsmenge. Auf der oberen Hälfte befindet sich eine Häufigkeitsverteilung von $A_- + A_+$. Die untere Hälfte zeigt auf der Ordinate den Prozentsatz der Daten, der sich unterhalb des auf der Abszisse aufgetragenen Wertes für $A_- + A_+$ befindet, an. Es handelt sich um '97 ep-Daten.

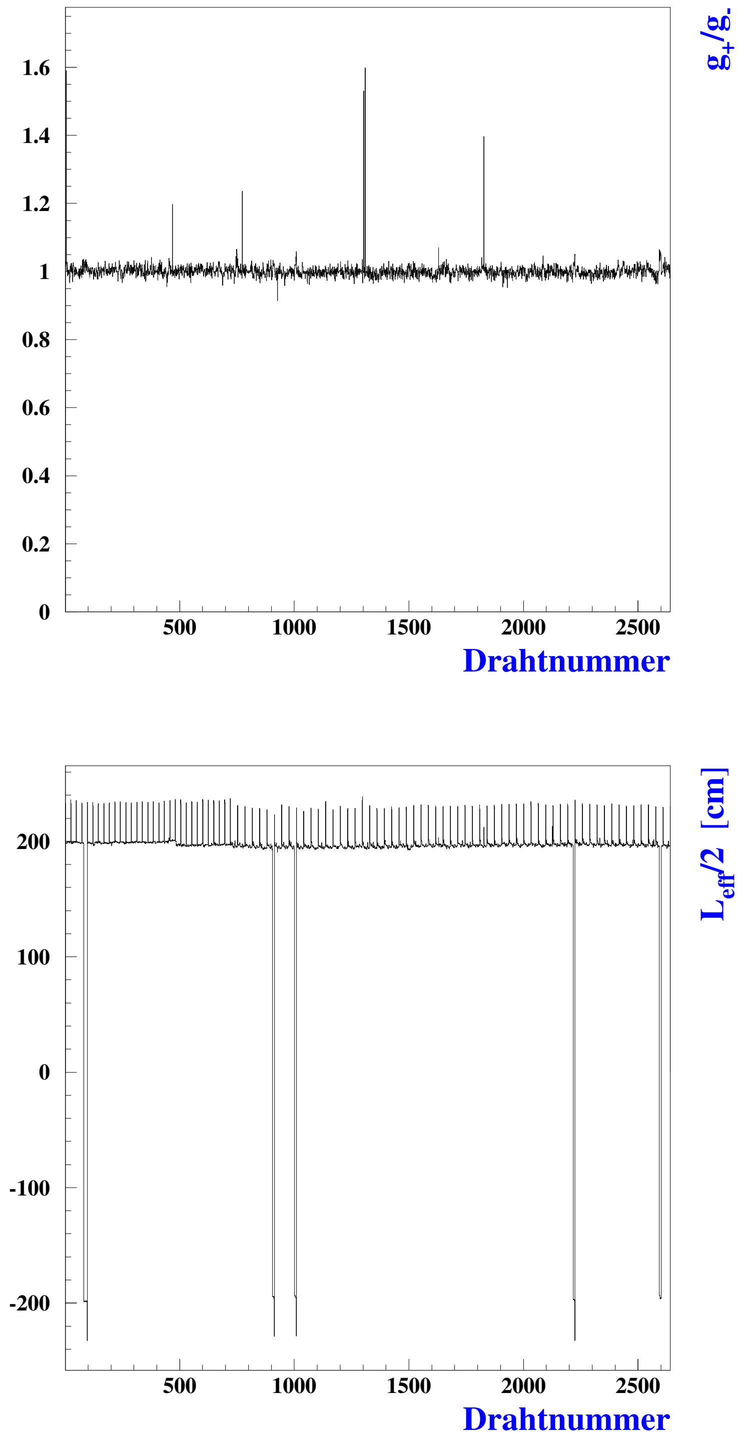


Abbildung 4.2: Kalibrationskonstanten g_+/g_- und $L_{\mathrm{eff}}/2$ aus der Standardkalibration 1997, Bank C1J8 (vers. 971020)

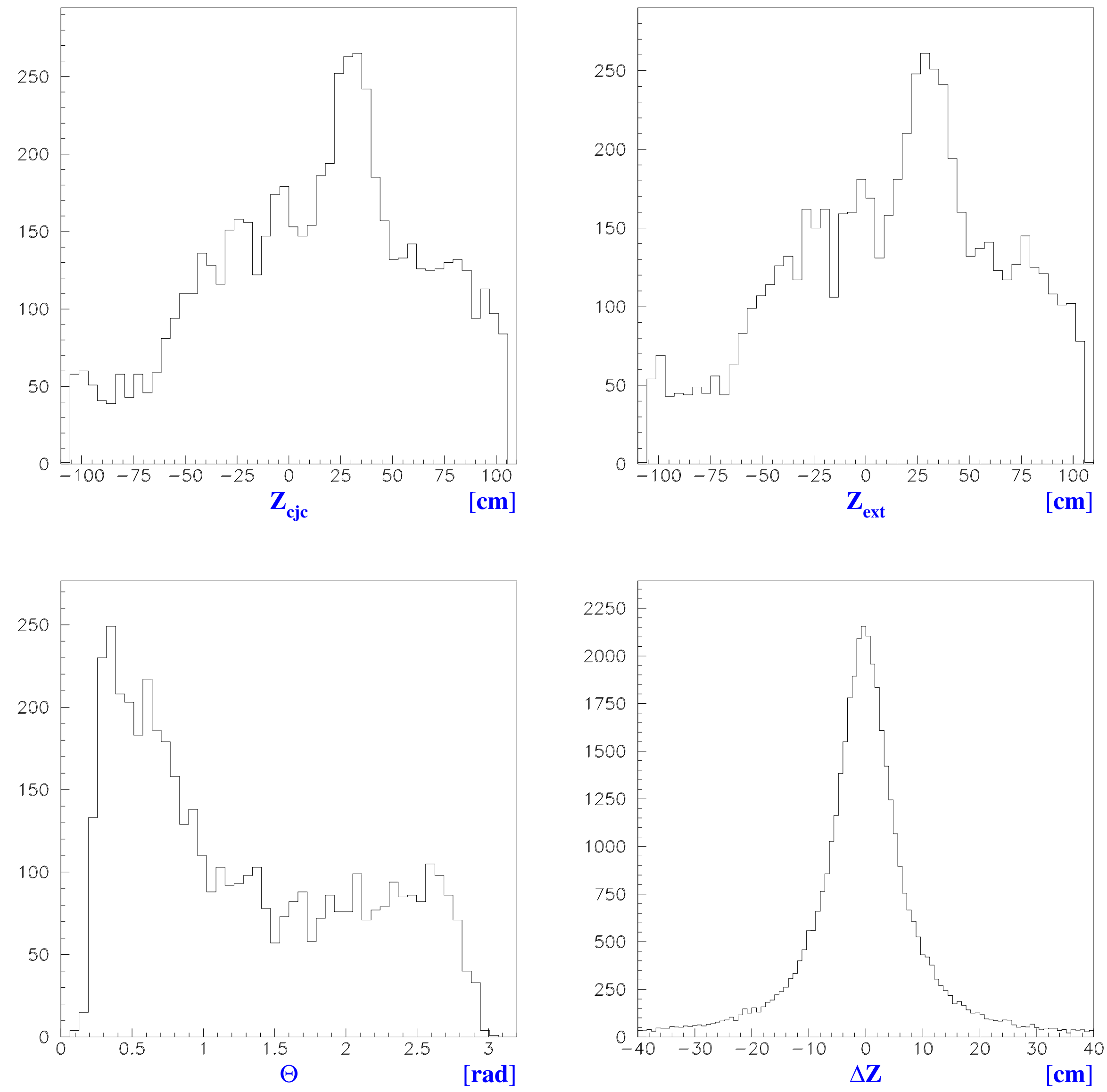


Abbildung 4.3: Z_{cjc} , Z_{ext} , θ und $\Delta Z = Z_{\mathrm{cjc}} - Z_{\mathrm{ext}}$ aus der Standardkalibration 1997. Die Verteilung von ΔZ ist nicht gaußförmig, da die Auflösung der CJC (also die Standardabweichung der Verteilung) von der Amplitudensumme $A_- + A_+$ abhängt. Daher handelt es sich hier um eine Überlagerung von sehr vielen Gaußverteilungen. Die ΔZ-Verteilung hat mehr Einträge als die Verteilungen der Größen Z_{cjc} und Z_{ext} , da hier keine Schnitte gemacht wurden.

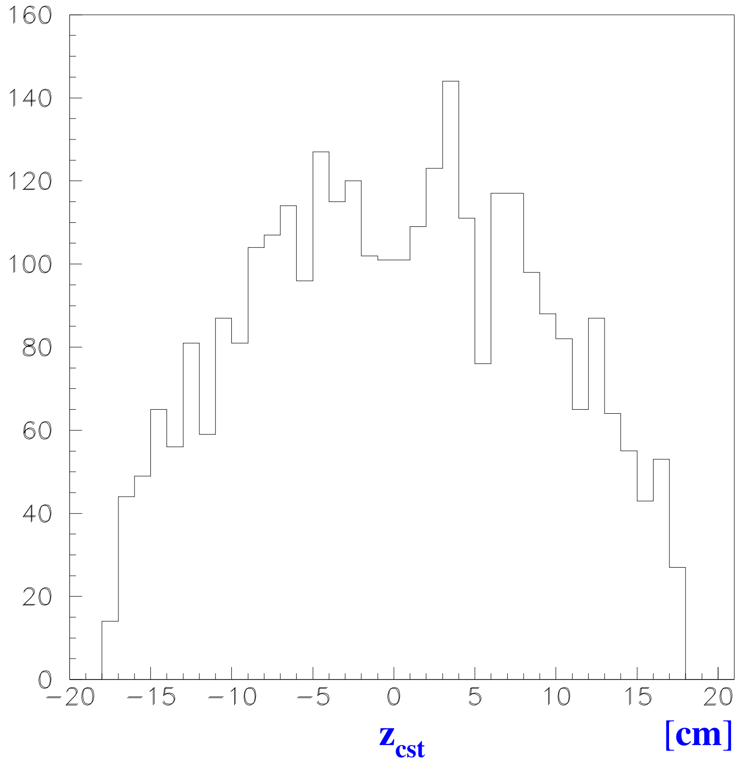


Abbildung 4.4: CST-Treffer-Verteilung aus der Bank CVSP (siehe Tabelle D.2 auf Seite 95).

4.2 Anwendung der Kalibrationsmethode

Der Kalibrationsalgorithmus wurde als Subroutine geschrieben, die als Eingabewerte die Größen A_-, A_+, Z_{ext}, die Drahtnummer N, sowie die Startwerte L_s und g_s benötigt. Diese Größen werden aus verschiedenen Bänken gelesen. Die Startwerte L_s und g_s werden aus der Bank C1J8 gelesen. Es sind die Werte der Kalibrationsparameter, wie sie die bisher aktive Kalibration ermittelt. Die Größen A_- und A_+ werden aus der Bank CRJE gelesen. Die im Folgenden beschriebenen Größen stammen aus unterschiedlichen Bänken, die im Anhang D beschrieben werden.

Schnitte auf die Daten Es werden auf die Daten verschiedene *Schnitte* angewandt, die im Folgenden aufgelistet werden. Die ersten vier Schnitte stellen eine Vorauswahl der Spuren dar. Der χ^2- und der Median-Schnitt ermöglichen eine Überprüfung der CST-Treffer Zuordnung. Diese zwei Schnitte hängen vom vorangehenden, Treffer-bezogenen Residuum-Schnitt ab. Schließlich werden die zur Kalibration benötigten Größen Z_{ext}, Z_{cjc}, A_- und A_+ aus den Spuren gelesen und auf ihre Qualität mit den letzten beiden Schnitten überprüft.

Schnitte auf die Spurqualität der CJC-Spuren:

- **Impuls Schnitt** Bei Spuren, die von Teilchen mit kleinen Impulsen herrühren, kommt Vielfachstreuung vor. Daher wird auf den Impuls der Spur geschnitten. Dieser Schnitt ist in Abbildung 4.7 dargestellt.
  $P_{\text{Spur}} > 0.4$ GeV

- ***dca*-Schnitt** Ein zu großer *dca*-Wert ist ein Zeichen dafür, daß eine Spur nicht gut auf den Vertex paßt. Um solche Spuren auszusondern, wird der *dca-Schnitt* eingeführt. Der Wert für diesen Schnitt wurde Abbildung 4.6 entnommen.
  $dca < 0.04$ cm

- **Schnitt auf die Spurlänge (Anzahl der Treffer N, Radius R)** Eine zu kurze Spur kann zu einer schlechten Zuordnung (*Linking*) der CST-Treffer z_{cst} führen: hat eine Spur zu wenige Treffer, dann ist die Spur-Anpassung nicht zuverlässig. Je länger die Spur ist, desto sicherer (genauer) ist die Bestimmung der Spurparameter. Die Forderung nach einer *langen* Spur läßt sich einerseits durch die Forderung nach einer Mindestanzahl von Treffern pro Spur und andererseits durch die Forderung nach einem minimalen Radius R des letzten Treffers der Spur erfüllen:
  $N > 40$, $R > 78$ cm.
  Durch diesen Schnitt werden die inneren Drähte (CJC I) auf einen kleineren Z-Bereich eingeschränkt. Dies ist nicht unproblematisch, da der *Hebelarm* der Kalibration der breite Z-Bereich von 220 cm ist. Die Trefferverteilung von Spuren aus ep-Kollisionen hat jedoch ebenfalls die Eigenschaft, auf den inneren Drähten weniger Treffer hervorzurufen. Der Grund hierfür ist, daß die Spuren vom Vertex[1] stammen, welcher sich im Zentrum der Spurenkammer befindet. Der Schnitt auf

[1] der Wechselwirkungspunkt von Elektron und Proton Strahl

die Spurlänge verbietet daher nur Spuren, deren Winkel zu den Signaldrähten klein ist. Diese Spuren haben aber auch geringere Qualität.

Schnitte zur Überprüfung der CST-Treffer-Zuordnung:

- **CST-Treffer Anzahl** Zur Berechnung des bei der Kalibration benötigten Wertes Z_{ext} werden zwei CST-Treffer benötigt (siehe Abschnitt 3.1). Daher muß an die CVFT Spuren die Forderung nach zwei zugeordneten Treffern gestellt werden (Wort 21 bis 23 in CVFT)

- **Median-Schnitt** Die Genauigkeit der CST-Treffer ist sehr hoch. Es kann jedoch vorkommen, daß einer CJC-Spur die falschen CST-Treffer zugeordnet werden. Der Median-Schnitt ermöglicht es, auf solche Spuren zu schneiden. Zu jedem Treffer i gibt es ein Paar $((Z_{\mathrm{cjc}})_i, (Z_{\mathrm{ext}})_i)$. Zu jeder Spur mit N Treffern gibt es N Differenzen $\Delta Z_i = (Z_{\mathrm{cjc}})_i - (Z_{\mathrm{ext}})_i$. Ordnet man die ΔZ_i der Größe nach an, so ist $X_m = \Delta Z_{N/2}$. X_m ist also das mittlere ΔZ.
  $X_m < 5$ cm

- χ^2 **Schnitt** Die Größe χ^2 der Spur ist definiert durch

  $$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N} \frac{(\Delta Z)_i^2}{(\sigma_Z^2)_i}$$

  Die Größe χ^2 pro Freiheitsgrad ist durch

  $$\chi^2/N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{(\Delta Z)_i^2}{(\sigma_Z^2)_i}$$

  gegeben. Sie ist ein Maß für die Qualität der Übereinstimmung von Z_{ext} und Z_{cjc} für die ganze Spur. Dieser Schnitt sondert Spuren mit falsch zugeordneten CST-Treffern aus. Bei der Berechnung von χ^2/N werden nur die Treffer verwendet, die nicht vom Residuum-Schnitt verboten werden, da solche Treffer das χ^2/N einer an sich guten Spur stark beeinträchtigen können.
  $\chi^2/N < 1.9$

Schnitte auf die CJC-Treffer:

- **Residuum-Schnitt** In einer guten Spur kann es falsche Treffer geben, die möglicherweise nicht zur Spur gehören. Ein Qualitätsmerkmal ist das Residuum R_Z des Treffers, dessen Verteilung in Abbildung 4.7 dargestellt ist.

  $$R_Z = \frac{\Delta Z}{\sigma_Z}$$

  R_Z wird für jeden Treffer berechnet und dient dazu, einzelne, schlechte Treffer auszusondern.
  $|R_Z| < 2.3$

- Z**-Schnitt** Der Wert Z_{cjc} der Z-Koordinate in der CJC, und der Wert Z_{ext} der aus der CST extrapolierten Z-Koordinate dürfen nicht die Dimensionen der Spurenkammer überschreiten. Hier wird Z_{cjc} mit den Kalibrationsparametern aus der Standardkalibration 1997 berechnet. In Z hat die CJC eine Länge von 220 cm.
$Z_{\text{ext}}, Z_{\text{cjc}} < 105$ cm.

- $A_- + A_+$**-Schnitt** Die Pulsintegrale A_-, A_+ können zu groß werden und bei der Digitalisierung zu einem Sättigungseffekt und einem *Überlauf* (Overflow) führen. Daher wurde auch ein Schnitt auf $A_- + A_+$ eingeführt.
$A_- + A_+ < 5000$ [Digitalisierungen]

Die Schnitte müssen optimiert werden, um die bestmögliche Kalibration zu erzielen. Wie in Abschnitt 3.4 gezeigt, hat sich herausgestellt, daß die Kalibration viel Statistik benötigt, um zuverlässige Ergebnisse zu liefern. Um hier Zeit zu sparen, wurde zunächst eine Datei erzeugt, die die benötigten Daten enthält. Alle Schnitte, bis auf den $A_- + A_+$- und den Residuum-Schnitt, werden vor der Erzeugung der Datei angewendet. Der *Residuen-Schnitt* und der $A_- + A_+$-*Schnitt* werden bei der Erzeugung der Datei zunächst mit höheren Werten durchgeführt, um dann bei der Kalibration weiter verschärft zu werden.

Kalibration Die Kalibration kann nur für eine größere Anzahl von gesammelten Treffern für einen Draht durchgeführt werden, da sonst die Genauigkeit nicht hoch genug ist (siehe Abschnitt 3.4). Liegen für einen Draht nicht genügend Treffer vor, so wird keine Kalibration durchgeführt. Nach der Kalibration wird eine Datei mit 2×2640 Worten erzeugt, in das die 2×2640 Kalibrationskonstanten geschrieben werden. Wurde für einen Draht keine Kalibration durchgeführt, so werden die $L_{\text{eff}}/2$ und g_+/g_- aus der Standardkalibration 1997 in die Datei geschrieben. Die Verteilungen der drahtabhängigen Kalibrationskonstanten g_+/g_- und $L_{\text{eff}}/2$ - nach der Kalibration mit dem hier vorgestellten Algorithmus - befinden sich in Abbildung 4.8.

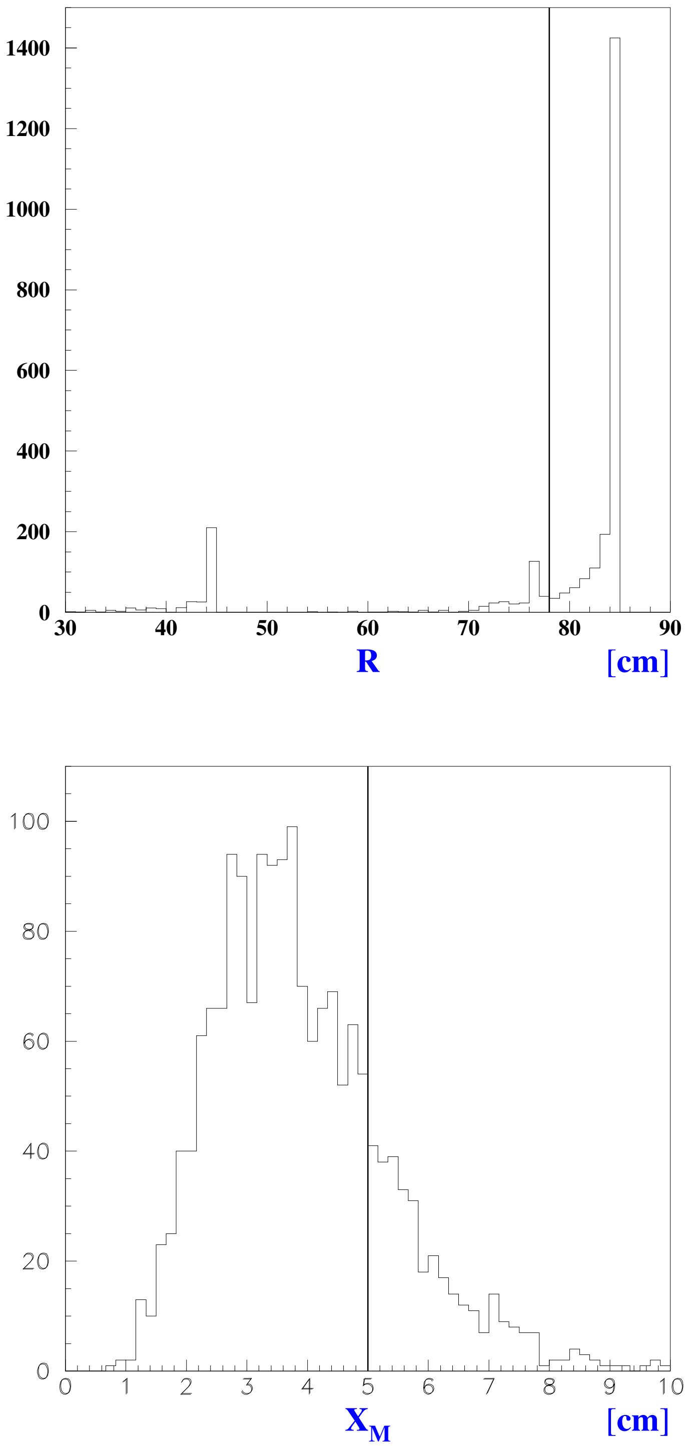
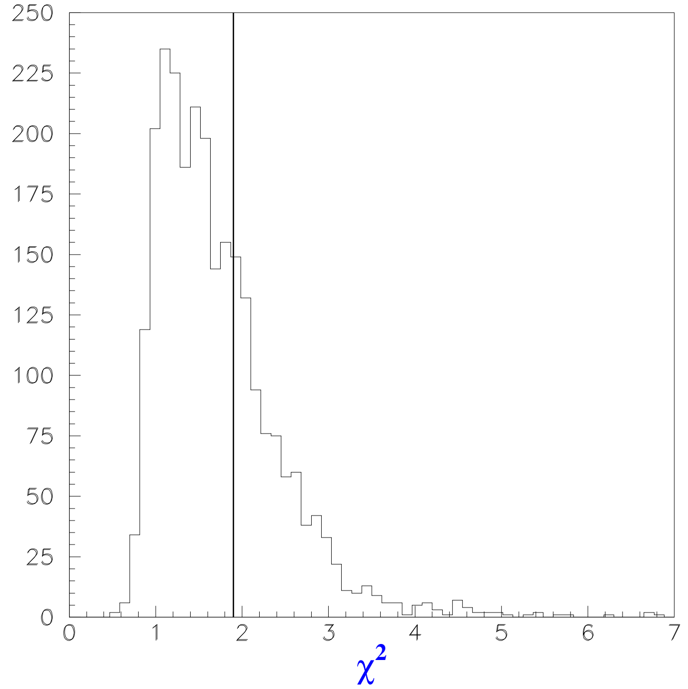


Abbildung 4.5: In dieser Abbildung sind die Verteilungen der Spurlängen und des Medians X_m dargestellt. Die senkrechten Linien deuten den Wert des Schnittes an. In X_m wurde Z_{cjc} mit der Standardkalibration 1997 berechnet. Dies gilt im übrigen für alle Abbildungen der Schnitte.



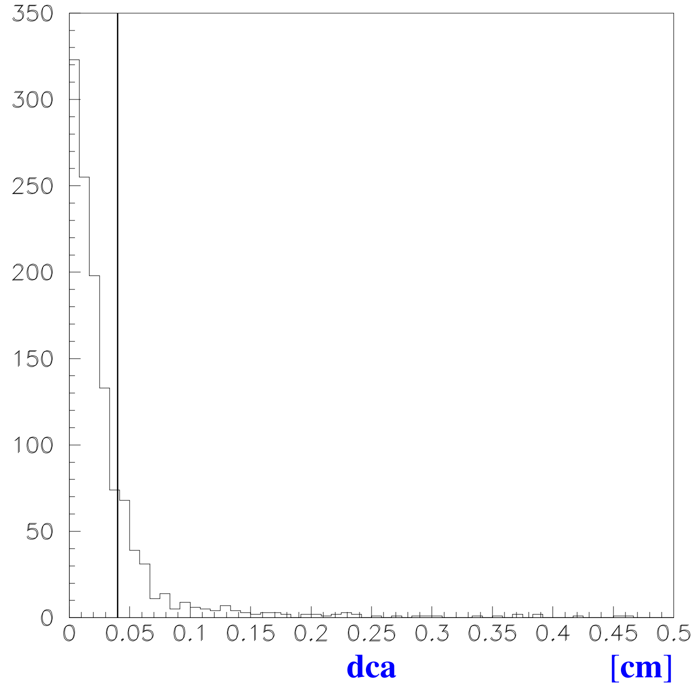


Abbildung 4.6: χ^2- und dca-Verteilung.

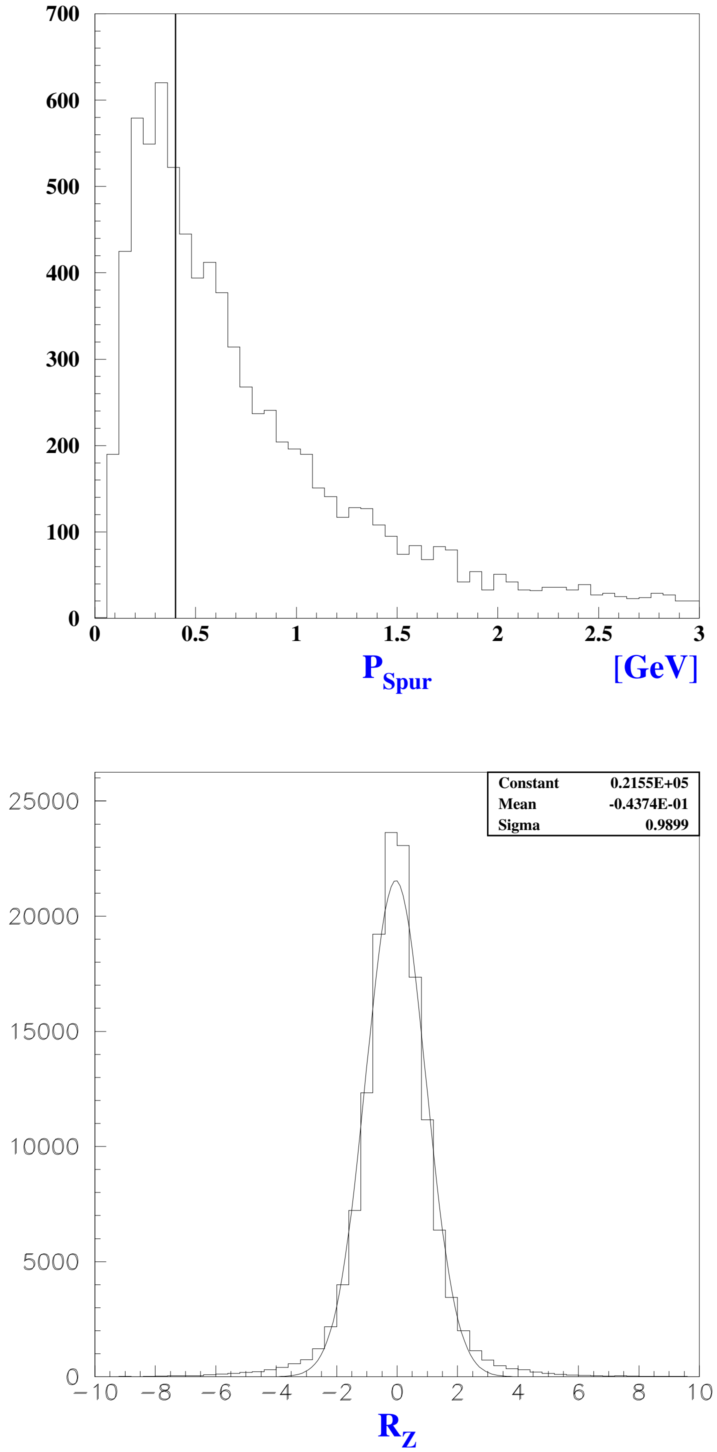


Abbildung 4.7: Impuls- und Residuenverteilung. Die Verteilungen in diesem Abschnitt haben nicht alle die gleiche Anzahl von Einträgen, da einige Verteilungen erst nach einem früheren Schnitt erzeugt werden.

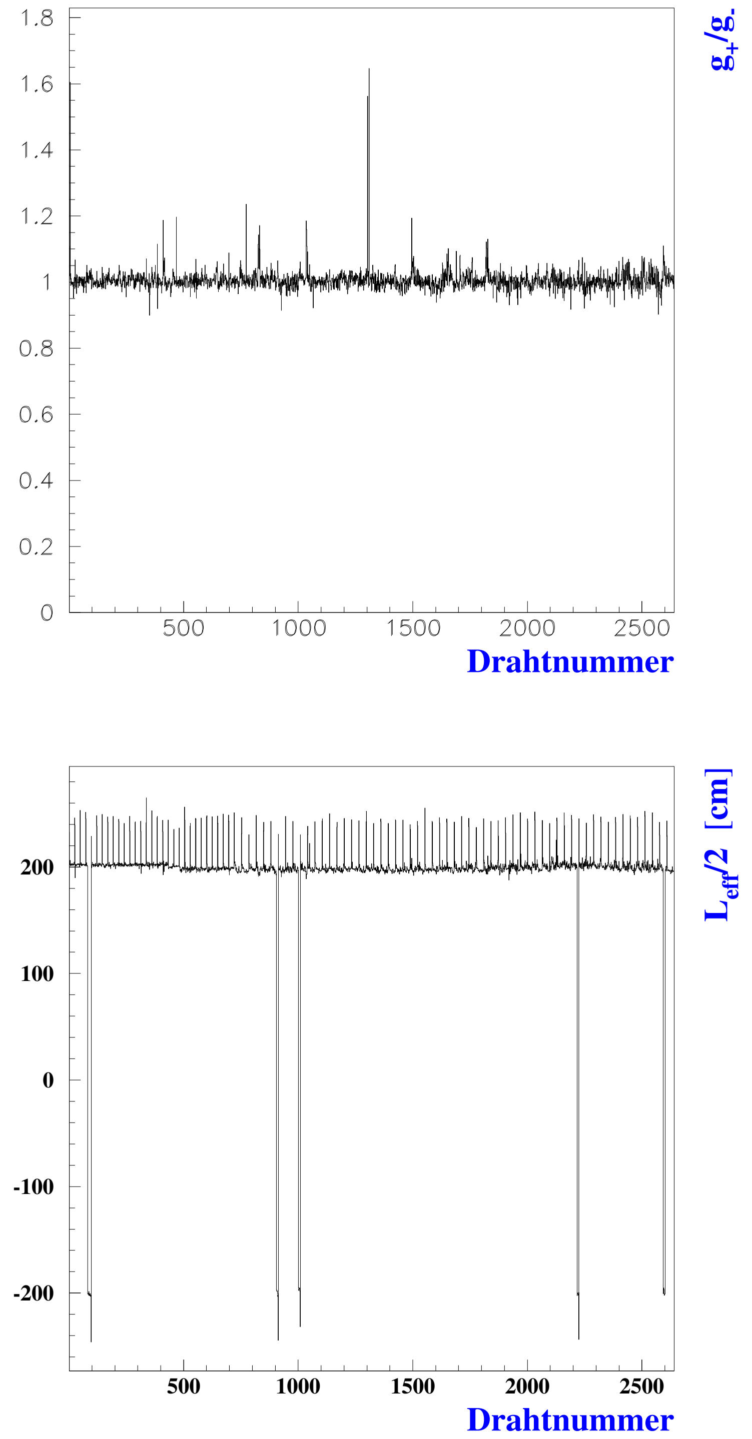


Abbildung 4.8: Kalibrationskonstanten g_+/g_- und $L_{\mathrm{eff}}/2$. Kalibration von '97er Daten mit der Polynomfitmethode.

4.3 Ladungsabhängigkeiten

Das Qualitätsmerkmal einer Z-Kalibration ist die Genauigkeit in Z. Die Größen Z_{ext} und Z_{cjc} müssen möglichst nahe beieinander liegen. Trägt man die Differenz $\Delta Z = Z_{\text{cjc}} - Z_{\text{ext}}$ gegen Z_{ext} auf, so erwartet man ein gerades, horizontales *Band* bei $\Delta Z = 0$.

In diesem Kapitel soll die in dieser Diplomarbeit vorgestellte Kalibrationsmethode mit der Standard Kalibration 1997 anhand von Abbildungen der Form, wie sie oben beschrieben wurde, verglichen werden. Im Folgenden soll die Darstellungsweise anhand von verschiedenen Abbildungen erläutert werden. Das Ergebnis sind die Abbildungen 4.14 für die Standardkalibration und 4.15 für die neue Kalibration.

- **1.** In Abbildung 4.9 ist $\Delta Z = Z_{\text{cjc}} - Z_{\text{ext}}$ gegen Z_{ext} für Z_{cjc} nach der Kalibraiton dargestellt. Der dargestellte Bereich entspricht den Bedingungen $|\Delta Z| < 30$ cm und $Z_{\text{ext}}, Z_{\text{cjc}} < 105$ cm.

- **2.** In einem weiteren Schritt kann man das Bild von ΔZ gegen Z_{ext} in Abhängigkeit der Summe der Pulsintegrale $A_- + A_+$ darstellen. Es muß also die Abbildung Z_{ext} gegen ΔZ für unterschiedliche Intervalle (oder *Fenster*) von $A_- + A_+$ erzeugt werden: Da die Verteilung (Bild 4.1) von $A_- + A_+$ eine asymmetrische Form hat, wird zunächst der Logarithmus der Summe des Pulsintegrals gebildet: Trägt man anstelle von $A_- + A_+$ den Logarithmus $\ln(A_- + A_+)$ auf, so nähert sich die Verteilung an eine Normalverteilung an. In Abbildung 4.10 ist dies dargestellt. Der Bereich $4 < \ln(A_- + A_+) < 9.4$ entspricht ungefähr dem Bereich $55 < A_- + A_+ < 12000$. Die eingezeichneten Linien stellen die Begrenzung der *Fenster* dar, in die das Z-Band (Abbildung 4.9) aufgeteilt und in denen es dargestellt werden soll. Alle Treffer zwischen zwei dieser Linien gehören in das gleiche $A_- + A_+$-*Fenster*. Die Fenster sind von 1 bis 8 numeriert.

- **3.** In Abbildung 4.11 sind die Bänder in den aufeinanderfolgenden $A_- + A_+$-Fenstern dargestellt. Die Breite eines Bandes hängt von der Summe der Pulsintegrale ab: mit steigendem $A_- + A_+$ wird das Band schmaler.

- **4.** Teilt man die Bänder in N Bereiche längs der X-Achse auf, und füllt diese Bereiche in eindimensionale Histogramme, so erhält man für jedes Fenster N Gaußverteilungen. In Abbildung 4.12 ist ein solcher Satz von N Verteilungen dargestellt.

- **5.** Die Verteilungen werden mit einer Gaußkurve angepaßt, und ihre Maxima (*Peaks*) werden in ein Histogramm pro Fenster gefüllt. Die resultierende Abbildung 4.13 zeigt den Verlauf der Maxima der Z-Bänder in aufeinanderfolgenden $A_- + A_+$-Fenstern. Durch eine Geradenanpassung wurde der Verlauf der Maxima in Abbildung 4.13 deutlich gemacht. Die Gerade kann mit zwei Parametern charakterisiert werden: $\Delta Z = a_0 + a_1 \cdot Z_{\textbf{ext}}$. Der Anpassungsparameter a_1 ist die *Steigung* des Bandes. Es ist sehr deutlich eine Abhängigkeit der Steigung des Z-Bandes von der Summe $A_- + A_+$ zu erkennen.

- **6.** Trägt man die *Steigung* der Z-Bänder aus den unterschiedlichen Fenstern gegen die Nummer des *Bins* (Numerierung aus Abbildung 4.10) auf, so erhält man Abbildung 4.15.

In der Abbildung 4.15 ist also die Steigung a_1 der Z-Bänder gegen die logarithmischen *Bins* von $A_- + A_+$ aufgetragen. In dem der Kalibration zugrundeliegenden Modell wird davon ausgegangen, daß $Z_{\rm cjc}$ und $Z_{\rm ext}$ nur um einen statistischen Fehler abweichen. Das hätte zur Folge, daß die Steigung für jedes Fenster null wäre. Die Steigung ist jedoch von null verschieden und weist zudem eine Abhängigkeit von $\ln(A_- + A_+)$ bzw. von $A_- + A_+$ auf. Dies bedeutet eine von $Z_{\rm ext}$ und $A_- + A_+$ abhängige systematische Verschiebung von $Z_{\rm cjc}$ relativ zu $Z_{\rm ext}$ (Die Position der Maxima von ΔZ ist von $Z_{\rm ext}$ abhängig). Die Steigung ist ein Maß für die Stärke der systematischen Verschiebung und ist abhängig von $A_- + A_+$. Die Parameter a_0 und a_1 stellen eine Parametrisierung der systematischen Verschiebung dar.

In Abbildung 4.14 sind die Steigungen a_1 gegen $\ln(A_- + A_+)$ nach der Standardkalibration 1997 dargestellt. Die beiden Abbildungen 4.14 und 4.15 sehen sich sehr ähnlich. Die in Abschnitt 3.3.2 vorgestellte Kalibrationsmethode ist also nicht in der Lage, diesen *Steigungs*-Effekt zu korrigieren. Der Grund hierfür ist die Tatsache, daß der Effekt nicht nur von $Z_{\rm ext}$ abhängt, sondern auch von der Summe der Amplituden $A_- + A_+$:

Die beobachteten Steigungen entstehen dadurch, daß eine der beiden Größen $Z_{\rm ext}$ und $Z_{\rm cjc}$ systematisch falsch bestimmt wird. In beiden Fällen entsteht eine Verschiebung, die von $Z_{\rm ext}$ abhängt. Eine Änderung des Kalibrationsparameters $L_{\rm eff}/2$ bewirkt aber genau so eine Verschiebung. Wenn die systematische Verschiebung nur von $Z_{\rm ext}$ abhängen würde, dann wäre die Kalibration in der Lage, durch eine entsprechende Anpassung des Parameters $L_{\rm eff}/2$ die Verschiebung aufzuheben. Es besteht jedoch eine zusätzliche Abhängigkeit von der Summe $A_- + A_+$, die sich darin äußert, daß die Steigungen in Abbildung 4.14 für unterschiedliche Fenster in $\ln(A_- + A_+)$ verschieden sind. Die Kalibration kann aber nicht amplitudenabhängig durchgeführt werden. Daher wird nur eine mittlere Steigung korrigiert, die der Steigung desjenigen Intervals in $A_- + A_+$ entspricht, das den *Schwerpunkt* der Daten bildet (hier im Bereich des 5. Fensters).

Es wurde auch durch den Vergleich von CJC-Information mit der Information aus dem Myonensystem eine systematische Verschiebung der CJC Koordinate relativ zu der entsprechenden Koordinate im instrumentierten Eisen beobachtet [16]. Für diesen Vergleich wurde für das Myonensystem eine aus der CJC extrapolierte Größe berechnet: Die Koordinate $Z_{\mu\text{-ext}}$ ist die aus der *CJC* extrapolierte Z Koordinate eines Treffers im instrumentierten Eisen und Z_μ ist die entsprechende Messung der Z-Koordinate im instrumentierten Eisen selbst. Weiter ist $\Delta Z_\mu = Z_{\mu\text{-ext}} - Z_\mu$. Im oberen Teil der Abbildung 4.17 ist die Differenz ΔZ_μ gegen den Wert von $Z_{\mu\text{-ext}}$ für die Standardkalibration 1997 aufgetragen, in der unteren Hälfte sind die gleichen Größen nach der Kalibration durch die Polynomfitmethode dargestellt. Hier erbringt die Kalibration eine Verringerung der Steigung um den Faktor 2. Bei der Erzeugung dieses Bildes wurden Spuren von kosmischen Myonen verwendet, deren Treffer in der CJC Pulsintegrale im Bereich von 100 bis 1000 Digitalisierungen erzeugten. Dieser $A_- + A_+$-Bereich entspricht den ersten sechs Unterteilungen in Abbildung 4.10.

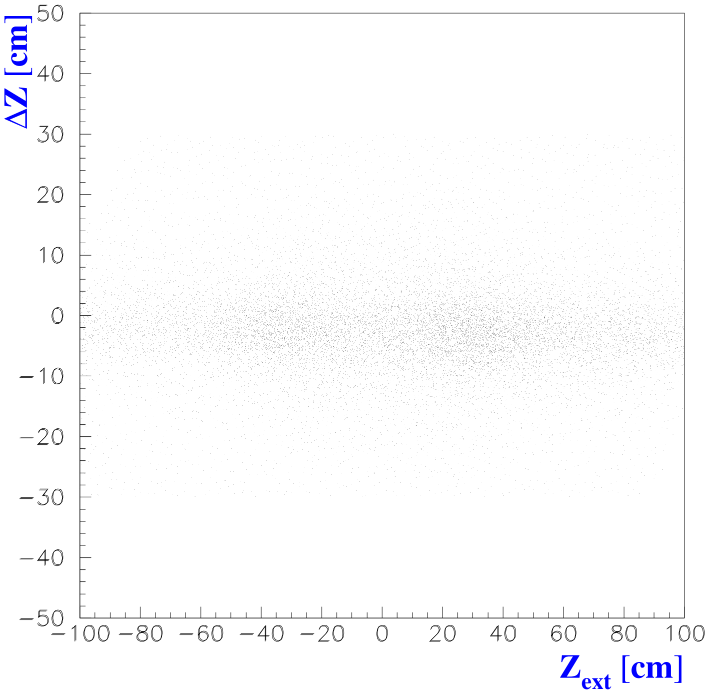


Abbildung 4.9: In dieser Abbildung ist ΔZ gegen Z_{ext} für alle Treffer aus der CJC dargestellt. Wie oben beschrieben wurde, ist die Differenz ΔZ mit den Parametern für Z_{cjc} nach der Kalibration (Polynomfit-Methode) gebildet worden.

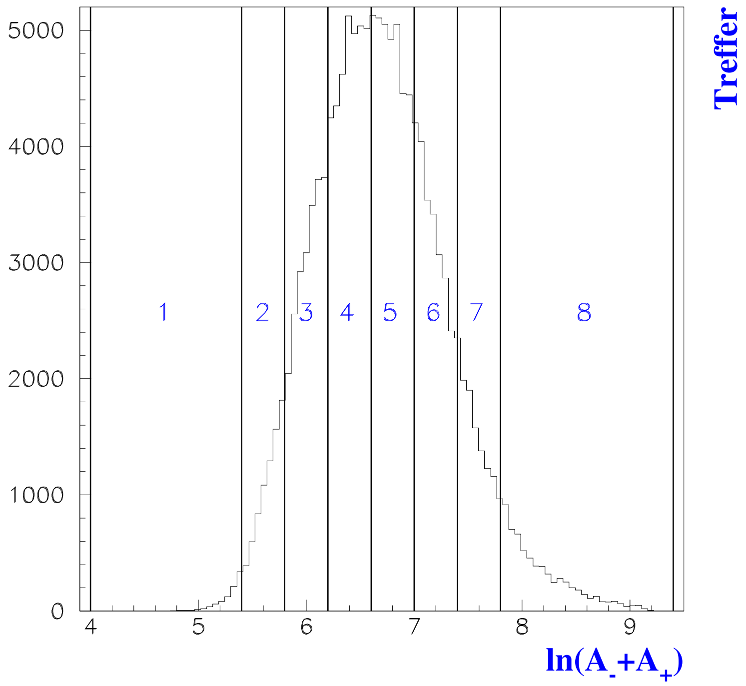


Abbildung 4.10: Logarithmische Darstellung der Summe der Pulsintegrale. Die senkrechten Linien teilen die Verteilung in die Bereiche auf, in die das Z-Band aus Abbildung 4.9 aufgeteilt wird (siehe Abbildung 4.13).

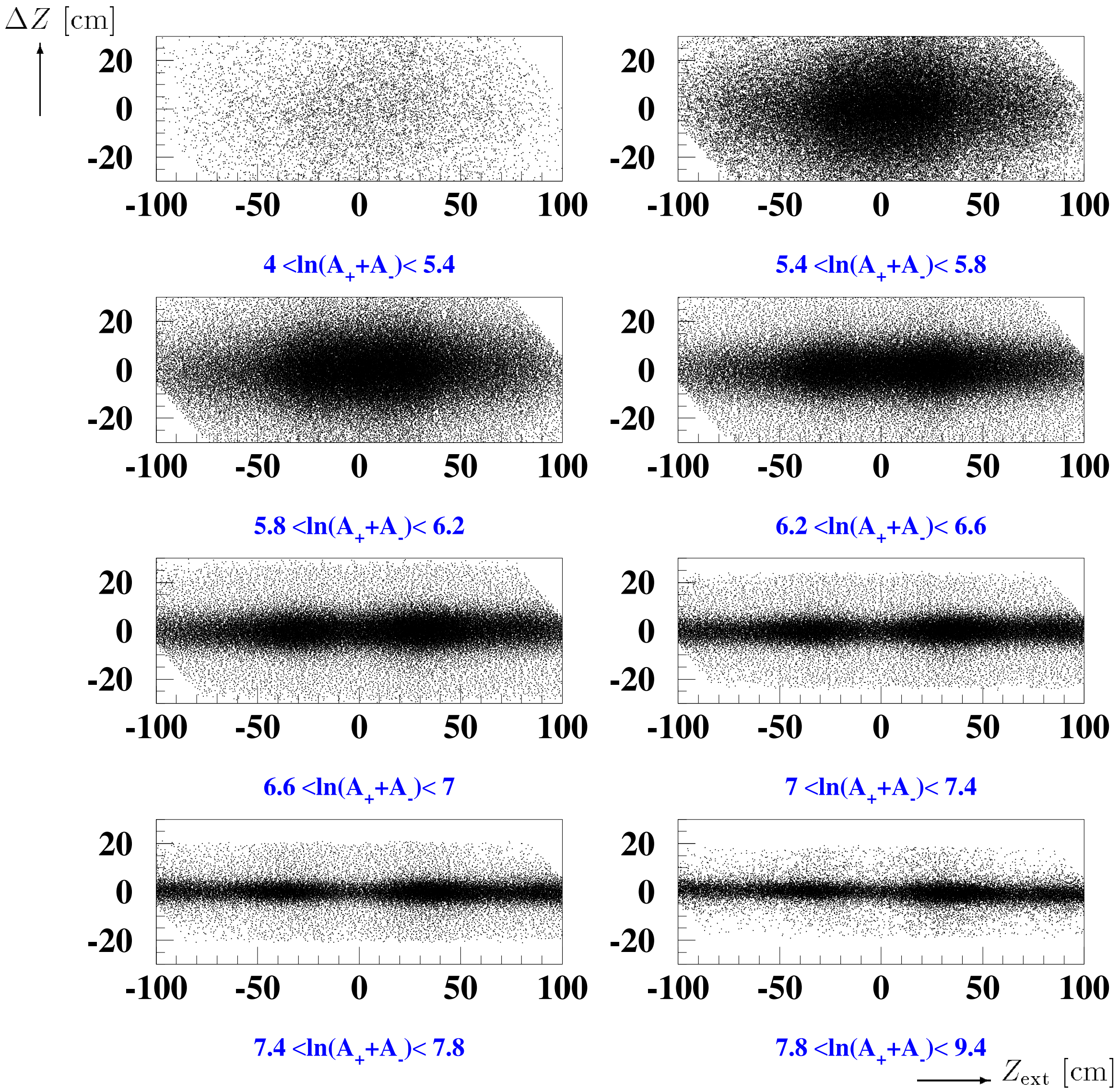


Abbildung 4.11: Die systematische Verschiebung von Z_{cjc} zu Z_{ext} ist in dieser Abbildung in $\ln A_- + A_+$-Fenstern dargestellt. Die Bereiche von $A_- + A_+$ entsprechen der Unterteilung in Abbildung 4.10 und stehen jeweils unter den Fenstern.

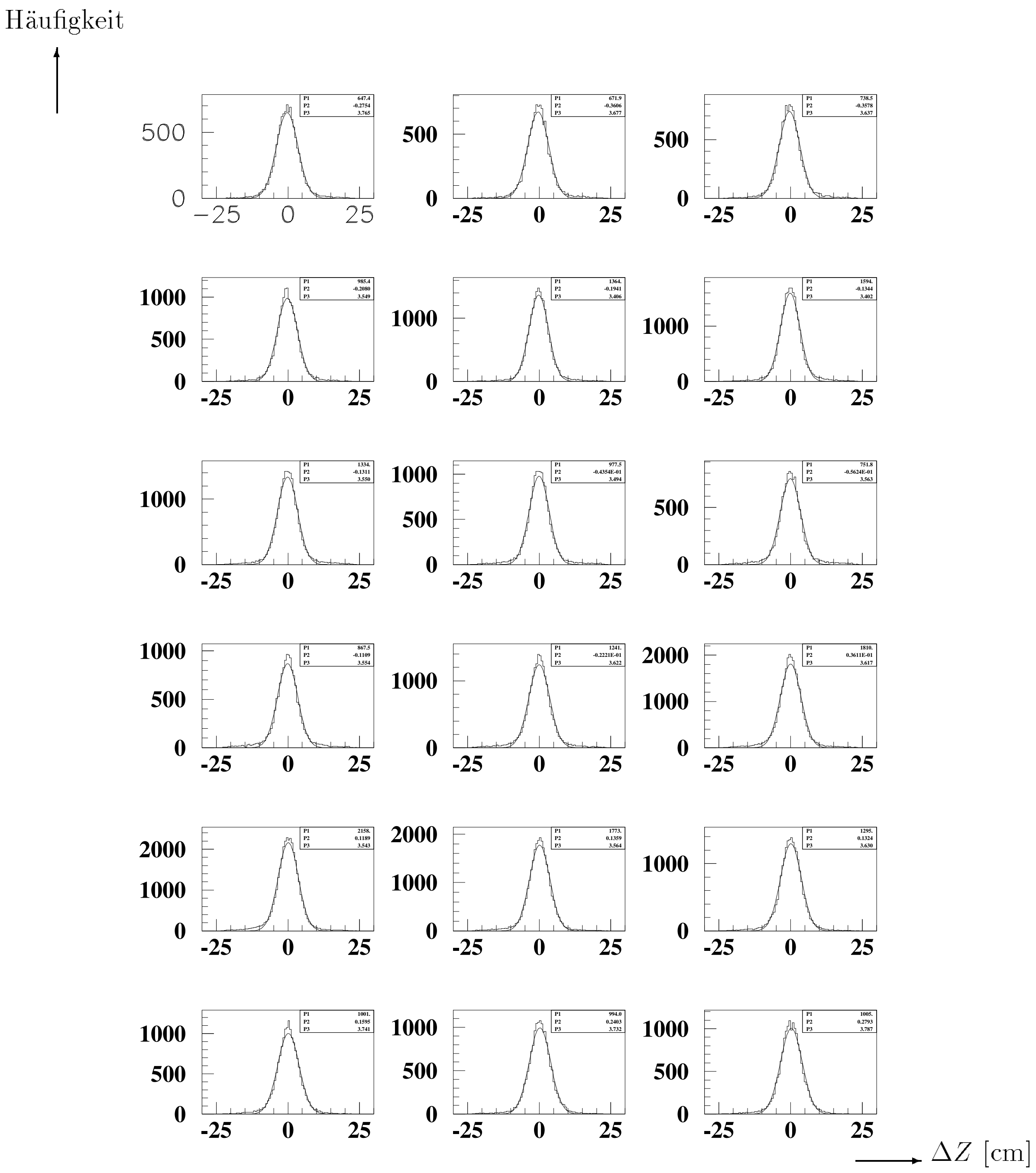


Abbildung 4.12: Die Abbildung von ΔZ gegen Z_{ext} aus den unterschiedlichen $A_- + A_+$-Intervallen (die Bereiche aus Bild 4.10) werden in $N = 18$ Z_{ext}-Bereiche geteilt und in eindimensionale Histogramme gefüllt. So erhält man Projektionen der Bänder auf die ΔZ-Achse. In dieser Abbildung ist ein Beispiel von 18 solcher Verteilungen dargestellt ($330 < A_- + A_+ < 492$). An jede Verteilung wurde eine Gaußkurve angepaßt. Das Maximum dieser Gaußkurve wird in Abhängigkeit der 18 Z_{ext}-Werte für jedes Fenster (Bereich) in $A_- + A_+$ in Histogramme gefüllt. Es ergeben sich Geraden, die den Verlauf der Maxima der Verteilung der Differenz ΔZ in den $A_- + A_+$-Fenstern wiedergeben. Dies ist in Abbildung 4.13 dargestellt.

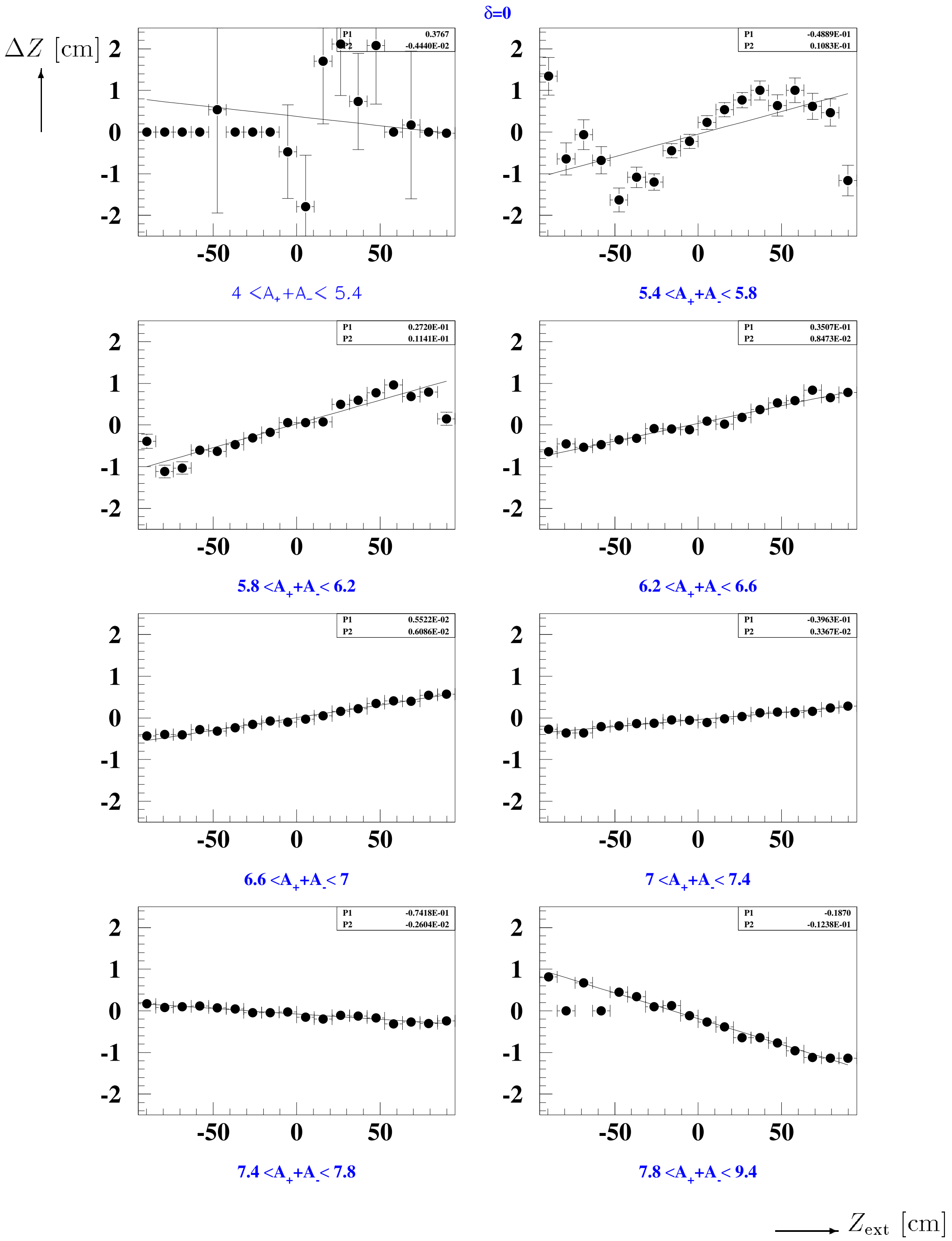


Abbildung 4.13: Diese Abbildung zeigt den Verlauf der Maxima der ΔZ-Verteilungen in Abhängigkeit von Z_{ext} für die Bereiche von $A_- + A_+$, die durch die Unterteilung in Abbildung 4.10 gegeben ist. Hierbei wurde die Größe Z_{cjc} mit den Parametern aus der Polynomfit-Methode berechnet. Die Steigungen der angepaßten Geraden werden in Abhängigkeit der $A_- + A_+$ -Bereiche in Histogramme gefüllt und ergeben dann Abbildung 4.15 bzw. 4.14.

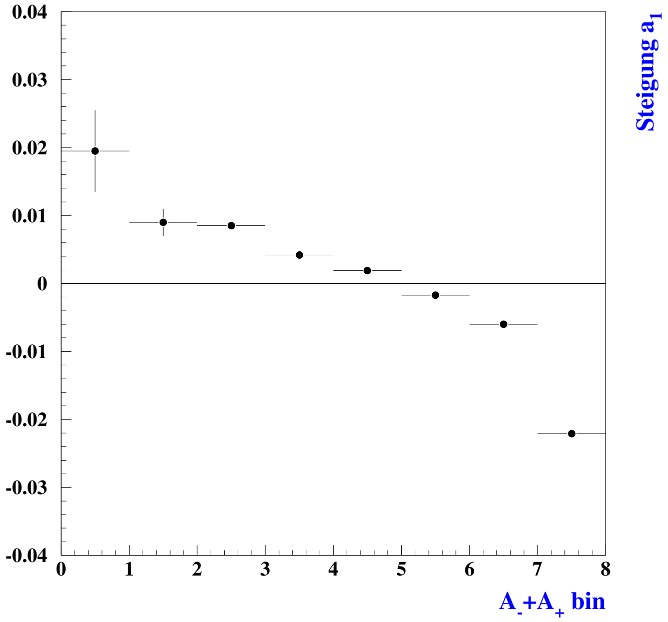


Abbildung 4.14: Die Steigungen der den Verlauf der ΔZ-Verteilungen beschreibenden Geraden sind hier gegen die Nr. der Unterteilung für die Standardkalibration 1997 dargestellt. Die Steigungen sind ein Maß für die Stärke der systematischen Verschiebung.

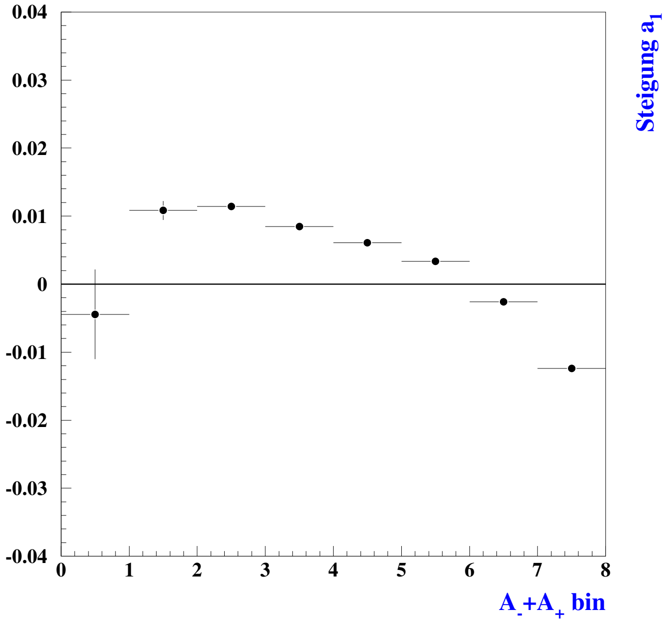


Abbildung 4.15: In dieser Abbildung wurden die Steigungen ebenfalls gegen die Nr. der Unterteilung aufgetragen. Hier wurden die Daten jedoch mit der Polynomfitmethode kalibriert.

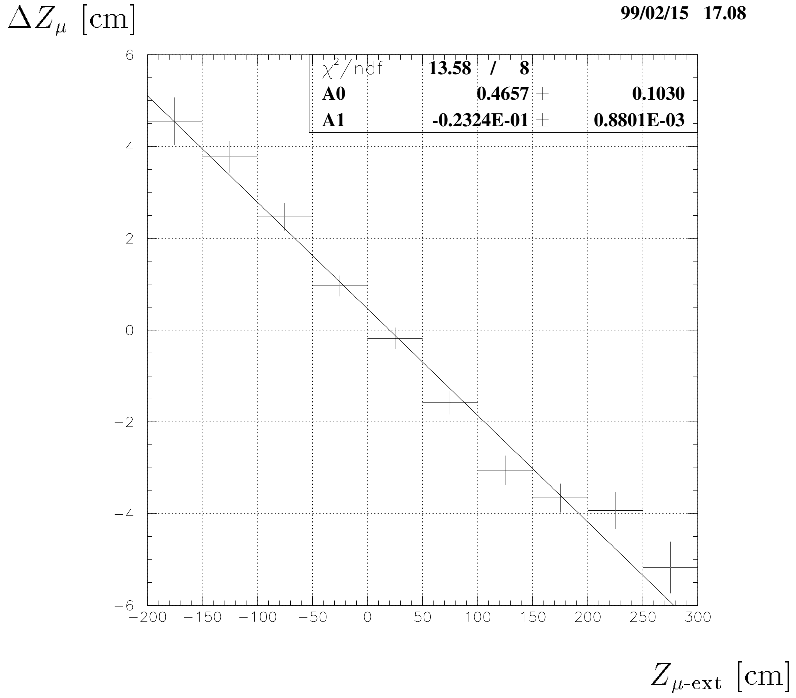


Abbildung 4.16: Vergleich der Z-Koordinate aus den Myonenkammern und der aus der CJC extrapolierten Koordinate $Z_{\mu\text{-ext}}$, wobei $\Delta Z_\mu = Z_{\mu\text{-ext}} - Z_\mu$Auch hier ist ein Steigungseffekt zu sehen. Die Steigung von 2% liegt in der Größenordnung der Steigung für kleine Pulsintegralsummen, aus dem Vergleich der CJC-Treffer mit den CST-extrapolierten Treffern [16].

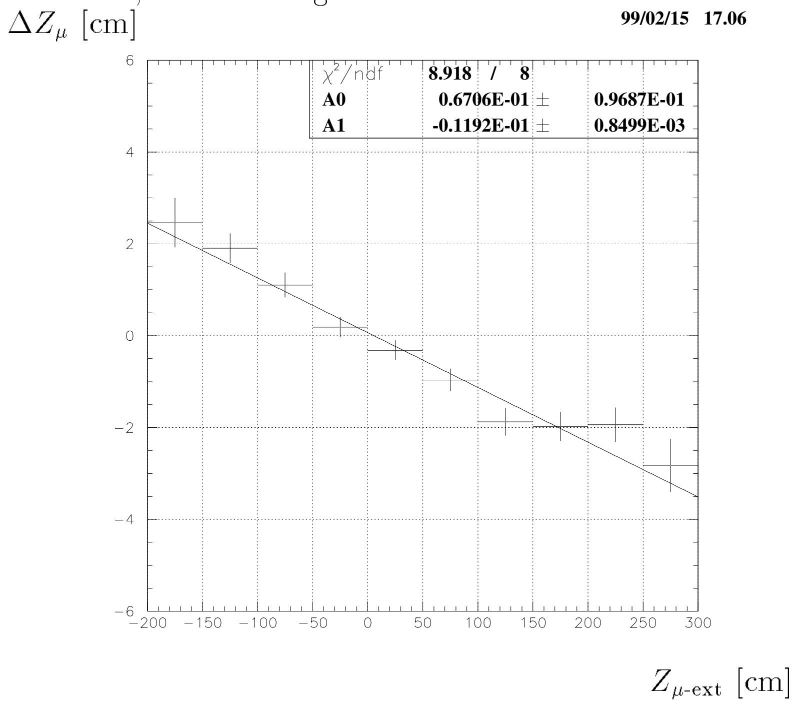


Abbildung 4.17: In dieser Abbildung sind die gleichen Größen wie in der Abbildung oben dargestellt. Der Unterschied besteht darin, daß hier eine Kalibration mit der Polynomfitmethode durchgeführt wurde.

4.4 Ladungskorrekturen

Der im vorangehenden Kapitel beschriebene, durch a_0 und a_1 beschriebene, systematische Effekt soll in diesem Kapitel durch eine Korrektur berücksichtigt werden.

Sieht man vom letzten Fenster ab, so ist der *Steigungs*-Effekt umso stärker, je kleiner $A_- + A_+$ ist. Um dies zu berücksichtigen, muß eine Korrektur angebracht werden, die für kleinere Pulsintegrale eine größere Wirkung erzielt. In den Bins der kleineren $A_- + A_+$ ist die Steigung positiv. Da $\Delta Z = Z_{\mathrm{cjc}} - Z_{\mathrm{ext}}$ ist, bedeutet dies, daß $|Z_{\mathrm{cjc}}|$ zu groß ist. Nach Gleichung 2.3 ist Z_{cjc} direkt proportional zu

$$Y = \frac{1 - \frac{A_-}{A_+}}{1 + \frac{A_-}{A_+}}$$

Eine Möglichkeit, Z_{cjc} zu verkleinern, ist also Y zu verkleinern. Die Tatsache, daß $|Z_{\mathrm{cjc}}|$ zu groß ist, bedeutet, daß Z_{cjc} immer *zu weit außen* liegt. Je weiter *außen* ein Z_{cjc}-Treffer liegt, desto stärker weicht A_-/A_+ von eins ab, weil dann A_- und A_+ stark voneinander abweichen (vgl. Abbildung 2.9).
Eine Möglichkeit, die systematische Verschiebung zu korrigieren, ist demnach, A_-/A_+ näher zu eins zu korrigieren. Dies ist durch die Addition eines konstanten Wertes auf A_- und A_+ zu bewerkstelligen. Es wird die folgende Substitution eingeführt:

$$\begin{aligned} A_- &\longrightarrow A_- + \delta \\ A_+ &\longrightarrow A_+ + \delta \end{aligned}$$

$(A_- + \delta)/(A_+ + \delta)$ liegt näher bei eins als A_-/A_+ . Die Größe Y wird dann zu:

$$\frac{1 - \frac{A_-}{A_+}}{1 + \frac{A_-}{A_+}} \longrightarrow \frac{1 - \frac{A_- + \delta}{A_+ + \delta}}{1 + \frac{A_- + \delta}{A_+ + \delta}}$$

Diese Korrektur erfüllt ebenfalls die Forderung, daß ihre Auswirkung im Mittel für große $A_- + A_+$ klein ist: ein konstanter Wert δ ist für große A_- und A_+ eine kleine relative Abweichung und hat daher kaum einen Effekt auf das Verhältnis A_-/A_+. Der Effekt ist allerdings nur im Mittel klein für große Pulsintegralsummen, denn ein großes $A_- + A_+$ kann auch zustande kommen, wenn A_- klein und A_+ groß ist. In diesem Fall ist die Auswirkung relativ groß.

Führt man eine Kalibration nach Einfügen einer Korrektur δ durch, so erhält man (analog zu 4.15) Abbildung 4.18. In dieser Abbildung sind die Steigungen a_1 (aus $\Delta Z = a_0 + a_1 \cdot Z_{\mathrm{ext}}$) für unterschiedliche Werte der Korrektur δ nach der Kalibration dargestellt. Die Korrektur verringert die Steigungen, ohne den Effekt ganz aufzuheben. Der Parameter a_0 kann auf die gleiche Art dargestellt werden. Dies ist in Abbildung 4.19 verwirklicht. Wie hier zu sehen ist, hat die Korrektur kaum einen Einfluß auf diese Verschiebung. Die Addition einer konstanten Größe auf die Pulsintegrale korrigiert die systematische Verschiebung also nur teilweise.

Trägt man wie im vorherigen Kapitel die Differenz ΔZ_μ gegen die aus der CJC extrapolierte Z-Koordinate im instrumentierten Eisen $Z_{\mu\text{-ext}}$ auf, nachdem die Korrektur $\delta = 3$

angebracht wurde, so erhält man Abbildung 4.20. Es ist gegenüber $\delta = 0$ in Abbildung 4.17 keine signifikante Veränderung zu sehen. Die δ-Korrektur hat keinen Einfluß auf die Abweichung zwischen $Z_{\mu\text{-ext}}$ und Z_{μ}.

Die Korrektur δ ist sehr klein gegen die Werte von $A_- + A_+$. Die Abweichungen der Ladungen von ihrem tatsächlichen Wert sind also nicht groß. Die Ursache für die Abweichungen von A_- und A_+ könnte sich im Qt-Algorithmus finden. In Frage käme ein systematischer Fehler bei der Bestimmung des Pedestalwertes (vgl. Abschnitt 2.5.3). Eine falsche Bestimmung des Pedestals, z.B. durch Rundungsfehler, hätte zur Folge, daß zu viel oder zu wenig von den Pulsintegralen abgezogen würde.

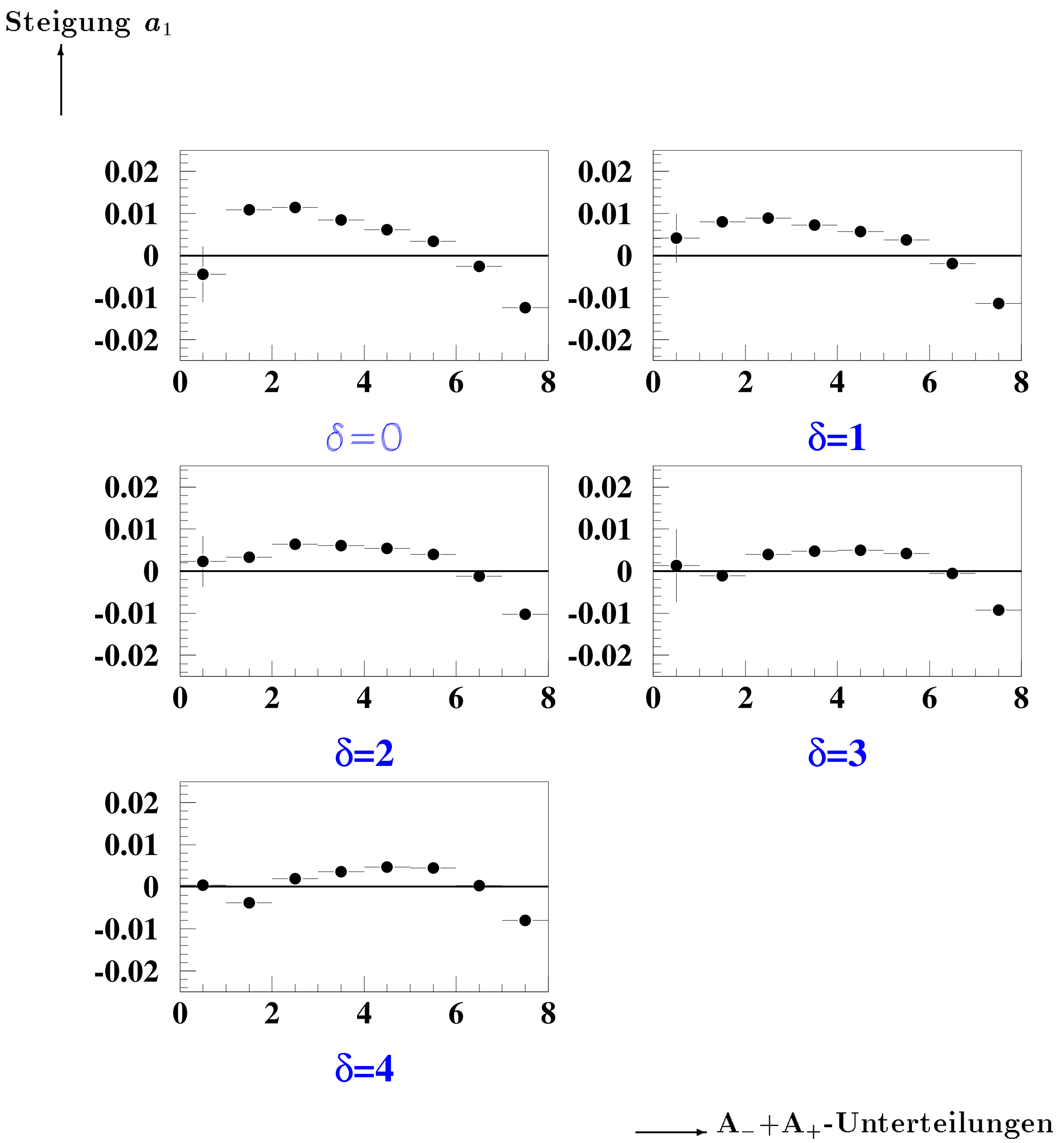


Abbildung 4.18: Die Steigungen a_1 der Z-Bänder sind hier gegen die Nummer der $A_{-}+A_{+}$-Fenster aus Abbildung 4.10 aufgetragen. Verschiedene Korrekturen von $\delta = 0$ (keine Korrektur) bis $\delta = 4$ wurden durchgeführt.

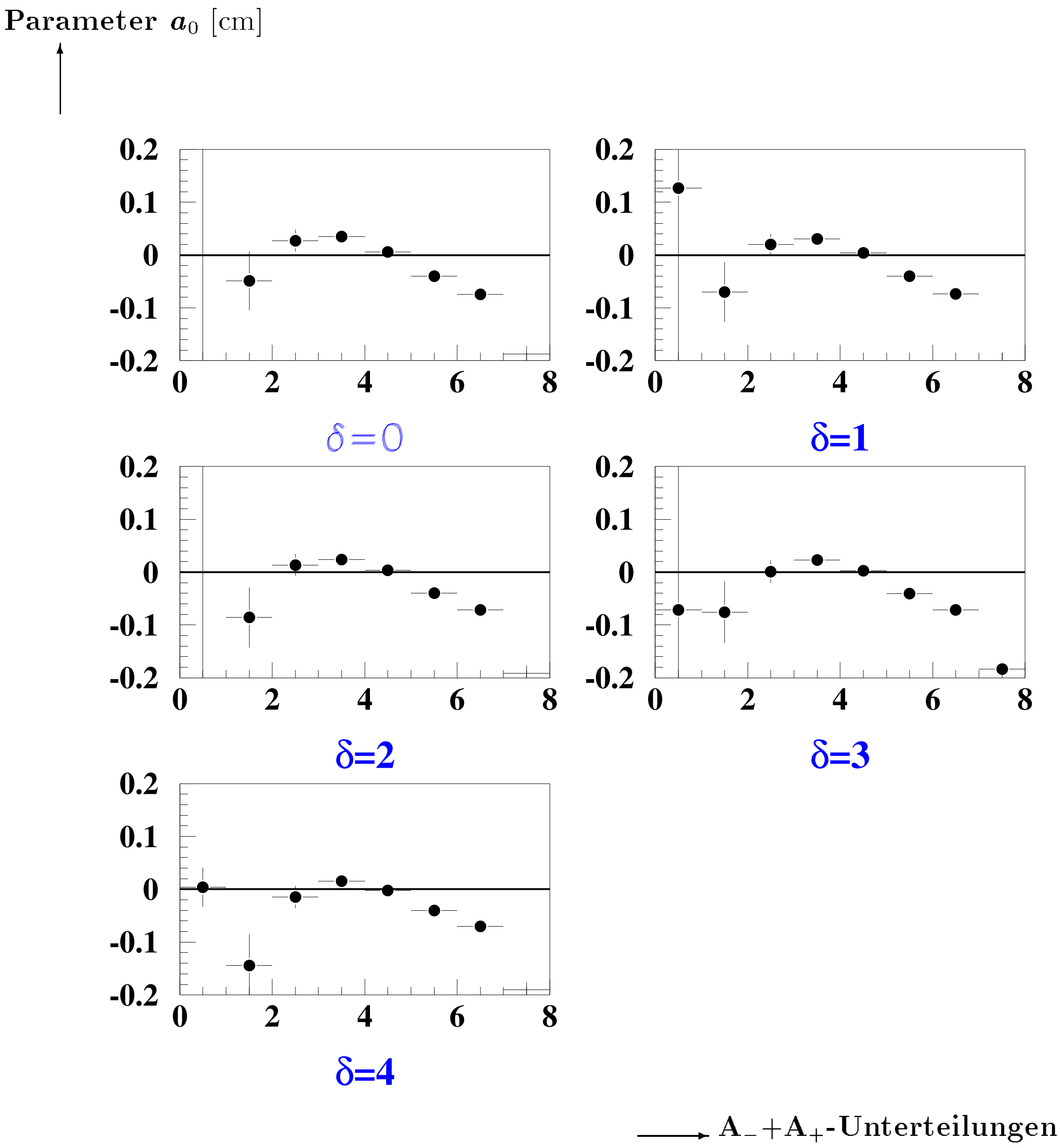


Abbildung 4.19: Der Parameter a_0 wird von der Korrektur kaum beeinflußt. Die δ-Korrektur beschreibt den systematischen Effekt also nicht vollständig.

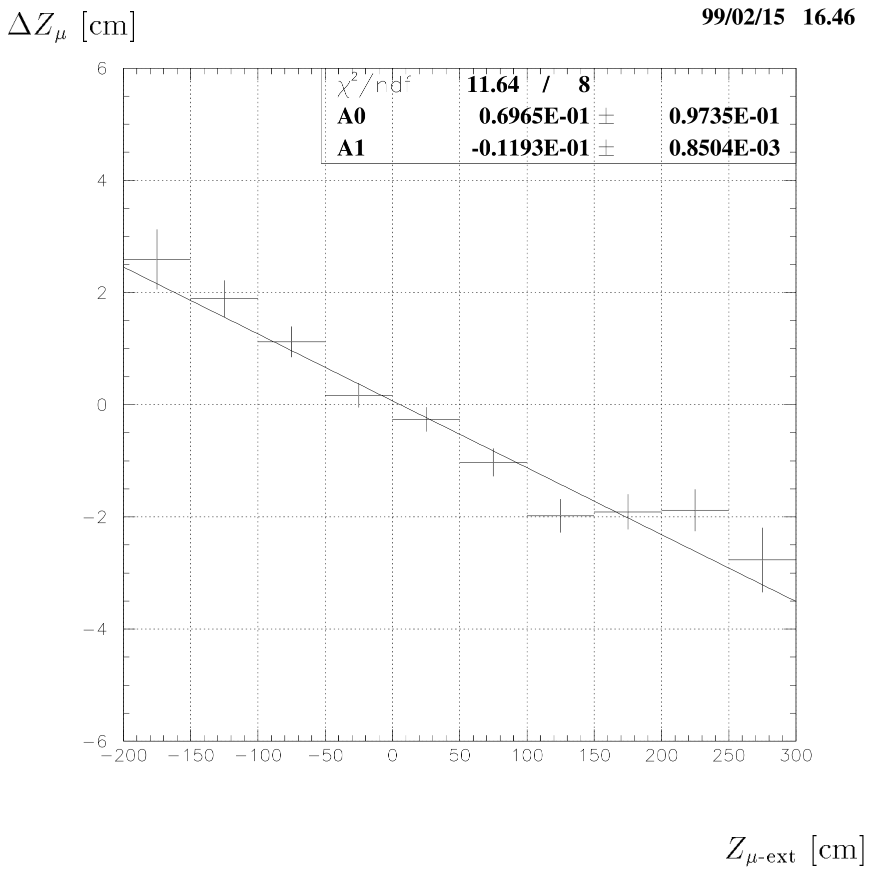


Abbildung 4.20: In dieser Abbildung ist die Differenz $\Delta Z_\mu = Z_{\mu\text{-ext}} - Z_\mu$ gegen die aus der CJC in das instrumentierte Eisen extrapolierte Z-Koordinate $Z_{\mu\text{-ext}}$ dargestellt. Es wurde eine Kalibration durchgeführt, und eine Korrektur von $\delta = 3$ angebracht. *Quelle:* [16]

4.5 Z-Auflösung

Die Z-Auflösung der zentralen Spurenkammer kann aus der Breite der Verteilung von $\Delta Z = Z_{\text{cjc}} - Z_{\text{ext}}$ gelesen werden. Die Breite hängt von der Summe der Amplituden $A_+ + A_-$ ab. In Abbildung 4.21 ist die ΔZ-Verteilung für verschiedene Pulsintegral-Intervalle dargestellt. Trägt man die Standardabweichung σ_Z dieser Verteilungen gegen die Summe der Pulsintegrale auf, so erhält man Abbildung 4.22. In dieser Abbildung sind drei unterschiedliche Kalibrationen eingetragen: die mit Vierecken gekennzeichneten Punkte stehen für die Standardkalibration 1997. Die Kreise stellen die Kalibration von 97er-Daten mit der Polynomfitmethode dar, und die durchgezogene Linie ist die Z-Auflösung, wie sie nach der Standardkalibration 1992 gemessen wurde. Die Standardkalibrationen 1997 und 1992 wurden mit dem gleichen Algorithmus durchgeführt. Die Verschlechterung der Auflösung von 1992 auf 1997 ist möglicherweise auf eine alterungsbedingte Verschlechterung der zentralen Spurenkammer zurückzuführen. Die Kurve für 1992 stammt allerdings von einer Parametrisierung der gemessenen Auflösung bei [4] und es ist nicht klar, ob bei der Messung das gleiche Verfahren wie in dieser Arbeit verwendet wurde. Diese Kurve soll daher weniger als quantitativer Vergleich mit dem heutigen Ergebnis herangezogen werden, sondern vielmehr einem qualitativen Vergleich dienen. Hierbei fällt auf, daß der Verlauf der in dieser Diplomarbeit durchgeführten Messung im Bereich großer $A_- + A_+$ nicht der Kurve von 1992 folgt, sondern eher einen leichten Anstieg aufweist. Es ist zu berücksichtigen, daß in diesem Bereich die Anzahl der Treffer deutlich geringer ist, als im vorderen Bereich. Der Anstieg ist trotzdem signifikant und bisher unverstanden.

Der in den Abschnitten 4.3 und 4.4 beschriebene Effekt muß bei der Betrachtung der Auflösung der CJC berücksichtigt werden. Vor der Korrektur beträgt der größte Wert für a_1 0.01. Nach der Korrektur verringert sich dieser Wert auf ca. 0.004. Diese Steigung verursacht am Rand der CJC einen Effekt von $0.004 \cdot 100$ cm $= 0.4$ cm. Die systematische Abweichung ist nach der Korrektur also nur noch etwa halb so stark, dennoch hat ein systematischer Effekt dieser Größenordung einen Einfluß auf die Z-Messung und die Auflösung der CJC. Der Parameter a_0 in Bild 4.19 auf Seite 80 muß ebenfalls berücksichtigt werden. Der größte Wert für diesen Parameter beträgt $a_0 = 0.15$ cm. Die Verschiebung a_0 hat nur einen geringen Einfluß auf die Z-Messung.

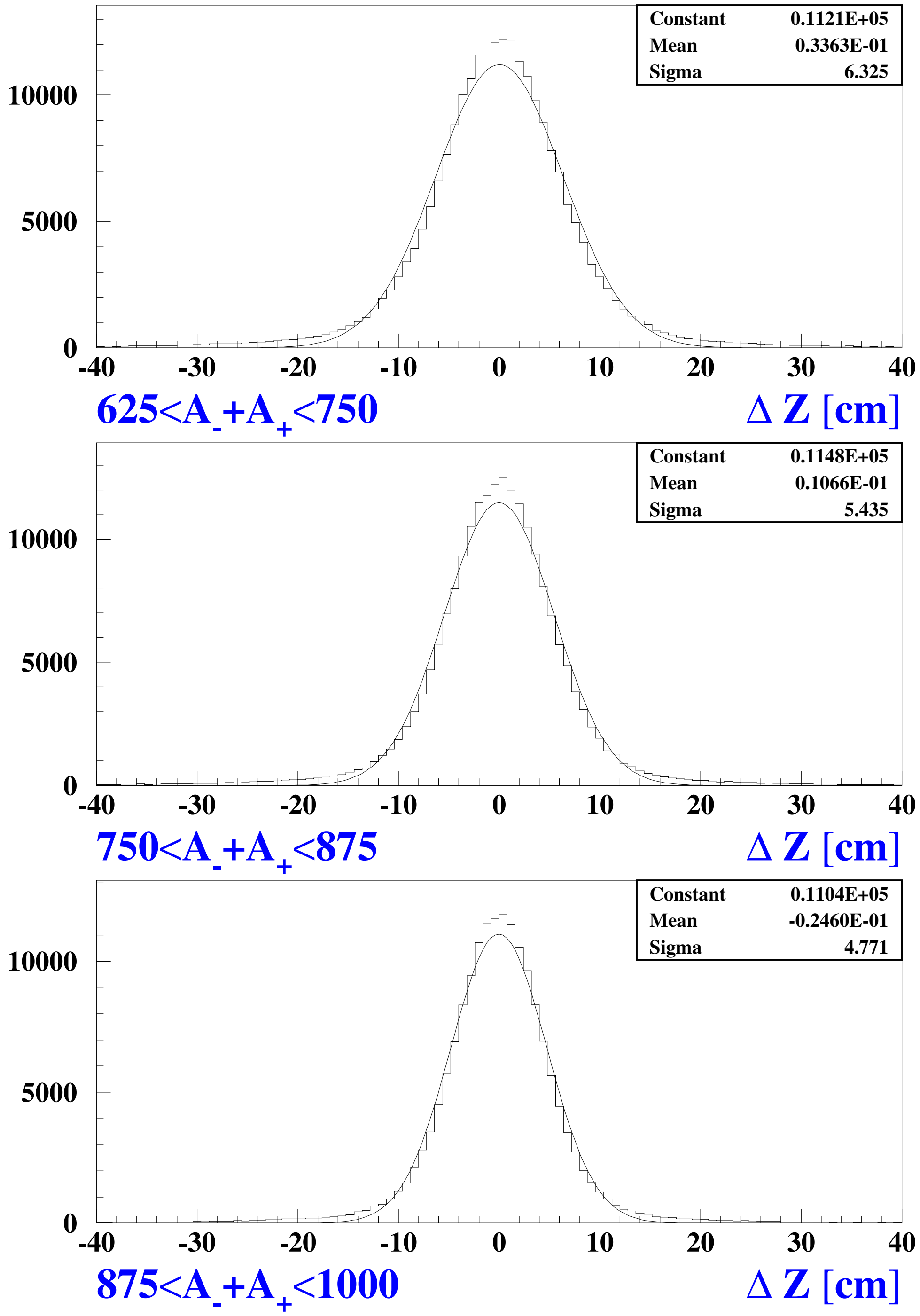


Abbildung 4.21: In dieser Abbildung sind die Verteilungen von ΔZ für unterschiedliche Bereiche von $A_- + A_+$ dargestellt. An die Verteilungen wird jeweils eine Gaußkurve angepaßt. Die Breite der Kurve gibt dann Aufschluß über die Z-Auflösung in dem jeweiligen $A_- + A_+$ -Bereich: die Standardabweichungen werden in Abhängigkeit der Summe der Amplituden $A_- + A_+$ in Abbildung 4.22 aufgetragen.

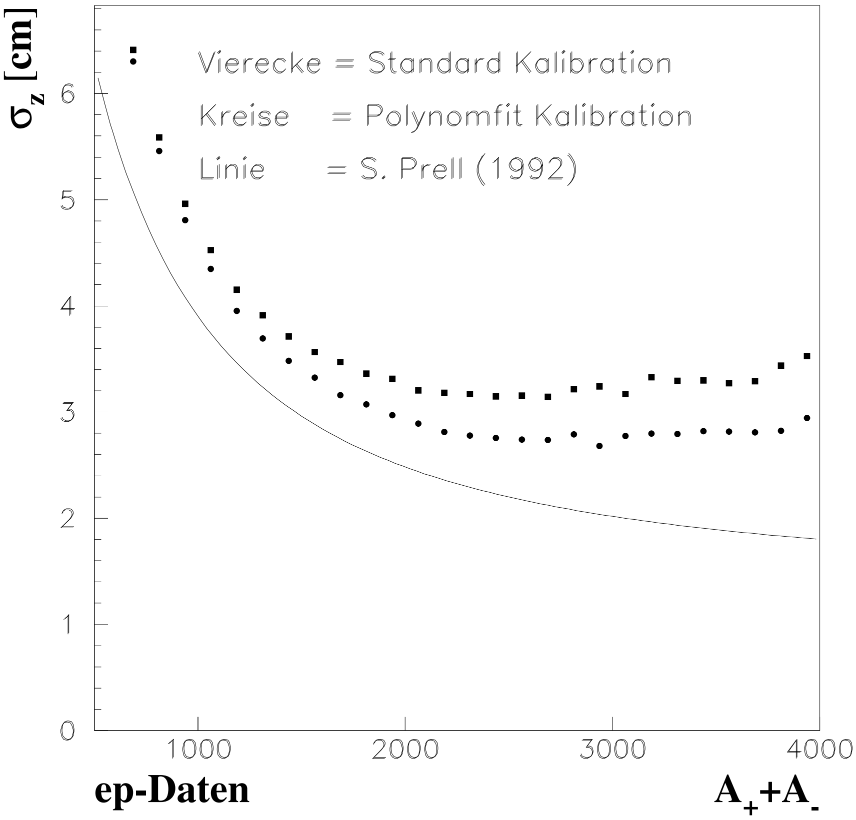


Abbildung 4.22: Z-Auflösung σ_Z der zentralen Spurenkammer bezüglich des zentralen Vertex Detektors

In Abbildung 4.23 ist die Differenz zwischen den Auflösungen aus der Standard '97er Kalibration und der Kalibration von '97er Daten durch die Polynomfitmethode aufgetragen. Diese Abbildung zeigt die Verbesserung der Z-Auflösung der zentralen Spurenkammer durch die in dieser Diplomarbeit vorgestellte Kalibrationsmethode in Abhängigkeit von der Amplitudensumme $A_- + A_+$.

Um zu beurteilen, wieviele Treffer pro Draht für eine zuverlässige Kalibration nötig sind, können wie in Abschnitt 3.3 die Parameter $L_{\text{eff}}/2$ und g_+/g_- und die Größe $Z_E = L_{\text{eff}}/2 \cdot (1 - 3g_+/g_-)/(1 + 3g_+/g_-)$ gegen die Anzahl der verwendeten Treffer aufgetragen werden. Z_E berechnet sich aus der Z-Bestimmungsgleichung 2.3 mit einem Verhältnis $A_-/A_+ = 3$, das einem Treffer auf der negativen Z Seite, am Rand der CJC entspricht. In Abbildung 4.24 sind diese Bilder dargestellt. Aus der Größe der Fluktuationen kann abgeschätzt werden, wieviele Treffer pro Draht für eine zuverlässige Kalibration benötigt werden: ab einer Trefferanzahl von 2000 sind die Fluktuationen nur noch im Bereich von 0.1%. Eine Kalibration muß also mit mindestens 2000 Treffern pro Draht durchgeführt werden.

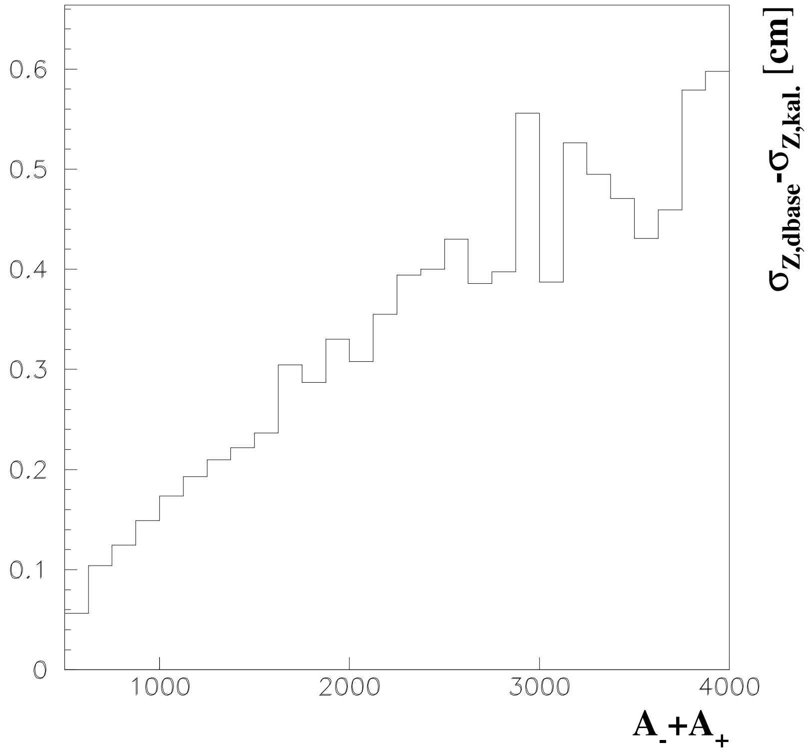


Abbildung 4.23: Verbesserung der Auflösung σ_Z der zentralen Spurenkammer CJC durch die Kalibration mit der Polynomfitmethode. Die Verbesserung ergibt sich aus der Differenz der Auflösung $\sigma_{\text{Z,dbase}}$ der Standardkalibration 1997, wie sie in der Datenbank (C1J8, Anhang D) steht und der Auflösung $\sigma_{\text{Z,kal}}$ aus der im Rahmen dieser Diplomarbeit entwickelten Kalibration.

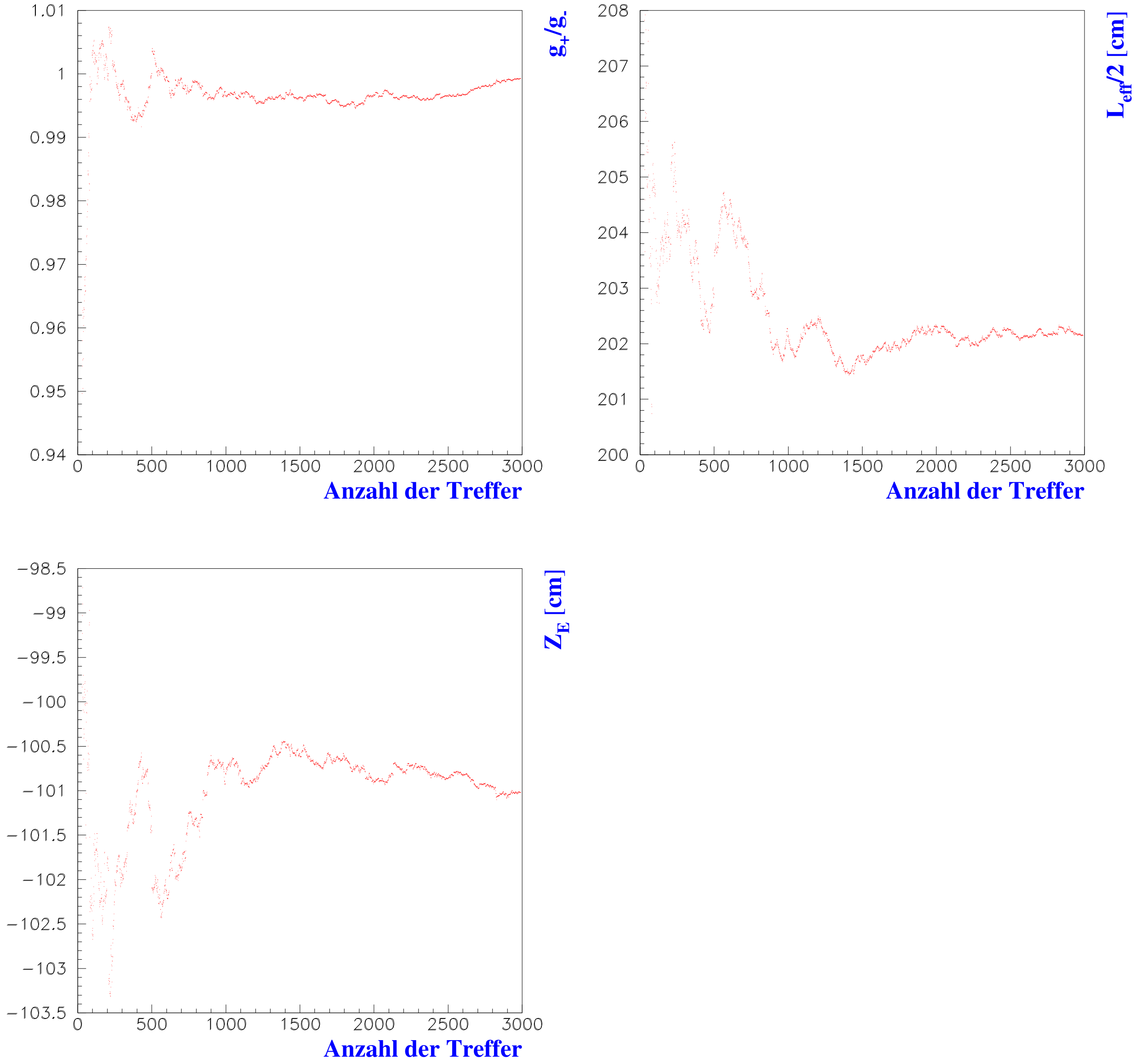


Abbildung 4.24: Alle Größen sind gegen die Anzahl der bei der Kalibraton verwendeten Statistik aufgetragen. Ab einer Trefferanzahl von ca. 2000 sind die Fluktuationen nur noch im Bereich von 0.1%. Um aus der Kalibration zuverlässige Werte für $L_{\mathrm{eff}}/2$ und g_+/g_- zu erhalten, müssen also mindestens 2000 Treffer pro Draht gesammelt werden.

5

Zusammenfassung

Das gesetzte Ziel dieser Diplomarbeit bestand darin, eine Methode zur Z-Kalibration der zentralen Spurenkammer des H1-Detektors zu entwickeln, die sich in zwei wesentlichen Punkten von der 1992 bei [4] entwickelten Kalibration unterscheiden sollte:

- Die Kalibration sollte ohne Iteration über die Daten möglich sein, um ein wiederholtes Einlesen der Daten, das sehr viel Zeit erfordert, zu vermeiden.

- Die Optimierung sollte durch eine Anpassung an den zentralen Vertex-Detektor CST erfolgen.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde ein Algorithmus entwickelt, der die beiden oben angeführten Punkte erfüllt. Somit kann bei der Z-Kalibration die hohe Auflösung des Silizium-Vertex-Detektors CST ausgenutzt werden, und es ist möglich, bereits während der Datenauslese die Z-Kalibrationskonstanten der CJC zu bestimmen (*online-Kalibration*). Es wurde ein Simulationsprogram entwickelt, das eine Überprüfung der Konvergenzeigenschaften des Kalibrationsalgorithmus ermöglichte. Der Algorithmus wurde auf 1997er Daten angewandt und ergab eine Verbesserung der Z-Auflösung der zentralen Spurenkammer CJC (Abbildung 4.22).

Bei den Untersuchungen zur Genauigkeit in Z wurde eine systematische Verschiebung der CJC-Z-Koordinate Z_{cjc} relativ zu der aus der CST extrapolierten Koordinate Z_{ext} beobachtet. Diese Verschiebung hängt von der Summe der Pulsintegrale ab. Durch eine Erhöhung der Pulsintegrale A_- und A_+ um einen relativ kleinen Wert ($\delta = 3$) gelang es, den Effekt teilweise zu korrigieren (vgl. Abbildung 4.18).

Eine systematische Verschiebung der CJC-Z-Koordinate wurde ebenfalls bei einem Vergleich mit der Z-Koordinate aus dem Myonensystem beobachtet [16]. Hier erbringt die im Rahmen dieser Diplomarbeit eingeführte Korrektur keine Verbesserung. Das der Korrektur zugrundeliegende Modell, das von einer Abweichung bei der Bestimmung der Pulsintegrale aufgrund eines systematischen Fehlers bei der Bestimmung des Pedestalwertes ausgeht, liefert noch keine vollständige Beschreibung der systematischen Verschiebung.

Anhang A

Bestimmung der Linearisierung $L(Z_{\mathbf{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)$

In diesem Abschnitt soll die Linearisierung $L(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)$ der Funktion $F(Z_{\text{ext}}, L_{\text{eff}}/2, g_+/g_-)$ (vgl. 3.5 auf Seite 44) ausführlicher behandelt werden. Der Ausgangspunkt ist die auf die Parameter L_s, g_s, ϵ und δ transformierte Funktion $F(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)$ (Gleichung 3.7 auf Seite 44):

$$Y = F(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta) = \frac{L_s(g_s-1) + \hat{z}(g_s+1) + \delta(\hat{z}+L_s) + \epsilon(g_s-1) + \epsilon\delta}{L_s(g_s+1) + \hat{z}(g_s-1) + \delta(\hat{z}+L_s) + \epsilon(g_s+1) + \epsilon\delta}$$

Der rechte Teil dieser Gleichung wird um ϵ und δ entwickelt. Es werden die Ableitungen

$$\frac{\partial}{\partial\delta} F(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta) \qquad \text{und} \qquad \frac{\partial}{\partial\epsilon} F(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)$$

gebildet und an den Stellen $\delta = 0$, $\epsilon = 0$:

$$\frac{\partial F(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)}{\partial\delta} \Big|_{\delta=0} = \frac{2(L_s^2 - Z_{\text{ext}}^2)}{((1+g_s)L_s + (g_s-1)Z_{\text{ext}})^2} \tag{A.1}$$

$$\frac{\partial F(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)}{\partial\epsilon} \Big|_{\epsilon=0} = -\frac{4 g_s Z_{\text{ext}}}{((1+g_s)L_s + (g_s-1)Z_{\text{ext}})^2} \tag{A.2}$$

Die Taylorentwicklung lautet:

$$\begin{aligned} F(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta) \approx L(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta) &= F(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta) \Big|_{\epsilon,\delta=0} \\ &+ \frac{\partial F(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)}{\partial\delta} \Big|_{\delta=0} \cdot\delta \\ &+ \frac{\partial F(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)}{\partial\epsilon} \Big|_{\epsilon=0} \cdot\epsilon \end{aligned}$$

Daraus folgt Gleichung 3.8:

$$L(Z_{\text{ext}}, L_{\text{eff}}/2, g_+/g_-) = B_0(Z_{\text{ext}}) + \delta B_1(Z_{\text{ext}}) + \epsilon B_2(Z_{\text{ext}})$$

Mit den von Z_{ext} , $L_{\text{eff}}/2$ und g_+/g_- abhängigen Größen

$$B_0(Z_{\text{ext}} = F(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta) \mid_{\epsilon,\delta=0}) = \frac{(g_s-1)L_s + (1+g_s)Z_{\text{ext}}}{(1+g_s)L_s + (g_s-1)Z_{\text{ext}}}$$

$$B_1(Z_{\text{ext}}) = \frac{\partial F(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)}{\partial \delta} \mid_{\delta=0} = \frac{2(L_s^2 - Z_{\text{ext}}^2)}{((1+g_s)L_s + (g_s-1)Z_{\text{ext}})^2}$$

$$B_2(Z_{\text{ext}}) = \frac{\partial F(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)}{\partial \epsilon} \mid_{\epsilon=0} = \frac{-4g_s Z_{\text{ext}}}{((1+g_s)L_s + (g_s-1)Z_{\text{ext}})^2}$$

Anhang B

Berechnung der Näherungswerte g_s und L_s

Bestimmung von g_+/g_- Das Polynom $P = a + bZ_{\text{ext}} + cZ_{\text{ext}}^2$ beschreibt die Daten $Y = F(Z_{\text{ext}}, L_{\text{eff}}/2, g_+/g_-)$ sehr gut. $F(Z_{\text{ext}}, L_{\text{eff}}/2, g_+/g_-)$ ist die Funktion 3.5 auf Seite 44. Es gilt also:

$$a + bZ_{\text{ext}} + cZ_{\text{ext}}^2 = \frac{1 - \left(\frac{L_{\text{eff}}/2 - Z_{\text{ext}}}{L_{\text{eff}}/2 + Z_{\text{ext}}}\right)\frac{g_-}{g_+}}{1 + \frac{L_{\text{eff}}/2 - Z_{\text{ext}}}{L_{\text{eff}}/2 + Z_{\text{ext}}}\frac{g_-}{g_+}} \tag{B.1}$$

Hieraus ergibt sich für $Z_{\text{ext}} = 0$ sofort g_+/g_-:

$$\boxed{\frac{g_+}{g_-} = \frac{1+a}{1-a} \qquad \text{(B.2)}}$$

Bestimmung der halben effektiven Länge $L_{\text{eff}}/2$ Aus B.1 folgt:

$$P + P\frac{L_{\text{eff}}/2 - Z_{\text{ext}}}{L_{\text{eff}}/2 + Z_{\text{ext}}}\frac{g_-}{g_+} = 1 - \frac{L_{\text{eff}}/2 - Z_{\text{ext}}}{L_{\text{eff}}/2 + Z_{\text{ext}}}\frac{g_-}{g_+}$$

$\Leftrightarrow$

$$1 - P = (P+1) - \frac{L_{\text{eff}}/2 - Z_{\text{ext}}}{L_{\text{eff}}/2 + Z_{\text{ext}}}\frac{g_-}{g_+}$$

$\Leftrightarrow$

$$\frac{1-P}{1+P}\frac{g_+}{g_-} = 1 - \frac{L_{\text{eff}}/2 - Z_{\text{ext}}}{L_{\text{eff}}/2 + Z_{\text{ext}}}$$

$\Leftrightarrow$

$$\left(\frac{1-P}{1+P}\frac{g_+}{g_-}\right)L_{\text{eff}}/2 + \left(\frac{1-P}{1+P}\frac{g_+}{g_-}\right)Z_{\text{ext}} = L_{\text{eff}}/2 - Z_{\text{ext}}$$

$\Leftrightarrow$

$$\left(\frac{1-P}{1+P}\frac{g_+}{g_-} - 1\right)L_{\text{eff}}/2 = Z_{\text{ext}}\left(-1 - \frac{1-P}{1+P}\frac{g+}{g_-}\right)$$

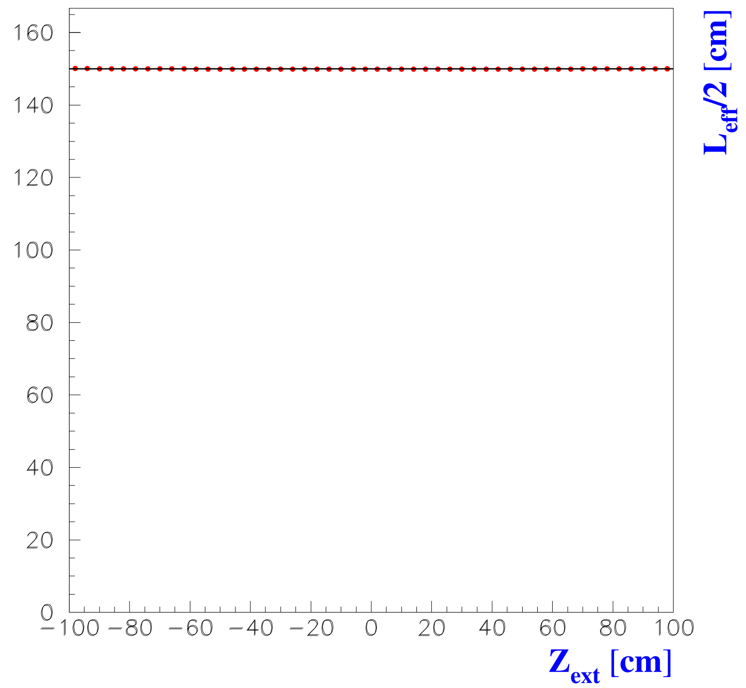
$\Leftrightarrow$

$$\boxed{\frac{L_{\text{eff}}}{2} = Z_{\text{ext}} \cdot \frac{\frac{1-P}{1+P}\frac{g_+}{g_-} + 1}{\frac{1-P}{1+P}\frac{g_+}{g_-} - 1} \qquad \text{(B.3)}}$$

$L_{\text{eff}}/2$ ist kaum von Z_{ext} abhängig, da P auch eine Z_{ext}-Abhängigkeit beinhaltet. Die Abhängigkeit von Z_{ext} bereitet allerdings das Problem, daß nicht von vornherein klar ist, welcher Wert für Z_{ext} eingesetzt werden soll, um das beste $L_{\text{eff}}/2$ zu erhalten. Es hat sich in der Praxis erwiesen, daß die Nullstellen $L_{2,0}^-$ und $L_{2,0}^+$ des zweiten Legendrepolynoms, skaliert auf den Wertebereich von Z_{ext}, die besten Werte für die Kalibrationskonstante liefern:

$$\frac{L_{\text{eff}}}{2} = \frac{L_{\text{eff}}/2(Z_{\text{ext}} = L_{2,0}^-) + L_{\text{eff}}/2(Z_{\text{ext}} = L_{2,0}^+)}{2}$$

In Abbildung B.1 ist der Verlauf von B.3 gegen Z_{ext} dargestellt. Hier wird klar, daß, bei stark von eins abweichenden Werten des relativen Verstärkungsfaktors, die effektive Länge stärker von Z_{ext} abhängt: $L_{\text{eff}}/2$ ist nicht über den gesamten Bereich von Z_{ext} konstant. Bei der Bestimmung der Drahtparameter g_+/g_- und $L_{\text{eff}}/2$ durch die Gleichungen B.3 und B.2 wird nicht der gesamte Z-Bereich ausgenutzt, sondern nur an einer bzw. zwei Z-Stellen ein Wert ermittelt. Die Genauigkeit der so berechneten Parameter ist noch nicht zufriedenstellend. Daher werden diese Parameter als Startwerte L_s bzw. g_s für die weitere Kalibraiton gesetzt (Kapitel 3.3.2).



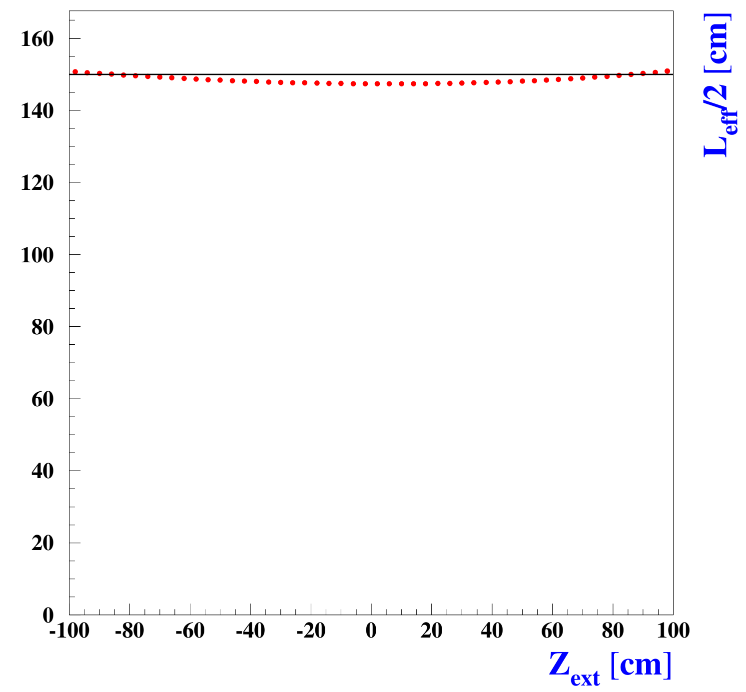


Abbildung B.1: In dieser Abbildung ist der Näherungswert L_s gegen Z_{ext} aufgetrage. Die Kreise stehen für L_s, wie es aus der Funktion (B.3) berechnet werden kann. Die durchgezogene Linie ist der *wahre* Wert für $L_{\text{eff}}/2$=150 aus der Simulation. Oben ist g_+/g_- in der Simulation gleich 0.9 gesetzt und unten ist $g_+/g_- = 1.6$. Die aus Gleichung B.3 gewonnene effektive Länge hängt bei stark von eins abweichendem g_+/g_- von Z_{ext} ab.

Anhang C

Hessematrix zur Anpassung $P = L(Z_{\mathbf{ext}}, L_S, g_S, \epsilon, \delta)$

Gleichung 3.14 stellt im Rahmen der Methode der kleinsten Quadrate das Modell für die *wahren* Werte des Polynoms P dar. Bei dieser Anpassung von $L = L(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)$ und P ist die Information in den Polynomparametern a, b, und c enthalten. Z_{ext} enthält keine Information und kann daher generiert werden. Es werden N Werte für Z_{ext} generiert, aus denen $i = 1...N$ *Meßwerte* P_i und Modellwerte $L(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)$ berechnet werden. $\Delta y_i = P_i - L(Z_{\text{ext}}, L_s, g_s, \epsilon, \delta)$ sei das Residuum des Meßwertes i. Die zu bestimmenden Parameter sind δ und ϵ. Der Residuenvektor Δy umfaßt die N Meßwerte mit der Kovarianzmatrix C. Die Bedingung der kleinsten Quadrate lautet dann:

$$S = \Delta y^T V^{-1} \Delta y = \text{min!}$$

Diese Bedingung führt auf ein lineares Gleichungssystem, das mit Hilfe der Hessematrix H in Matrixschreibweise dargestellt werden kann:

$$H = \sum_i \begin{pmatrix} B_1^2 & B_1 B_2 \\ B_2 B_1 & B_2^2 \end{pmatrix}_i$$

Die Größen B_1 und B_2 wurden im Anhang A hergeleitet. Sie werden für jeden Meßwert i berechnet. Der Lösungsvektor $\gamma = (\delta, \epsilon)^T$ berechnet sich aus

$$A = \sum_i \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix}_i V \Delta y$$

zu:

$$\gamma = H^{-1} A$$

Die Matrix $C = H^{-1}$ ist die Kovarianzmatrix.

Anhang D

Liste der Bänke

Column	Name	Format	Min.	Max.	comments
1	NWIRE	I	0	2639	wire no.
2	DL	I	0	64000	drift time (data: 1/50 FADC-Clock) (MC: .001 cm)
3	Q_+	I	0	32768	charge on +z wire end
4	Q_-	I	0	32768	charge on -z wire end
5	Flag1	I	0	65535	0 for MC bits 0- 3: itegration interval bits 4- 7: hit nr. within cluster bits 8-15: drift time diff. $(t_+ - t_-)$ (unit = 1/50 FADC clock)
6	Flag2	I	0	65535	0 for MC
					bits 0- 6: rel. slope of leading edge norm. to amplitude (unit=1/128) bit 7: label for 50% timing bits 8-11: pedestal flags bits 12-14: Qt analysis flags bit 15: label for kept raw data

Tabelle D.1: CJC-Treffer Bank CRJE

Column	Name	Format	Min.	Max.	comments
1	R	F	0.	$+\infty$	R coordinate (cm)
2	Phi	F	0.	2π	Azimuth angle (rad)
3	Z	F	$-\infty$	$+\infty$	Z coordinate (cm)
4	dR	F	0.	$+\infty$	error in R (perp. to HL)
5	dRPhi	F	0.	$+\infty$	error in RPhi (along HL)
6	dZ	F	0.	$+\infty$	error in Z
8	Halfla	I	0	63	Half-ladder number
9	RPhiNo	I	1	640	cluster counter per HL, p-side
10	ZNo	I	1	640	cluster counter per HL, n-side
11	Amb	I	1	3	3,2,1 for in.,mid.,out., in z
14	Ghost	I	0	1	flag=1 if ghost hit, 0 otherw.
Column	**REL.name**	**Type**	**INT.bank (COL)**	-	**Comments**
7	CJKR	DMT1			Ptr to linked CJxx track
12	CVLH	DMT1			Ptr to p-side clust. in CVLH
13	CVLH	DMT1	ICVL		Ptr to n-side clust. in CVLH

Tabelle D.2: Central Vertex space point bank CVSP

Column	Name	Format	Min.	Max.	comments
1	T0	F	$-\infty$	$+\infty$	time offs. (1/50 FADC clk)
2	DT	F	$-\infty$	$+\infty$	av. time difference of wire ends
3	g_+/g_-	F	0	$+\infty$	relative gain
4	f= $1/g_+$	F	0	$+\infty$	inv. gain rel. to average (C0J8)
5	L_{ef}/L	F	0	$+\infty$	relative effective wire length
6	DXcent	F	$-\infty$	$+\infty$	wire displ. at wire center
7	DYcent	F	$-\infty$	$+\infty$	w.r.t. nominal position
8	Tprop	F	0	$+\infty$	prop. time on sense wire
9	DXend	F	$-\infty$	$+\infty$	wire displ. at wire end
10	DYend	F	$-\infty$	$+\infty$	w.r.t central position

Tabelle D.3: Drahtabhängige Kalibrationskonstanten der CJC: C1J8

Column	Name	Format	Min.	Max.	comments
1	T0	F	$-\infty$	$+\infty$	time offset (1/50 FADC clk)
2	< DT >	F	$-\infty$	$+\infty$	aver. time difference of wire ends
3	F1(1/G+)	F	0.	$+\infty$	aver. inverse gain for CJC1
4	F2(1/G+)	F	0.	$+\infty$	aver. inverse gain for CJC2
5	Vd	F	0.	$+\infty$	drift vel. (cm/(1/50 FADC-clock)
6	alfa	F	$-\pi$	$+\pi$	Lorentz agl at nominal field (B0 in word 11)
7	<Tprop>	F	0.	$+\infty$	propagation time on sense wire (1/50 FADC clock)
8	<Leff/L>	F	0.	$+\infty$	aver. relative effective wire length
9	L/2	F	0.	$+\infty$	half sense wire length
10	Z0	F	$-\infty$	$+\infty$	center of jet chamber
11	B0	F	$-\infty$	$+\infty$	B0 = nominal magn. filed if 0.0 : B0 = 11.6 Tesla assumed
12	D0	F	$-\infty$	$+\infty$	
13	D1	F	$-\infty$	$+\infty$	
14	D2	F	$-\infty$	$+\infty$	const. for close wire correction
15	C0	F	0.	$+\infty$	
16	C1	F	0.	$+\infty$	
17	DRDCL	F	0.	$+\infty$	radius at which radial elctric field around sense wire passes over to constant field
18	DFI1	F	-180.	+180.	difference to nominal position of 1. sense wire of CJC1 (degrees)
19	DFI2	F	-180.	+180.	difference to nominal position of 1. sense wire of CJC2 (degrees)
20	SAGgrav	F	$-\infty$	$+\infty$	max. wire sag from gravitation
21	SAGelst	F	$-\infty$	$+\infty$	max. wire sag from electrostatic forces (in direction of wire stag.)
22	TWIST1	F	$-\pi$	$+\pi$	rot. agl betw. endplates CJC 1
23	TWIST2	F	$-\pi$	$+\pi$	rot. agl betw. endplates CJC 2
24	0ff_0	F	0.	$+\infty$	offset of CJC1 wrt CJC2 at z=0
25	Phi_0	F	$-\pi$	$+\pi$	direction of offset at z=0
26	Off_+z	F	0.	$+\infty$	offs. of CJC1 wrt CJC2 at +z end
27	Phi_+z	F	$-\pi$	$+\pi$	direction of offset at +z end

Tabelle D.4: Globale CJC- Kalibrationskonstanten: C0J8

Column	Name	Format	Min.	Max.	comments
1	KAPPA	F	$-\infty$	$+\infty$	Signed inverse radius
2	PHI	F	$-\pi$	$+\pi$	Azimuth at DCA
3	THETA	F	0.	$+\pi$	Polar angle
4	DCA	F	$-\infty$	$+\infty$	Dist. of Clst. Appr. = DCA
5	Z0	F	$-\infty$	$+\infty$	Z at DCA
6	RAD	F	0.	$+\infty$	Radius at track start
7	IPTYPE	I	1	2	Type of parametrization
8	DKAPPA	F	0.	$+\infty$	Error of KAPPA
9	DPHI	F	0.	2π	PHI
10	DTHETA	F	0.	$+\pi$	THETA
11	DDCA	F	0.	$+\infty$	DCA
12	DZ0	F	$-\infty$	$+\infty$	Z0
13	C1	F	$-\infty$	$+\infty$	
14	C2	F	$-\infty$	$+\infty$	Correlations
15	C3	F	$-\infty$	$+\infty$	packed
16	C4	F	$-\infty$	$+\infty$	
17	NDF	I	0	$+\infty$	Number of degrees of freedom
18	CHSQ	F	0.	$+\infty$	Chi squared
19	NX	I	0	$+\infty$	Pointer to next track element
20	NHIT	I	0	$+\infty$	Packed nr of hits: NCJC+256*NCIZ +2048*NCOZ+16384*NBPC
21	CTPR	C1T1			Pointer to pointer bank
22	REND	F	0.	$+\infty$	Radius at track end
23	DEDX	F	0.	$+\infty$	dE/dx
24	DEDXEL	F	0.	$+\infty$	delta(dE/dx)
25	DEQUAL	I	0	$+\infty$	quality flag for dE/dx
26	IPFIRST	I	0	$+\infty$	pointer to first hit
27	T0track	F	$-\infty$	$+\infty$	T0 of track
28	DT0	F	0.	$+\infty$	delta(T0)

Tabelle D.5: CJC Spuren-Bank CJKR

Column	Name	Format	Min.	Max.	comments
1	KAPPA	F	-∞	$+\infty$	Signed inverse radius [1/cm]
2	PHI	F	-π	$+\pi$	ϕ-dir at *dca* to origin [rad]
3	THETA	F	0.0	$+\pi$	Polar angle [rad]
4	DCA	F	-∞	$+\infty$	singned *dca* to origin
5	Z0	F	-∞	$+\infty$	z-value at *dca*
6	DKAPPA	F	0.0	$+\infty$	Error of κ
7	DPHI	F	0.0	2π	Error of ϕ
8	DTHETA	F	0.0	$+\infty$	Error of θ
9	DDCA	F	0.0	$+\infty$	Error of *dca*
10	DZ0	F	0.0	$+\infty$	Error of Z_0
11	C1	F	-∞	$+\infty$	
12	C2	F	-∞	$+\infty$	Correlations
13	C3	F	-∞	$+\infty$	Packed with COVCP
14	C4	F	-∞	$+\infty$	
15	NHITPP	I	1	4	Nr. of lkd CST hits in r-ϕ
16	CHISQRP	F	0.0	$+\infty$	χ^2 CST+CJC r-ϕ trk fit
17	NHITZ	I	1	4	Nr. of lnkd CST hits in z
18	CHISQZ	F	0.0	$+\infty$	χ^2 from CST+CJC z trk fit
Column	**REL.name**	**Type**	**INT.bank (COL)**	-	**Comments**
19	CJKT	D1T1			Ptr to lkd CJKT track
20	CVSP	D1T1			Ptr to 1st lkd CVSP sp.pt.
21	CVSP	D1T1			Ptr to 2nd lkd CVSP sp.pt.
22	CVSP	D1T1			Ptr to 3rd lkd CVSP sp.pt.
23	CVSP	D1T1			Ptr to 4th lkd CVSP sp.pt.
24	-				

Tabelle D.6: CVFT

Literaturverzeichnis

[1] H1 Collaboration
The H1 Detector at HERA
Internal Report DESY H1-96-01, March 1996

[2] D. H. Perkins
Introduction to High Energy Physics
Addison-Wesley, third edition 1987

[3] G.C Barbarino, L. Cerrito, G. Paternoster, S. Patricelli
Measurement of the second Coordinate in a drift Chamber using the Charge division Method
Nucl. Instr. Meth. 179 (1981), pp 353-355

[4] S.Prell
Z-Kalibration und dE/dx-Kalibration der zentralen Spurenkammer des H1-Detektors
Diplomarbeit, Interner Bericht DESY FH1T-92-04

[5] V. Blobel/E. Lohrmann
Statistische und numerische Methoden der Datenanalyse
B.G Teubner Stuttgart · Leipzig 1998

[6] V.Blobel
The BOS System, Dynamic memory management

[7] J. Bürger et al.
The Central Jet Chamber of the H1 Experiment
Nucl. Inst. Methods A279 (1989), pp 217-222

[8] J. Steinhart
Die Bestimmung des Ereignis-Zeitnullpunktes mit der zentralen Spurenkammer am H1-Detektor und seine Anwendung zur Unterdrückung von Untergrund
Diplomarbeit, Interner Bericht DESY FH1T-95-02, Juli 1995

[9] M. Kausch
The Silicon Microvertex Detector of the H1-Experiment: Readout, Event Reconstruction and studies on heavy quark decays
Dissertation, Hamburg 1998

[10] T. Kuhr
Rekonstruktion von V0's mit dem H1-Silizium-Detektor
Diplomarbeit, Hamburg 1998

[11] H. Ibach, H. Lüth
Festkörperphysik, Einführung in die Grundlagen
4. Auflage, Springer 1995

[12] S. Lüders
H1 crosstalk 1998.

[13] J.D. Jackson
Klassische Elektrodynamik
Berlin, de Gruyter, 2. Auflage (1981)

[14] David Sankey
Persönliche Mitteilung, Dezember 1998.

[15] J. Steinhart
Die Messung des totalen Photoproduktions-Wirkungsquerschnittes für Λ_c-Baryonen am H1-Detektor bei HERA.
Dissertation, Hamburg (in Vorbereitung).

[16] C. Kleinwort
Persönliche Mitteilung Februar 1999.

[17] G. Wolf *HERA: Physics, Machine and Experiments*
Deutsches Elektronen-Synchrotron, DESY 1986-089, Hamburg, Germany
(Published in *Lake Louise 1986*)

Danksagung

Ich möchte mich bei allen Personen bedanken, die mir bei der Entstehung dieser Arbeit geholfen haben.

Herrn Prof. Dr. Volker Blobel danke ich für die Aufgabenstellung, die Betreuung der Arbeit und die Erstellung des Erstgutachtens.

Frau Prof. Dr. Beate Naroska danke ich für die Erstellung des Zweitgutachtens.

Bei Dr. Markus Kausch, Dr. Olaf Behnke, Dr. Carsten Niebuhr, Jörn Steinhart, Thomas Kuhr, Dr. Mark Weber, Claus Kleinwort und Dr. Wolfgang Lachnit bedanke ich mich für zahlreiche Hilfestellungen und für das gute Arbeitsklima.

Für das Korrekturlesen der Arbeit bedanke ich mich bei Saskia Röschmann, Johanna Röschmann, Jan Schümann, Thomas Deinert, Stefan Hurling und Marcel Propp.

Meinen Eltern danke ich für ihre Unterstützung während meines Studiums.

Ich versichere, daß ich diese Diplomarbeit nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Quellen und Hinweise selbstständig angefertigt habe.
Hamburg, den 24. Februar 1999 Martin Tluczykont