Auslese und Qualitätskontrolle der HADES - Driftkammern

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften

vorgelegt am Fachbereich Physik
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
in Frankfurt am Main

von
Jörn Wüstenfeld
aus Bad Homburg v.d.H.

Frankfurt 2005

(D F 1)

vom Fachbereich Physik der
Johann Wolfgang Goethe-Universität als Dissertation angenommen.

Dekan:	Prof. Dr. Assmus
Gutachter:	Prof. Dr. Ströbele, Prof. Dr. Stroth
Datum der Disputation:	10.1.2005

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird das Auslesekonzept der Driftkammern untersucht und seine Integration in das HADES Datenaufnahmesystem beschrieben. Bedingt durch das mehrstufige Triggersystem und die hohen Anforderungen an die Geschwindigkeit des Systems wurden Methoden zur Datenreduktion entwickelt. Dadurch ist es möglich, die Daten von allen 27 000 Kanälen innerhalb von 10 μs nach dem Trigger auszulesen. Die Daten werden innerhalb von ≈ 40 ns nach dem Signal der zweiten Triggerstufe weitertransportiert.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Überwachung der Driftkammerdaten, die im zweiten Teil der Arbeit beschrieben werden, wurde mit der verwendeten Methode zur Bestimmung der intrinsischen Auflösung eine deutliche Verschlechterung Auflösung der Kammern festgestellt, von 120 μm im November 2001 auf über 200 μm im September 2003. Als Ursache hierfür wurde zum einen die geänderte Kalibrationsmethode ausgemacht, die die Laufzeiten der Signale nicht mehr berücksichtigt, zum anderen eine Änderung der Driftgeschwindigkeit aufgrund einer nicht optimalen Hochspannung.
Die Methode zur Bestimmung des physikalischen Zentrums der Kammern erlaubt eine Aussage über die Position der Kammern relativ zur Sollposition. Die dabei gefundenen Verschiebungen entlang der z - Achse stimmen für einen Teil der Sektoren mit den im Rahmen des Alignments ermittelten Werten für die Verschiebung des Targets überein. Für die anderen Sektoren ergeben sich zusätzlicher Verschiebungen um 2 bis 6 cm.

Das Di - Leptonen - Spektrometer HADES (**H**igh **A**cceptance **D**i - **E**lektron **S**pektrometer) am Schwerionensynchrotron der Gesellschaft für Schwerionenforschung (Darmstadt) beginnt nun mit detaillierten Studien leptonischer Zerfälle von Vektormesonen in Kern - Kern - Stößen mit Projektilenergien von 1 bis 2 GeV / Nukleon. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Untersuchung von Zerfällen, die in der Phase hoher Dichte ($\approx 3 \cdot \rho_0$) und hoher Temperatur stattfinden. Es wird erwartet, daß sich aus der dabei zu beobachtenden Massenverteilung der unterhalb der Schwelle produzierten leichten Vektormesonen ρ, ω und ϕ ein Hinweis auf die partielle Wiederherstellung der im Vakuum gebrochenen chiralen Symmetrie ergibt.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Physikalische Fragestellungen **5**
2.1 Motivation . . . 5
2.2 Das DLS - Rätsel . . . 9
2.2.1 Leichte Stoßsysteme . . . 10
2.2.2 Schwere Stoßsysteme . . . 11
2.3 CERES . . . 12
2.3.1 Leichte Stoßsysteme . . . 14
2.3.2 Schwere Stoßsysteme . . . 14
2.4 HADES . . . 15

3 Das HADES - Spektrometer **17**
3.1 Anforderungen an das Detektorsystem . . . 17
3.1.1 Magnetfeld . . . 22
3.1.2 Ringabbildender Čherenkov - Detektor (RICH) . . . 23
3.1.3 Flugzeit - Wand (TOF + TOFINO) . . . 25
3.1.4 Multiplizitätsdetektor (PRE - SHOWER) . . . 27
3.2 Vieldraht - Driftkammern (MDC) . . . 28
3.3 Konzept des Triggers . . . 33

4 Datenaufnahme des MDC - Subsystems **35**
4.1 Anforderungen . . . 35
4.2 Aufbau der Ausleseelektronik . . . 37
4.2.1 Daughterboard . . . 38
4.2.2 Motherboard . . . 40
4.2.3 Read - Out - Kontroller . . . 43
4.2.4 Konzentrator . . . 46
4.2.5 Trigger - Modul . . . 46
4.2.6 SAM . . . 46
4.2.7 Detektor - Trigger - Modul . . . 48
4.3 Leistungsaufnahme und Kühlung . . . 50
4.4 Ablauf der Auslese . . . 52

4.4.1 Unterstützte Triggertypen . . . 53
4.4.2 Datenfluß . . . 53
4.4.3 Datenraten . . . 56
4.5 Auslesesoftware . . . 57
4.5.1 DSP - Programm des Read - Out - Kontrollers . . . 57
4.5.2 DSP - Programm des SAM - Moduls . . . 61
4.5.3 Ausleseprogramm der CPU . . . 63
4.6 Software zur Hardware - Steuerung . . . 64
4.6.1 Initialisierungs - Software . . . 64
4.6.2 Generierung der Setup - Informationen . . . 67
4.7 MDC - Datenstrukturen . . . 69
4.7.1 Das MDC - Datenwort . . . 69
4.7.2 Das MDC - Sub - Ereignis . . . 70
4.7.3 Propagation von Fehlerinformationen . . . 72
4.8 Optimierungsmaßnahmen . . . 73

5 Qualitätskontrolle der MDC - Daten 77
5.1 Einführung . . . 77
5.2 Echtzeit - Qualitätskontrolle . . . 78
5.2.1 Darstellungsformen der Rohdaten . . . 80
5.2.2 Kalibrierung . . . 84
5.2.3 Driftzeitspektren . . . 89
5.2.4 Hit - Multiplizitäten . . . 93
5.3 Qualitätskontrolle auf Analyseebene . . . 98
5.3.1 Low - Level - Qualitätskontrolle . . . 99
5.3.2 DST - Qualitätskontrolle . . . 103
5.3.3 Kontrollhistogramme der Driftkammern . . . 105

6 Auswertung der MDC - Daten 109
6.1 Einleitung . . . 109
6.2 Positionsbestimmung . . . 110
6.2.1 Verwendete Methode . . . 111
6.2.2 Ergebnisse . . . 115
6.2.3 Target - Position . . . 123
6.3 Ortsauflösung . . . 126
6.3.1 Verwendete Methode . . . 126
6.3.2 Ergebnisse . . . 128

7 Zusammenfassung und Ausblick 135
7.1 Zusammenfassung . . . 135
7.2 Ausblick . . . 138
7.2.1 Hardware . . . 138
7.2.2 Qualitätskontrolle . . . 139

7.2.3 Physikalische Ergebnisse . . . 140

A Dokumentation der Logik **143**
A.1 CPLD - Programme . . . 143
A.1.1 Motherboard . . . 143
A.1.2 Read - Out - Kontroller . . . 144
A.1.3 Konzentrator . . . 145
A.1.4 Triggermodul . . . 145

B Hardware - Adressen **147**
B.1 Motherboard . . . 147
B.2 Read - Out - Kontroller . . . 147
B.3 SAM - Modul . . . 149
B.4 Kontroll - und Auslese - CPU . . . 149

C Motherboard - Initialisierung **151**
C.1 Beteiligte Register . . . 151
C.2 Initialisierungssequenz . . . 151
C.3 Setupsequenz . . . 154

D TDC - Meßprinzip **157**
D.1 Aufbau des Meßkreises . . . 157
D.2 Temperatureinfluß . . . 158

Glossar **159**

Literaturverzeichnis **167**

Danksagung **173**

Abbildungsverzeichnis

2.1 Quark - Kondensat . . . 6
2.2 Das DLS - Spektrometer . . . 9
2.3 DLS p + Be Massenspektrum . . . 10
2.4 DLS Ca + Ca Massenspektrum . . . 12
2.5 Das CERES - Spektrometer bis 1999 . . . 13
2.6 Das CERES - Spektrometer ab 1999 . . . 13
2.7 CERES p + Be Massenspektrum . . . 14
2.8 CERES Pb + Au Massenspektrum . . . 15

3.1 HADES: Schnittbild . . . 18
3.2 HADES - 3D - Schnittbild . . . 18
3.3 Feldverteilung . . . 22
3.4 Aufbau des RICH - Detektors . . . 23
3.5 TOF - Defektor Setup . . . 26
3.6 Shower - Detektor Aufbau . . . 27
3.7 Driftkammern . . . 29
3.8 Aufbau einer Driftzelle . . . 30
3.9 Prinzip der Spurverfolgung . . . 31

4.1 Platzsituation zwischen den MDC - Kammern der Ebenen I + II . . . 36
4.2 MDC - Auslese - Schema . . . 38
4.3 Level 1 - Bus Konzept . . . 39
4.4 Analogelektronik (DBO) . . . 40
4.5 Blockschaltbild der TDC - Kette . . . 41
4.6 Blockschaltbild des Motherboards . . . 42
4.7 Read - Out - Kontroller Blockschaltbild . . . 43
4.8 Datenbus des SAM - Moduls . . . 47
4.9 Aufbau der DTU . . . 49
4.10 Datenfluß im MDC - Datenaufnahmesystem . . . 56
4.11 Level 1 Teil ROC - DSP - Code . . . 58
4.12 Level 2 Teil ROC - DSP - Code . . . 60
4.13 Trigger Teil SAM - DSP - Code . . . 61
4.14 Triggerbehandlung im SAM - DSP - Code . . . 62
4.15 SAM Komunikation mit der CPU . . . 63

4.16 Noise-Bild Sektor 1 Module 1 75

5.1 Häufigkeitsverteilung der Fehlerbits 80
5.2 TDC vs. Motherboard 82
5.3 TDC vs. Motherboard 82
5.4 TDC vs. Motherboard 83
5.5 TDC vs. Motherboard 83
5.6 Schema der Zeitkalibrierung 85
5.7 Kalibrations Zeiten 86
5.8 Suche nach fehlenden Kalibrationszeiten 87
5.9 Ergebnisse der Kalibration 88
5.10 Driftzeit-Trend 91
5.11 Noisesituation 92
5.12 Hitmultiplizität pro Zelle 93
5.13 Hitmultiplizität(Detail) 94
5.14 Hitmultiplizität pro Daughterboard 95
5.15 Hitmultiplizität pro FPC-Kabel 96
5.16 Level 1-Busbelastung 97
5.17 Übersicht über die mittleren Driftzeiten 100
5.18 Trend der mittleren Driftzeit 100
5.19 Trend der Drahtmultiplizität 101
5.20 Trend des Verhältnisses Einzel- zu Doppel- Treffern 102
5.21 Driftzeitverteilung 104
5.22 DST Driftzeit Darstellung 105
5.23 DST Time above threshold 106
5.24 DST MDC Hitverteilung 107

6.1 0° Korrelation 110
6.2 Driftzeitkorrelation der 0° Ebenen 111
6.3 Überlagerung der Driftzeitkorrelationen 112
6.4 Überlagerung der beiden Driftzeitkorrelationen 113
6.5 Vergleich No-Field- mit Low-Field-Daten 115
6.6 Driftzeitkorrelation der beiden 0°-Ebenen 116
6.7 Vergleich physikalisches Zentrum an zwei Tagen 117
6.8 Physikalisches Zentrum 119
6.9 Fehlende Signale in einer 0°-Ebene 121
6.10 Simulation des physikalischen Zentrums 122
6.11 Verschiebung entlang der Strahlachse 123
6.12 Verschiebung des Targets 125
6.13 Driftzeitkorrelation 127
6.14 Driftgeschwindigkeit Ebene I und II 128
6.15 Driftgeschwindigkeit Ebene III und IV 129
6.16 Intrinsic Resolution 130

6.17 Driftzeitkorrealtionen 131
6.18 Zeitauflösung einer Kammer 132
6.19 Zeitauflösung 133
6.20 Driftzeitkorrealtionen September 2003 134

7.1 Intrinsische Auflösung 136
7.2 Physikalisches Zentrum 138
7.3 HADES Di - Elektronenspektrum 141

D.1 Messkreis des TDC - Chips 158

Tabellenverzeichnis

2.1 Mesonen - Zerfallswahrscheinlichkeiten 8

3.1 Signaldrahtzahlen 29

4.1 Modeleitungen der Motherboards 44
4.2 Leistungsaufnahme pro Kanal 50
4.3 Leistungsaufnahme der Front - End - Elektronik 51
4.4 HADES Triggertypen 54
4.5 Threshold - Datei 68
4.6 MDC - Datenwort 70
4.7 HADES - Subevent 71
4.8 HADES - MDC - Sub - Subevent 71
4.9 MDC Fehlerbits 72

6.1 Physikalisches Zentrum(November 2001 und 2002) 118
6.2 Physikalisches Zentrum 120
6.3 Alignment results 124

B.1 Motherboard Resourcen 148
B.2 Read - Out - Kontroller Resourcen 148
B.3 Interne SAM Resourcen 149
B.4 VME Resourcen des SAM - Modules 150

C.1 TDC Register 0 und 1 152
C.2 TDC Register 2 und 3 153
C.3 Register des DAC - Chips 153
C.4 Mode - Kontroll - Register 153
C.5 Modi der Motherboards 153

Listings

4.1 Funktionen des SAM - Kontroll - Programmes 64
4.2 Konfigurationsdatei für die Schwellen 68
C.1 ROC Datei 154
C.2 ROC Konfiguration 155

Kapitel 1

Einleitung

Das hochauflösende Di - Leptonen - Spektrometer HADES am SIS[1] der GSI[2] in Darmstadt ist ein Spektrometer der zweiten Generation. Mit ihm werden unter anderem Untersuchungen zum Verhalten von Kernmaterie bei Dichten über der Grundzustandsdichte $\rho_0 \approx 0,17\,fm^3$ fortgesetzt, die mit dem Di - Leptonen - Spektrometer DLS am BEVALAC (Berkley, USA) begonnen wurden. Bei diesen Messungen wurden von DLS Unterschiede zwischen elementaren Reaktionen, z. B. p + p und p + A (vgl. Abschnitt 2.2.1 und 2.3.1), und schweren Stoßsytemen, z. B. S + Au (vgl. Abschnitt 2.2.2 und 2.3.2) gefunden, die bis heute nicht zufriedenstellend theoretisch beschrieben werden können. HADES wurde so konzipiert, daß die Auflösung in dem Massenbereich am höchsten ist, in dem DLS einen Unterschied gefunden hat.

Das HADES - Spektrometer besitzt mit einer angestrebten Massenauflösung von weniger als 1% im Massenbereich des ω-Mesons gegenüber DLS(12%) eine deutlich bessere Möglichkeit zur Identifikation schmaler Resonanzen und insbesondere zur Trennung der e^+e^- - Beiträge zu den Zerfällen der ρ - und ω - Mesonen.
Gleichzeitig ist HADES in der Lage, diese Messungen mit deutlich höherer Statistik durchzuführen, da die geometrische Akzeptanz (→ **Akzeptanz**) mit 35% dem Hundertfachen der Akzeptanz von DLS entspricht. Die Polarwinkelakzeptanz reicht von 18° bis 85° bei nahezu vollständiger Abdeckung des Azimutalwinkelbereiches. Dieser wird lediglich durch den Raumbereich beschränkt, der von den Spulen des Spektrometermagneten eingenommen wird (siehe Kapitel 3).

Di - Leptonen stellen für die Untersuchung der Eigenschaften von heißer Kernmaterie ideale Proben dar, da sie nicht der starken Wechselwirkung unterliegen. Infolgedessen bleibt die Information über ihre Entstehung vollständig erhalten.

[1] Schwerionensynchrotron
[2] Gesellschaft für Schwerionenforschung

Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn das Teilchen, aus dessen Zerfall sie stammen, noch in der Kollisionszone hoher Dichte und Temperatur, dem sogenannten Feuerball, zerfällt. Dieser Feuerball zeichnet sich bei GSI-Einschußenergien durch eine im Vergleich zum Grundzustand der Kernmaterie hohe Energiedichte aus.

Sind Dichte und Temperatur hoch genug, so sollte im Rahmen der Theorie der Quanten-Chromo-Dynamik (QCD, → **Quanten-Chromo-Dynamik**) die chirale Symmetrie teilweise wiederhergestellt werden. Verschiedene theoretische Modelle sagen für den Fall der Wiederherstellung der chiralen Symmetrie signifikante Änderungen der Vektormesoneneigenschaften insbesondere von ρ und ω voraus. HADES wurde so konzipiert, daß es eine eventuelle Änderung der Mesonenmasse nachweisen kann.

In zentralen 1 GeV pro Nucleon Au + Au-Kollisionen wird eine Produktionswahrscheinlichkeit für Di-Leptonen aus dem Massenbereich der ρ- und ω-Vektormesonen von nur etwa $3 \cdot 10^{-6}$ erwartet ([Win93], [Wol93]). Um trotzdem zu ausreichender Statistik zu kommen, muß die Kollisionsrate 10^8 pro Sekunde betragen, denn nur etwa jede zehnte Kollision ist als zentral anzusehen($b < 3\,fm$). Dabei sind im gesamten Raumwinkel etwa 18 Di-Leptonen pro Minute zu erwarten. Um diese aus dem bei jeder Au + Au-Kollision entstehenden hadronischen Untergrund von 170 Protonen und 20 geladenen Pionen herauszufiltern, werden sehr effiziente Methoden zur Hadronendiskriminierung benötigt.

Neben einer hohen Nachweiswahrscheinlichkeit der beteiligten Detektoren ist dafür auch eine schnelle Ausleseelektronik nötig. Aufgrund des komplexen Triggersystems ist es erforderlich, daß die Daten an mehreren Stellen zeitweilig gespeichert werden, da für die Triggerentscheidung der zweiten Triggerstufe bis zu 150 μs erforderlich sind.

In der vorliegenden Arbeit wird das Auslesesystem der Driftkammern beschrieben und Methoden zu seiner Überwachung vorgestellt. Nach einer Einführung in die physikalischen Fragestellungen, die mit dem HADES-Detektorsystem schwerpunktmäßig untersucht werden sollen, folgt in Kapitel 3 eine Vorstellung des Detektorsystems, wobei die Driftkammern als zentrales System zur Spurverfolgung und damit Impulsbestimmung der Teilchen ausführlicher behandelt werden. Die Ausleseelektronik wird im Kapitel 4 beschrieben zusammen mit der Software, die zum Betrieb nötig ist.
In den folgenden Kapiteln werden Methoden zur Überwachung der Datenqualität vorgestellt. Kapitel 5 beschäftigt sich mit Parametern zur Beurteilung der Funktion der Detektoren, während sich Kapitel 6 mit der Positionsbestimmung und der Ortsauflösung der Detektoren befasst. Das abschließende Kapitel 7 gibt eine Zusammenfassung und einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen.

Im Anhang A ist die Struktur der auf den Ausleseboards implementierten Logik erläutert. Anhang B gibt einen Überblick über die Adressen der einzelnen Hardwarekomponenten. Die Sequenz, die nötig ist, um die MBO (→ **Motherboard**) zu initialisieren, ist in Anhang C erklärt, und in Anhang D wird das Meßprinzip des TDC - Chips beschrieben.
Die verwendeten Fachausdrücke sind in einem Glossar erläutert, an das sich ein Verzeichnis der verwendeten Literatur anschließt.

Kapitel 2

Physikalische Fragestellungen

2.1 Motivation

Ein Schwerpunkt der aktuellen Forschung in der Kernphysik liegt zur Zeit auf der Untersuchung der Eigenschaften von Hadronen in Kernmaterie. Ziel dieser Untersuchungen ist es, ein besseres Verständnis der QCD im nicht störungstheoretischen Bereich durch die Erwartung eines Signals zu erhalten, das die Wiederherstellung der chiralen Symmetrie anzeigt(vgl [Rap00] und [Cas99]).

Eine störungstheoretische Lösung der Gleichung der QCD existiert nur für schwere Hadronen, da die Kopplungskonstante α_s der starken Wechselwirkung in der Größenordnung von 1 liegt. Für die leichten Hadronen muß mit numerischen Rechnungen (z.b. Gitter - QCD) gearbeitet werden. Eine Eigenschaft der QCD ist die spontane Brechung der chiralen Symmetrie im Grundzustand, woraus sich ein nichtverschwindender Erwartungswert $<\bar{q}q>$ für das Quarkkondensat ergibt.

Daneben können durch Untersuchungen zur Zustandsgleichung von Kernmaterie wichtige Erkentnisse zu astrophysikalischen Fragestellungen gewonnen werden. Von besonderem Interesse sind hierbei Neutronensterne und Supernovae, aber auch die Elementsynthese beim Urknall.

Theoretische Beschreibung

Die Lagrangefunktion der QCD führt für masselose Quarks (→ **Quarks**) zu einer Erhaltung der Vektor - und Axialvektorströme. Dies bedeutet, daß nicht zwischen rechts - und linkshändigen Quarks unterschieden werden kann. Eine Brechung der chiralen Symmetrie kann auf zwei Arten auftreten: *spontan* und *explizit*.
Von einer *spontan* gebrochenen Symmetrie spricht man, wenn sie schon im Grundzustand nicht mehr gegeben ist. Aus der Theorie der chiralen Symmetrie ergibt sich die Existenz eines masselosen Goldstone - Bosons. Aus der Tatsache,

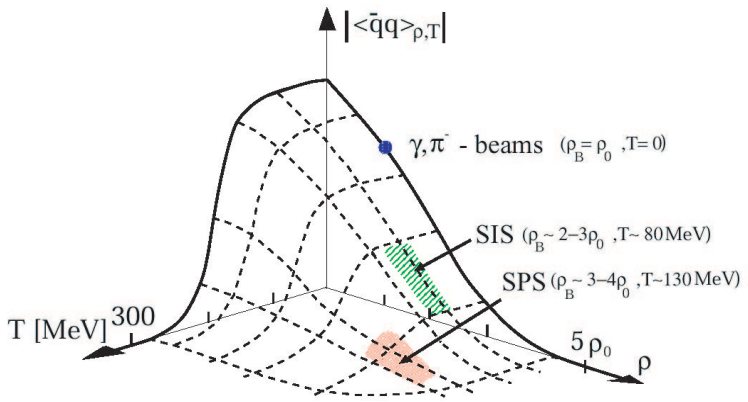

Abbildung 2.1: *Erwartungswert des Quarkkondensats als Funktion von Temperatur und Dichte in Einheiten der Grundzustandsdichte. Der mit (SIS) gekennzeichnete Bereich ist für die Untersuchung mit HADES zugänglich [Wei94].*

daß in der Natur kein masseloses Boson oder Baryon existiert, kann geschlossen werden, daß die chirale Symmetrie spontan gebrochen ist. Das π_0 ($m = 134\,\mathrm{MeV}$ [ea02]) als leichtestes Meson wird als das Goldstone - Boson der chiralen Theorie identifiziert.

Die *explizite* Brechung der Symmetrie ergibt sich, wenn die Stromquarks nicht mehr masselos sind. In diesem Fall ist die Lagrangefunktion nicht mehr invariant unter den Axial - und Vektortransformationen. Für Hadronen, die nur aus u - und d - Quarks bestehen, kann die *explizite* Brechung der chiralen Symmetrie jedoch vernachlässigt werden, da die Massen der Quarks ($m_u = 5 \pm 2\,MeV/c^2$, $m_d = 9 \pm 3\,MeV$ [ea02]) gegenüber den typischen Hadronenmassen von einigen hundert MeV vernachlässigt werden können.

Es wird erwartet, daß sich das Quarkkondensat $<\bar{q}q>$ mit steigender Temperatur und Dichte so ändert, daß die chirale Symmetrie wiederhergestellt wird. Dann kann nicht mehr zwischen rechtshändigen und linkshändigen Quarks unterschieden werden und die Masse der Quarks verschwindet. Dies wird als Phasenübergang der hadronischen Materie in eine Form von Plasma aus freien Quarks und Gluonen interpretiert. Man bezeichnet diesen Materiezustand als Quark - Gluonen - Plasma (QGP, → **Quark - Gluonen - Plasma**). In diesem Zustand ist das Quark - Confinement (→ **Quark - Confinement**) aufgehoben, was bedeutet, daß die Quarks sich nun unabhängig voneinander bewegen können.
Für Baryonendichten nahe Null und Temperaturen von $150\,\mathrm{MeV}/c^2$ führen Gitter - QCD - Rechnungen zu einem starken Anstieg von Energiedichte und anderen thermodynamischen Variablen.

Abbildung 2.1 zeigt die Abhängigkeit des Erwartungswertes des Quarkkondensats von Temperatur und Dichte auf der Basis eines Nambu - Jona - Lasinio Modells (vgl. [Wei94]).

Da die Masse der Mesonen durch die Wechselwirkung mit dem Quarkkondensat zustandekommt, führt eine Änderung des Quarkkondensats zu einer Änderung der Mesonenmasse. Für die Vektormesonen (ρ, ω, ϕ) ist dieser Effekt von großer Bedeutung, da sie eine besondere Rolle in der Beschreibung der hadronischen Wechselwirkung in der nicht - perturabtiven QCD spielen. Zur theoretischen Beschreibung werden hier anstelle von Quarks und Gluonen zusammengesetzte Hadronen und Mesonen als Träger des Wechselwirkungsfeldes verwendet. Die Vektormesonen werden zusammen mit dem Photon als Eichbosonen einer impliziten Symmetrie in Analogie zur spontan gebrochenen $\mathrm{SU}(2) \otimes \mathrm{U}(1)$ - Symmetrie der elektroschwachen Wechselwirkung betrachtet.

Die Wichtigkeit der Vektormesonen wurde zuerst in [Sak60] im Rahmen des Vektor - Meson - Dominanz - Modells hervorgehoben. In diesem Modell erfolgt die Kopplung der Hadronen an die Vektormesonen mit einer universellen Kopplungskonstanten f_ν, die in allen hadronischen Reaktionen erhalten ist. Gleichzeitig wird durch diese Kopplungskonstante und die Masse der Vektormesonen die Umwandlung von Vektormesonen in Photonen beschrieben. Eine Zusammenfassung der Thematik findet sich in [Sal03].

Experimenteller Zugang

Die Produktion von kurzlebigen Mesonen oder Baryonen, entweder im Kern oder im Feuerball stark wechselwirkender Kernbestandteile, kann experimentell durch die Kollision von Photonen, Leptonen oder Schwerionen mit einem Kern erfolgen. Obwohl der Hauptbestandteil der entstehenden Teilchen Hadronen (Pionen, Kaonen, Nucleonen, usw.) sind, stellen Photonen und Di - Leptonen vielversprechendere Proben für das Studium der Inmediumeigenschaften dar, da sie nicht der starken Wechselwirkung unterliegen, und somit die Information über ihre Entstehung aus der heißen und dichten Phase ungestört heraustragen. Die invariante Masse (→ **Invariante Masse**) von Leptonenpaaren erlaubt durch ein sehr gutes Signal zu Untergrund Verhältnis gegenüber Photonen einen guten experimentellen Zugang.

In Tabelle 2.1 sind die Zerfallswahrscheinlichkeiten für alle Vektormesonen aufgeführt, die experimentell für das HADES - Spektrometer zugänglich sind. Aus den Zahlen wird deutlich, daß der leptonische Zerfall der Mesonen eine große experimentelle Herausforderung darstellt.

Meson	Zerfallskanal	Zerfallswahrscheinlichkeit	Breite
ω	$e^+\,e^-$	$(6{,}95 \pm 0{,}15) \times 10^{-5}$	$8{,}44 \pm 0.09$ MeV
	$\pi^0\,e^+\,e^-$	$(5.9 \pm 1.9) \times 10^{-4}$	
	$\pi^+\,\pi^-\,\pi^0$	$(9,6 \pm 2,3) \times 10^{-5}$	
ρ	$e^+\,e^-$	$(4.54 \pm 0.10) \times 10^{-5}$	149.2 ± 0.7 MeV
	$\pi\,\pi$	$\approx 100\%$	
ϕ	$e^+\,e^-$	$(1.15 \pm 0.10) \times 10^{-4}$	4.26 ± 0.05 MeV
	$K^+\,K^-$	$(49,2 + 0,6 - 0,7)\%$	

Tabelle 2.1: *Wahrscheinlichkeiten für den Di - Leptonischen - und den Hauptzerfallskanal der Vektormesonen, die für HADES zugänglich sind und ihre Breiten.(vgl. [ea02])*

Die folgenden Tatsachen erschweren den Zugang zur Untersuchung der Eigenschaften von Vektormesonen in Kernmaterie über elektromagnetische Proben:

1. Es gibt mehrere Prozesse, die zum Untergrund beitragen:

   (a) Bremsstrahlung
   Der Hauptanteil des Untergrundes wird durch Bremsstrahlung von Protonen, die im Coulombfeld des Targetkernes abgebremst werden, erzeugt. Die dabei entstehenden γ - Quanten zerfallen in $e^+\,e^-$ - Paare.

   (b) Dalitzzerfall
   Beim Dalitzzerfall von δ, ω, η, und π^0 entstehende Photonen konvertieren in $e^+\,e^-$ - Paare mit kleinem Öffnungswinkel.

   (c) Konversionselektronen
   Beim Zweikörperzerfall des Pions ($\pi^0 \rightarrow \gamma\,\gamma$, $\gamma \rightarrow e^+\,e^-$) entstehnde $e^+\,e^-$ - Paare liefern signifikante Beiträge zum kombinatorischen Untergrund.

2. Da Di - Leptonen den gesamten Verlauf der Reaktion erleben, enthalten die letztenendes beobachteten Spektren eine Überlagerung aller Zwischenstufen.

3. Aufgrund ihres geringen Verzweigungsverhältnisses sind elektromagnetische Signale sehr seltene Sonden.

Der Hauptzerfallskanal aller Vektormesonen läuft über Pionen, die aber der starken Wechselwirkung unterliegen und daher keine eindeutige Information über ihre Entstehung liefern. Diese Pionen sind der Untergrund, der die Leptonen überlagert und die experimentelle Herausforderung darstellt, da sie als geladene Teilchen im Spektrometer nachgewiesen werden.

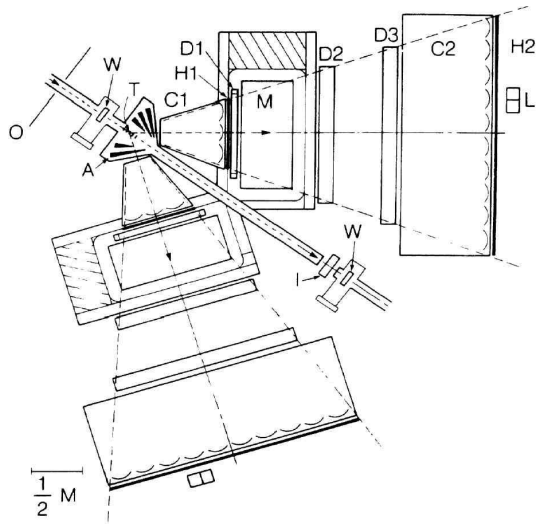

Abbildung 2.2: *Aufsicht auf das DLS - Spektrometer (D: Driftkammern, H: Hodoskope, C: segmentierte Čherenkov - Detektoren, M: Dipolmagnete)[Yeg90]*

Es hat sich in der Vergangenheit bei solchen Untersuchungen gezeigt, daß es einen Unterschied macht, ob man elementare Reaktionen ($p + \text{Kern}$, $\pi + \text{Kern}$), leichte Stoßsysteme (z.B. $\text{Be} + \text{Be}$ oder $\text{C} + \text{C}$) oder schwere Stoßsysteme (z.B. $\text{Ca} + \text{Ca}$ oder $\text{Au} + \text{Au}$) untersucht. In den folgenden Abschnitten werden die durchgeführten Experimente (DLS und CERES) vorgestellt und die Probleme der Dateninterpretation diskutiert.
Im abschließenden Abschnitt werden die Fragestellungen erläutert, die mit dem HADES - Spektrometer untersucht werden sollen.

2.2 Das DLS - Rätsel

Mit dem DLS - Spektrometer am BEVALAC wurde bereits in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts Untersuchungen mit Proton - Kern - (vgl. [Roc88] und [Nau88]) und Kern - Kern - (vgl. [Roc89b]) Kollisionen bei Energien bis zu 4,9 GeV pro Nukleon durchgeführt.
Diese Untersuchungen wurden angeregt durch Messungen von Di - Leptonen kleiner Masse und kleinem transversalem Impuls, die zeigten, daß die Einzel - Leptonenausbeute nicht verstanden war. Weitere Messungen zeigten, daß Di - Leptonenproduktion auch noch bei Strahlenergien bis hin zu 12 GeV beobachtbar ist([Nau88]). Die dabei erhaltenen Spektren der invarianten Masse der Di - Leptonen ließen sich nicht durch Mesonenzerfall oder einen Drell - Yann - Prozess (→ **Drell - Yann - Prozess**) beschreiben.

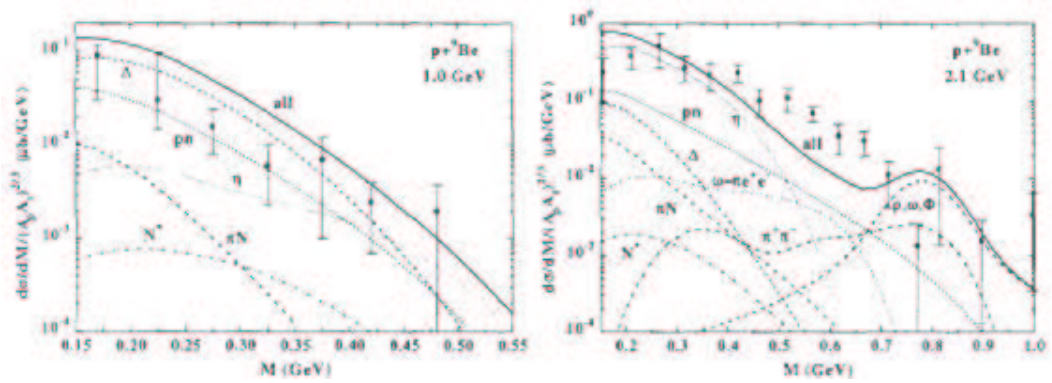

Abbildung 2.3: *Spektrum der invarianten Massen der Di - Elektronen aus p + Be - Stößen bei Stoßenergien von 1.0 GeV und 2.1 GeV. Die durchgehende Linie ist die Summe aller Beiträge, die durch die verschiedenen unterbrochenen Linien angegeben sind (aus [Bra96])*

Abbildung 2.2 zeigt den Aufbau des DLS - Spektrometers. Es besteht aus zwei gleichen Armen, die jeweils aus zwei segmentierten Čherenkov - Detektoren(C1 und C2), 3 Driftkammern(D1, D2 und D3) und einem Dipolmagneten(M) bestehen. Die Čherenkov - Detektoren dienen zur Leptonenidentifikation. Die Driftkammern, von denen sich eine vor und zwei hinter dem Dipolmagneten befinden, dienen zur Spurverfolgung. Die beiden Hodoskope, jeweils vor der ersten Driftkammer und hinter dem zweiten Čherenkov - Detektor wurden als Triggerdetektoren verwendet.

Jeder der beiden Arme ist im polaren Winkelbereich von 17° bis 63° relativ zur Strahlachse einstellbar, wodurch der kinematische Bereich auf 0,05 bis 1,25 GeV/c^2 in der Masse, 0 bis 0,8 GeV/c^2 in $p_\perp$ und 0,5 bis 1,9 GeV/c^2 in Laborrapidität beschränkt wird (vgl [Nau88].).
Die eingeschränkte geometrische Akzeptanz von $\approx 3{,}5\%$ und die Massenauflösung von lediglich 12% limitieren allerdings die Aussagefähigkeit der Daten. Insgesamt wurden nur ≈ 22000 Di - Elektronen Paare nachgewiesen ([Por97]).

2.2.1 Leichte Stoßsysteme

Die gemessenen Spektren der invarianten Masse von $e^+ e^-$ - Paaren aus p + Be - Stößen bei 1.0 GeV pro Nukleon können durch Transportmodellrechnungen innerhalb der experimentellen Fehler reproduziert werden. Bei diesen Rechnungen sind die Di - Elektronenraten von pn - Bremsstrahlung und der Zerfall freier Hadronen berücksichtigt. Hinweise auf die erwartete Modifikation der Eigenschaften von Hadronen im Medium konnten nicht beobachtet werden.

In Abbildung 2.3 ist ein Vergleich der differentiellen Wirkungsquerschnitte für Di - Elektronenproduktion in p + Be - Stößen bei 1.0 und 2.1 Gev pro Nukelon mit BUU (siehe [Bra96] und Referenzen darin) Rechnungen gezeigt. Bei 2.1 GeV pro Nukleon ist eine deutliche Abweichung zwischen Daten und Rechnung zu sehen, im Unterschied zu den Daten bei 1.0 GeV pro Nukleon.

Während der weiteren Meßphase mit den im folgenden Abschnitt beschriebenen schweren Stoßsystemen wurde eine Ineffizienz des Triggersystems beobachtet, die von der Triggerrate abhing. Eine erneute Analyse der Daten des p + Be Systems ergab die Notwendigkeit für einen Korrekturfaktor. Da dieser sich für die anderen gemessenen Systeme nicht bestimmen ließ, wurde von der weiteren Verwendung dieser Daten bei Vergleichen mit theoretischen Modellen abgeraten (vgl. [Por97].).

2.2.2 Schwere Stoßsysteme

In einem ersten Experiment [Roc89a] mit Ca + Ca wurden keine Abweichungen von den theoretischen Modellen beobachtet. Allerdings war nur eine sehr geringe Statistik an Di - Elektronen vorhanden, sodaß keine systematischen Untersuchungen möglich waren. Nach einer Überarbeitung des experimentellen Aufbaues wurde die Ca + Ca - Meßung wiederholt [Por97]. Aufgrund der besseren Statistik und einer verfeinerten Analyse der Daten ergaben sich nun deutlich kleineren systematische und statistische Fehler für die invariante Masse. Der Di - Elektronen - Wirkungsquerschnitt, der daraus extrahiert wurde, lag um bis zu einen Faktor 7 höher als von konventionellen Modellen vorhergesagt.

Diese starke Abweichung des Experiments vom vorhergesagten theoretischen Wert ist besonders ausgeprägt im Bereich der invarianten Masse von $200\,\mathrm{MeV/c^2} < \mathrm{M}_{inv} < 600\,\mathrm{MeV/c^2}$, und damit genau unterhalb der invarianten Masse der ρ/ω - Mesonen mit $\mathrm{M}_{inv} \approx 700\,\mathrm{MeV/c^2}$. Durch Berücksichtigung möglicher inmedium Modifikationen der Eigenschaften des ρ - Mesons konnte diese Abweichung bis auf einen Faktor 3 reduziert werden (siehe [Bra98]). URQMD - Rechnungen [S.A98], in denen eine Änderung der ρ Masse nach dem Brown - Rho - Scaling berücksichtigt wurde, sind nicht in der Lage, die experimentellen Ergebnisse zufriedenstellend zu beschreiben (siehe [Ern98]). Auch die Berücksichtigung der Produktion von ρ unterhalb der Schwelle über die N(1520) Resonanz konnte nur den Beitrag von ρ Mesonen kleiner Masse erhöhen, aber nicht wesentlich zur Di - Elektronenrate im mittleren Massenbereich beitragen (siehe [Bra99]).

Diese Tatsache wird allgemein als das "DLS - Rätsel" bezeichnet. Zur Lösung dieses Problems wurden verschiedene Modelle vorgeschlagen, von denen bisher keines eindeutig ausgeschlossen werden konnte. Vorgeschlagen wurde unter anderem eine Änderung der ρ - und ω - Masse beim Zerfall im Medium gegenüber dem Zerfall

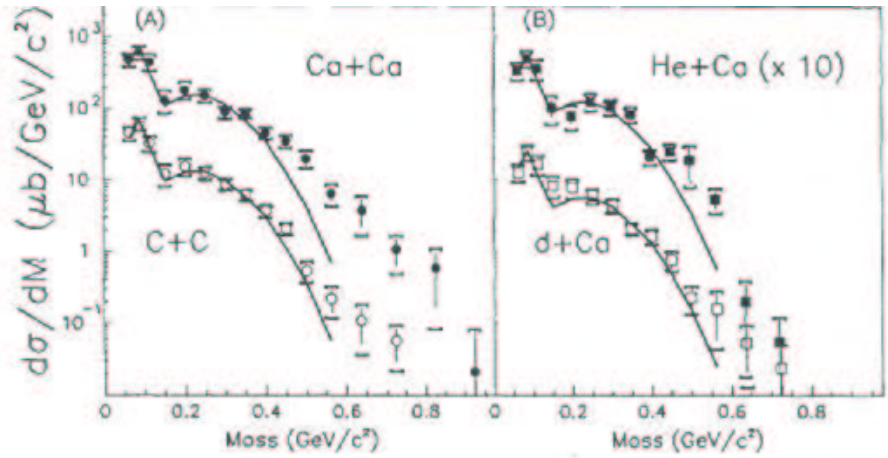

Abbildung 2.4: *Spektrum der invarianten Massen von Di - Elektronen aus Schwerionenreaktionen ((A) Ca + Ca und (B) He + Ca) mit Fits (Linien) zu den Daten aus leichten Stoßsystemen(vgl. [Por98]).*

eines freien Teilchens. Dieser Effekt wird Brown / Rho scaling genannt ([Bro91]). Ein weiteres Szenario, das vorgeschlagen wurde, ist die Verbreiterung der Vektormesonen beim Zerfall im Medium. Dies bedeutet, daß zusätzliche Zerfallskanäle wichtig werden.

2.3 CERES

Am CERN wurden vom Experiment NA45/CERES ebenfalls Di - Elektronenspektren gemessen. Der Aufbau von CERES in Abbildung 2.6 ist optimiert für den Nachweis von Di - Elektronen - Paaren im invarianten Massenbereich bis zu $2\,\mathrm{GeV}/c^2$ im Rapiditätsbereich von $2{,}1 < \eta < 2{,}65$. Das Spektrometer besteht aus zwei RICH (→ **Ring Imaging Čherenkov**) Detektoren (radiator 1/2, mirror 1/2 und UV setector 1/2 in Abbildung 2.5). Zur Spurverfolgung werden zwei Silizium - Driftdetektoren (SIDC 1/2) direkt hinter dem Target verwendet. Diese dienen zur Vertexrekonstruktion und können aufgrund der Energiedeposition für die Identifikation geladener Teilchen eingesetzt werden. Hinter dem zweiten RICH - Detektor befindet sich eine Time - projection - chamber (TPC, → **Time - projection - chamber**) in einem Magnetfeld. Die in Abbildung 2.5 eingezeichneten Magnetspulen (correction coils) um die RICH - Detektoren werden für die Messungen von Di - Elektronen nur als Korrekturspulen verwendet, um die RICH - Detektoren feldfrei zu halten. Mit diesem Aufbau wurden die leichten Systeme gemessen und erste Messungen mit schweren Systemen bei niedriger Auflösung durchgeführt. Im Jahr 1999 wurden der Aufbau um eine TPC erweitert und gleichzeitig der Multiplizitätsdetektor entfernt.

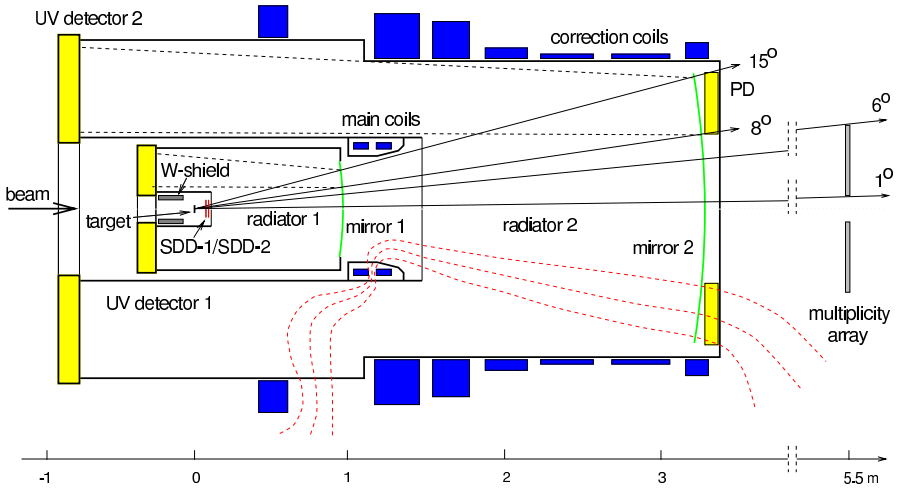

Abbildung 2.5: *Aufbau des CERES - Spektrometers bis 1999. (SIDC 1/2: Silicium - Drift Detektoren, RICH 1/2: radiator 1/2 & mirror 1/2 & UV detector 1/2 & Multiplizity Array ([Her01])*

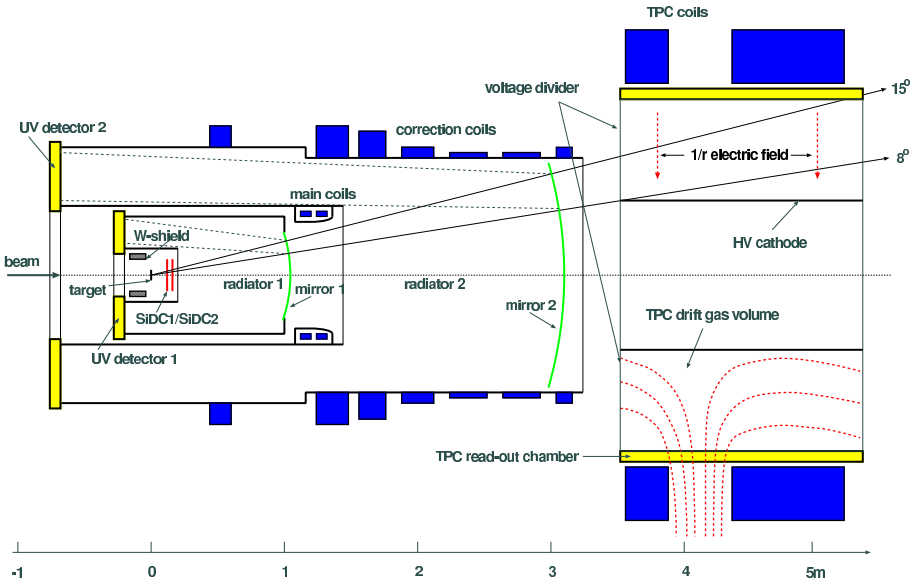

Abbildung 2.6: *Aufbau des CERES - Spektrometers ab 1999. (SIDC 1/2: Silicium - Drift Detektoren, RICH 1/2: radiator 1/2 & mirror 1/2 & UV detector 1/2, TPC: Time projection chamber)[Dam02]*

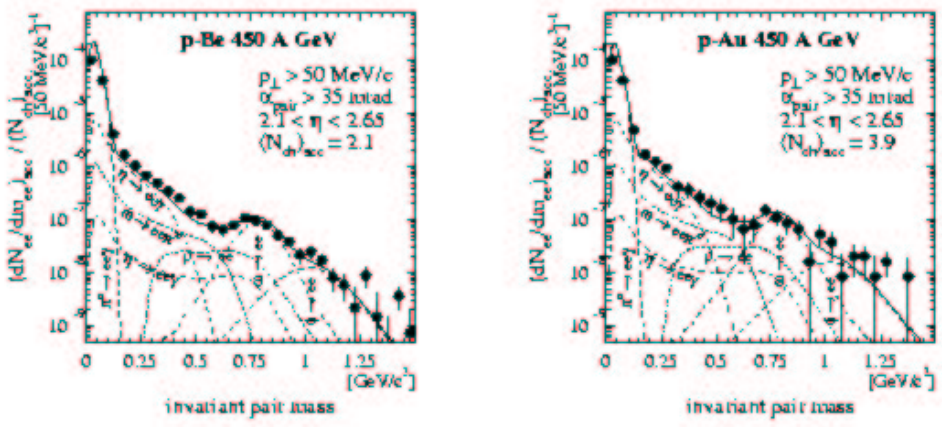

Abbildung 2.7: *Invariantes Massenspektrum aus p + Be - und p + Au - Reaktionen bei 450 A GeV. Gemessen mit CERES/NA45 (vgl. [Wes03]).*

Die Impulsbestimmung wird in der ursprünglichen Konfiguration durch das Magnetfeld, das durch die Hauptspulen (Main coils in Abbildung 2.5) erzeugt wird, ermöglicht. In der zweiten Konfiguration sind diese Spulen abgeschaltet, und die Impulsbestimmung erfolgt nur noch durch die Ablenkung der Teilchen in dem Feld, in dem sich die TPC befindet (TPC coils in Abbildung 2.6).

2.3.1 Leichte Stoßsysteme

Die Ergebnisse der Messungen elementarer Reaktionen (p + Be und p + Au, vgl. Abbildung 2.7) bei den SPS Energien von 450 A GeV sind konsistent mit dem erwarteten Spektrum hadronischer Zerfälle. Die Simulation der hadronischen Zerfälle basiert auf der Kenntnis der Verzweigungsverhältnisse aller relevanten leptonischen und semi - leptonischen Zerfallskanäle und des totalen Produktionswirkungsquerschnittes für neutrale Mesonen aus p + p Stößen.
Die Ergebnisse stehen nicht im Widerspruch zu den Messungen von DLS bei niedrigeren Energien (1 AGev).

2.3.2 Schwere Stoßsysteme

Anders ist dies bei den schweren Stoßsystemen (S + Au und Pb + Au). Von diesen Systemen wurde Pb + Au zum erstenmal gemessen. In Abbildung 2.8 ist ein deutlicher Unterschied zwischen den experimentellen Daten und der theoretischen Beschreibung zu sehen, der durch hadronische Quellen nicht erklärt werden kann. Diese Daten wurden bei Strahlenergien von 200 GeV bzw. 158 GeV gemessen.

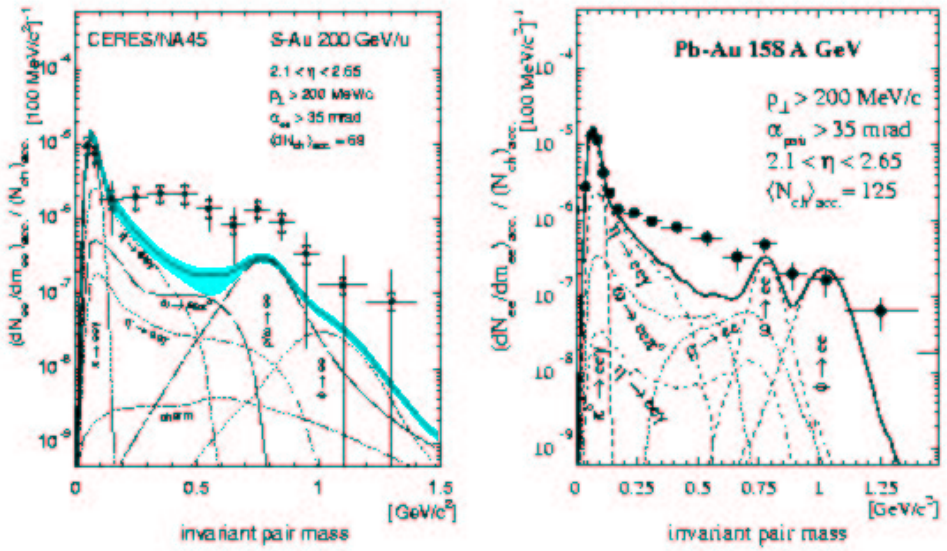

Abbildung 2.8: *Invariantes Massenspektrum aus Schwerionenreaktionen($S + Au$ und $Pb + Au$). Die Linien geben die einzelnen Beiträge der hadronischen Zerfälle an. Gemessen mit CERES/NA45 (vgl. [Wes03]). Der schattierte Bereich im linken Bild gibt die Unsicherheit der theoretischen Modelle bei der Beschreibung des Cocktails an.*

Eine theoretische Beschreibung der Ergebnisse ist mit denselben Modellen wie im Falle von DLS (vgl. Abschnitt 2.2.2) durchgeführt worden. Auch hier ist keine eindeutige Aussage möglich, welches Modell die korrekte Beschreibung liefert.

2.4 HADES

Der von DLS beobachtete Di-Elektronenüberschuß motivierte den Bau eines Spektrometers der zweiten Generation, dessen Eigenschaften auf den Nachweis von Di-Elektronen im Bereich der invarianten Masse von 200-600 MeV/c^2 optimiert sind. Mit ihm ist die Untersuchung aller Stoßsysteme von p + p bis hin zu Au + Au möglich. Mit DLS wurde als leichtestes Stoßsystem p + Be untersucht, und als schwerstes Ca + Ca. Bei CERES wurden als symmetrisches Stoßsystem Pb + Au untersucht und als asymmetrischs p + Be.

Bei den zur Verfügung stehenden Strahlenergien am SIS der GSI findet die Produktion von Vektormesonen unterhalb der Schwelle statt. Dadurch ist die Produktionsrate zwar geringer als am SPS, aber wegen der längeren Lebensdauer der Hochdichtephase der Reaktion steigt die Wahrscheinlichkeit für einen Zerfall der Vektormesonen im heißen und dichten Medium.

Die lange Lebensdauer der Hochdichtephase ist von besonderer Wichtigkeit bei der Untersuchung der leichten Stoßsysteme, bei denen sowohl von DLS als auch von CERES / NA45 keine Abweichungen von den theoretischen Modellen beobachtet wurden. Aus diesen Messungen ergibt sich eine Abhängigkeit des Effektes von der Größe des Stoßsystems. Deshalb sieht das Meßprogramm von HADES systematische Studien mit Stoßsystemen verschiedener Größe vor.

Das HADES - Spektrometer, das im folgenden Kapitel beschrieben wird, eignet sich besonders zur Untersuchung von Schwerionenreaktionen mit Projektilenergien im Bereich von 1 bis 2 AGeV. Dieser Energiebereich erlaubt durch Auswahl verschiedener Stoßsysteme die Untersuchung des Phasendiagramms im Bereich von rho_0 bis hin zu $3 \cdot \rho_0$ Dichte bei gleichzeitiger Temperatur von lediglich $\leq 80\,\mathrm{MeV}$. Dabei wird die Phasengrenze zum QGP nicht erreicht.

Darüber hinaus können auch elementare Reaktionen ($\mathrm{p}+\mathrm{p}$ und $\mathrm{p}+\mathrm{Kern}$) untersucht werden. Dabei steht vor allem die η - Produktion in $\mathrm{p}+\mathrm{p}$ - Stößen im Vordergrund. Im $\mathrm{p}+\mathrm{N}$ - System wird kein signifikanter Unterschied zu den bereits von DLS und CERES gemessenen Daten erwartet. Diese Messungen werden aber als Referenz benötigt.
Mit dem an der GSI zur Verfügung stehenden Pionenstrahl können auch $\pi^{\pm}+\mathrm{p}$ - und $\pi^{\pm}+\mathrm{N}$ - Reaktionen untersucht werden. Ziel dieser Messungen ist die Bestimmung des Pion - Formfaktors.

Um die sehr seltenen dileptonischen Zerfälle der Vektormesonen mit ausreichender Statistik untersuchen zu können, ist es erforderlich, schon mittels des Triggersystems eine Auswahl der Ereignisse zu treffen, die mit erhöhter Wahrscheinlichkeit Di - Elektronen enthalten. Dies kann nur durch ein mehrstufiges Triggersystem realisiert werden, das die Informationen mehrerer Detektoren miteinander verknüpft (vgl. [Lin] und Kapitel 3.1.).

Kapitel 3

Das HADES - Spektrometer

3.1 Anforderungen an das Detektorsystem

HADES ist für den Nachweis von Di - Elektronen aus dem Zerfall von Vektormesonen konzipiert. Wie bereits in Kapitel 2 gezeigt, ist dies eine große experimentelle Herausforderung. Durch einen Ring Imaging Čherenkov (RICH, → **Ring Imaging Čherenkov**) - Detektor, der das Target in Vorwärtsrichtung umgibt, werden Leptonen selektiert(vgl. Abschnitt 3.1.1).
Mit Hilfe eines TOF (→ **Time of flight**) - Detektors und eines PRE - SHOWER (→ **PRE - SHOWER**) - Detektors werden über die Flugzeit, bzw. die charakteristische Schauerbildung, Leptonen und Hadronen hinter dem Spektrometer selektiert. Zwischen diesen Detektoren befindet sich das Spektrometer, das aus je zwei Ebenen MDC (→ **Multiwire Driftchamber**) - Detektoren vor und hinter einem supraleitenden Magneten besteht.
Durch das Feld dieses Magneten werden alle geladenen Teilchen entsprechend ihrer Ladung umgekehrt proportional zu ihrem Impuls abgelenkt. Durch die Bestimmung dieser Ablenkung ist die Impulsbestimmung bei Kenntnis der Feldstärke des magnetischen Feldes möglich.
In Abbildung 3.1 ist ein Schnitt durch HADES gezeigt. Zur Illustration des Nachweises eines e^+e^- - Paares sind die Spuren eines solchen eingezeichnet. Abbildung 3.2 zeigt eine 3 - dimensionale Darstellung des Spektrometers. Der zum Größenvergleich gezeigte Mensch verdeutlicht die Abmessungen des Detektorsystems. Der maximale Durchmesser des Systems beträgt 5 Meter. Das gesamte System ist so kompakt wie möglich gebaut, um eine größtmögliche Akzeptanz zu erreichen.
Im linken Bild von Abbildung 3.2 ist die Zählweise der Sektoren so, daß in Strahlrichtung blickend der Sektor 1 oben liegt und dann im Uhrzeigersinn fortfahrend Sektor 2 usw. folgt.

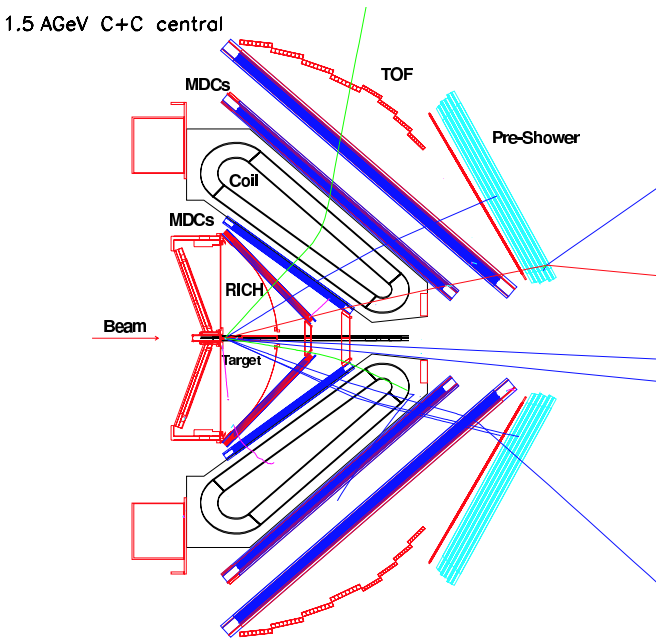

Abbildung 3.1: *Schnittzeichnung des HADES Detektorsystems mit einem e^+e^- Paar aus einer 1.5 GeV pro Nukleon $c + C$ Simulation, welches vollständig nachgewiesen wurde.*

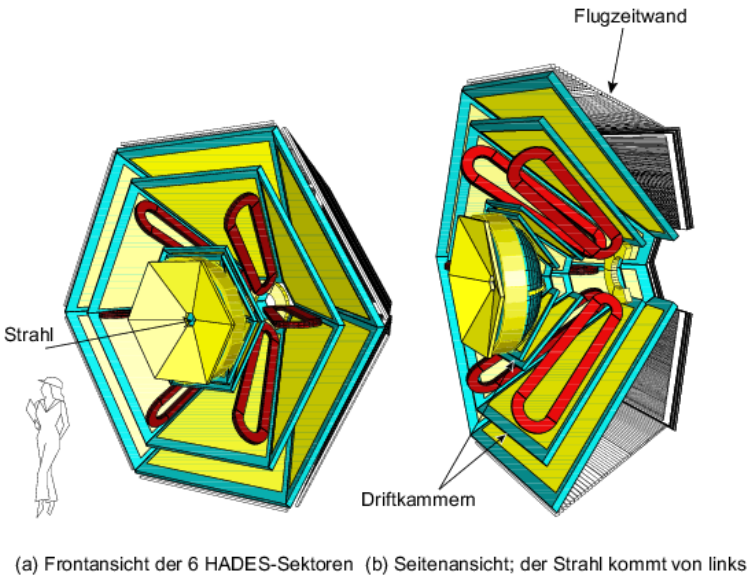

Abbildung 3.2: *Schematische 3D - Darstellung des HADES - Detektorsystems (aus [Pac03]).*

Die Spektrometereigenschaften, die für eine Analyse hadronischer Eigenschaften im Di - Elektronenspektrum benötigt werden, lassen sich in folgenden, voneinander abhängigen Punkten zusammenfassen:

1. Ein schnelles Triggersystem zur Selektion von Wechselwirkungen mit Di - Elektronenkandidaten.
2. Eine hohe Akzeptanz, sowohl die Geometrie als auch die Teilchennachweiseffizienz betreffend.
3. Hadronendiskriminierung.
4. Minimierung der Sekundärteilchenproduktion.
5. Erkennung von leptonischem Untergrund.
6. Eine Massenauflösung von etwa 1 %.
7. Effiziente Teilchenidentifikations - Mechanismen.

Im folgenden soll die Bedeutung der einzelnen Punkte kurz erläutert werden. In den Beschreibungen der Detektoren wird darauf wieder Bezug genommen.

1. **Triggersystem**
   Das Triggersystem soll nur solche Ereignisse selektieren, in denen Di - Elektronenkandidaten gefunden wurden. Die Daten müssen so schnell verarbeitet werden können, daß bei den nötigen Strahlintensitäten die Totzeit ($\rightarrow$ **Totzeit**) des Triggersystems nicht zu groß wird.
   Für Au + Au - Kollisionen ergibt sich bei einer Strahlintensität von 10^8 Teilchen/s auf ein Target von 1% Wechselwirkungslänge eine Rate von 10^6 Kollisionen/s. Von diesen sind aber nur etwa 10^5 als zentral ($b < 4\,fm$) anzusehen. Sie werden über die Multiplizität in der Flugzeitwand (TOF) selektiert. Durch die zweite Triggerstufe soll die Rate um einen Faktor ≈ 100 reduziert werden($\rightarrow 10^3$ Ereignisse/s) (vgl. [Sch95]).
2. **Akzeptanz**
   Da die Produktionswahrscheinlichkeit für Di - Elektronen im Massenbereich der Vektormesonen ρ, ω und ϕ nur $3{\cdot}10^{-6}$ beträgt, wird eine hohe Akzeptanz des Spektrometers angestrebt. Die geometrische Akzeptanz reicht in polarer Richtung von 18° bis 85°, in azimutaler Richtung beträgt sie nahezu $2 \cdot \pi$, nur begrenzt durch die Bereiche, in denen sich die Spulen des Magneten zur Erzeugung eines toroidalen Feldes (siehe Abschnitt 3.1.1) befinden. Die geometrische Akzeptanz sollte durch Detektorrahmen etc. so wenig wie

möglich beschränkt werden. Es ist daher erforderlich, daß alle konstruktiven Elemente der Detektoren in dem Raum untergebracht werden, der vom Schatten der Spulenkästen definiert wird.
Die untere Grenze für die polare Akzeptanz von 18° ergibt sich aus der Forderung, daß die Detektoren nicht von schweren Fragmenten der Reaktion getroffen werden sollten, was die Produktion von Sekundärelektronen verstärken würde. Die obere Grenze von 85° ergibt sich aus der Reaktionskinematik der Schwerionenkollision. Die Polarwinkelakzeptanz beträgt im Massenbereich M_{inv} >150 MeV/c^2 für $e^+ e^-$ Paare etwa 40 - 50%.
Die Nachweiseffizienz ist eine spezifische Eigenschaft der Detektoren und wird in den folgenden Abschnitten über die einzelnen Detektoren diskutiert.

3. **Hadronendiskriminierung**
Um das Triggersystem bei der Suche nach Di - Elektronen nicht durch Spuren geladener Hadronen zu belasten, werden Detektoren benötigt, die in der Lage sind, Hadronen von Leptonen zu unterscheiden. Im HADES - Spektrometer geschieht dies im Bereich kleiner polarer Winkel (18° - 45°) im SHOWER - Detektor, da sich die Schauer von Hadronen und Leptonen deutlich unterscheiden. Für große Winkel ist der Flugzeitunterschied ausreichend, sodaß hier eine Flugzeitwand(TOF) eingesetzt wird. Durch die Kombination dieser Detektoren lassen sich Spuren hinter dem Magnetfeld eindeutig als Hadronen oder Leptonen identifizieren.
Vor dem Magnetfeld wird diese Identifikation durch den RICH - Detektor erleichtert, da nur Leptonen dort Ringe bilden.

4. **Sekundärelektronen**
Sekundäre Elektronen können nicht von der primären Wechselwirkung kommen, da sie entstehen, wenn geladene Teilchen Material durchqueren. Die durch diese Teilchen in den Detektoren erzeugten Treffer werden bei der Spurrekonstruktion fälschlicherweise als Leptonen identifiziert. Je größer die Anzahl an solchen falschen Leptonen ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein Di - Lepton rekonstruiert wird.
Dadurch tragen die Sekundärteilchen direkt zum leptonischen Untergrund (siehe Punkt 5) bei. Ihre Produktionsrate ist daher durch geeignete Materialbelegung bei der Detektorkonstruktion zu minimieren.

5. **Leptonischer Untergrund**
Als Quellen leptonischen Untergrunds gibt es neben den Sekundärteilchen noch die geladenen Pionen, die bei der Reaktion direkt entstehen. Für das schwerste von HADES zu untersuchende System (Au + Au, bei 1.5 GeV pro Nukleon) werden neben 170 Protonen und 20 geladenen Pionen, auch 10 neutrale Pionen erwartet. Diese erzeugen beim Zerfall mit einer Wahrscheinlichkeit von 1% ein e^+ - e^- - Paar. Zu 98 % zerfallen die neutralen Pionen in

zwei Gammaquanten, die über externe Paarkonversion ebenfalls zu dem leptonischen Untergrund beitragen. Da in der Rekonstruktion des Ereignisses nicht klar ist, welche Elektronen / Positronen aus dem Zerfall eines Teilchens stammen, ergeben sich kombinatorische e^+ - e^- - Paare, deren einzelne Komponenten aus dem Zerfall je eines π^0 stammen.
Die Wahrscheinlichkeit für die Paarkonversion steigt mit der Dichte, der Kernladungszahl und der Weglänge, die das γ - Quant im Material zurücklegt. Die Materialgrößen lassen sich in der Strahlungslänge (→ **Strahlungslänge**) $X_0(A,Z,\rho)$ zusammenfassen. Um die Paarkonversionsrate klein zu halten, ist also das Verhältnis der Wegstrecke x zur Strahlungslänge X_0 möglichst klein zu halten. Dies beeinflußt die Wahl der Materialien für die Detektorkonstruktion. Bevorzugt sollten Materialien mit kleiner Kernladungszahl Z verwendet werden.

6. **Massenauflösung**
Zur Bestimmung der invarianten Masse, und damit der Eigenschaften des zerfallenden Vektormesons, ist die Kenntnis der Impulse der Di - Elektronen (p_{e^+} p_{e^-}) und ihr Öffnungswinkel $\alpha_{e^+e^-}$ notwendig.

$$M_{inv} \simeq 2\, sin\left(\frac{\alpha_{e^+e^-}}{2}\right)\sqrt{p_{e^+}p_{e^-}} \tag{3.1}$$

Für die Zuordnung eines Di - Leptons zu einem Vektormeson ist eine gute Massenauflösung erforderlich, da das ω - Meson mit einer Breite von 8 MeV/c^2 ebenso wie das ρ - Meson mit einer Breite von 150 MeV/c^2 zum Massenbereich um 780 MeV/c^2 beitragen. Die Massenauflösung des Detektorsystems muss etwa 1 % betragen, damit zwischen dem ω - und dem ρ - Meson unterschieden werden kann. Die dafür notwendige Impulsauflösung von 1.4 % [Sch95] wird durch das toroidale Feld von maximal 0.5 T des supraleitenden Magneten bei einem Strom von 3,6 kA erreicht (vgl. Abschnitt 3.1.1).

7. **Teilchenidentifikation**
Durch die Identifikation der Teilchen soll eine Diskriminierung der e^+ e^- - Paare gegen die anderen Teilchen durchgeführt werden, bei denen es sich in der Hauptsache um Pionen und Protonen handelt. Durch Bestimmung des Impulses (p = m * v) und der Geschwindigkeit (v) erhält man aus Formel 3.6 auf Seite 27 die Masse des Teilchens.

$$m = \frac{p}{v}\sqrt{1-\beta^2} \tag{3.2}$$

Die Geschwindigkeit (v) wird durch Messung der Flugzeit im META - System bestimmt, der Impuls (p) anhand der Ablenkung des Teilchens im Magnetfeld und $\beta = \frac{v}{c}$.
Durch Korrelation dieser Information mit der Identifikation im RICH - und SHOWER - Detektor können e^+ e^- - Paare eindeutig identifiziert werden.

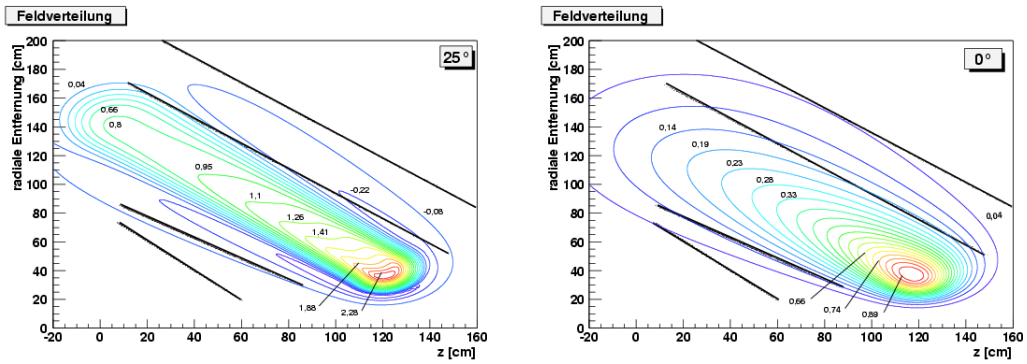

Abbildung 3.3: *Feldverteilung des HADES Magnetfeldes. Feldverteilung in der Nähe eines Spulenkastens (links), und in der Mitte zwischen zwei Spulenkästen (rechts). Die dicken geraden Linien kennzeichnen die Lage der Driftkammern. [Rus03]*

3.1.1 Magnetfeld

Zur Bestimmung des Teilchenimpulses wird die transversale Ablenkung Δp_t des Teilchens im Magnetfeld herangezogen. Zur Erzeugung der dazu nötigen Feldstärken von $\geq 0{,}5\,\mathrm{T}$ sind supraleitende Spulen besonders geeignet, da sie sehr kompakt gebaut werden können und damit ihre effektive Dicke $\frac{x}{X_0}$ sehr klein ist. Dadurch reduziert sich die Rate für Sekundärelektronen.
Das Feld besitzt eine toroidale Geometrie mit einer maximalen Feldstärke von 3,7 T bei einem Strom von 3,6 kA. Es wird durch sechs Spulen erzeugt, die symmetrisch um die Strahlachse mit einem azimutalen Abstand von 60° angeordnet sind (siehe Abbildung 3.2). Die maximale Feldstärke wird in dem Bereich erreicht, wo die Spulen in der Nähe des Strahls am nächsten zueinander stehen. Dies erlaubt die Ablenkung der hochenergetischen Teilchen, die hauptsächlich in diesem Bereich durch das Spektrometer fliegen.
Durch die 8 cm breiten Spulenkästen wird der Bereich definiert, in dem sich die Detektorrahmen der einzelnen Detektorsegmente befinden sollten, um die geometrische Akzeptanz nicht noch zusätzlich einzuschränken.

In Abbildung 3.3 ist die Feldverteilung gezeigt. In der Mitte eines Sektors reduziert sich das Feld auf etwa ein Drittel und erstreckt sich weit über die Ausdehnung der Spule hinaus, was zu Randfeldern in den Driftkammern der Ebenen II und III führt. Im Bereich großer Polarwinkel erstreckt sich das Randfeld bis in den RICH - Detektor hinein. Dies führt dazu, daß die Teilchenbahnen schon zwischen den inneren Ebenen der Driftkammern eine leichte Krümmung aufweisen, und dadurch die Impulsbestimmung an Genauigkeit verliert. Die maximale Feldstärke wird an der Spulenoberfläche im unteren Kreisbogen ereicht.

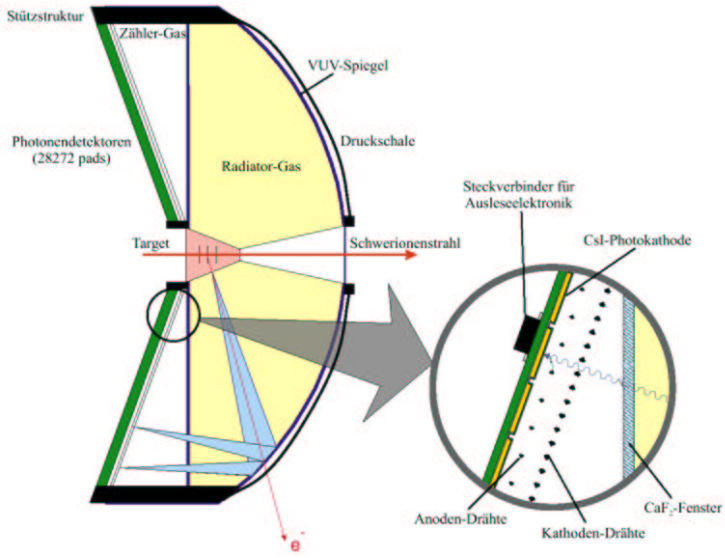

Abbildung 3.4: *Aufbau des RICH - Detektors (aus [Lin01])*

3.1.2 Ringabbildender Čherenkov - Detektor (RICH)

Zur Hadronendiskriminierung wird ein ortsempfindlicher Čherenkov - Detektor mit C_4F_{10} als Radiatorgas eingesetzt, in dem nur solche Teilchen Čherenkov - Licht (→ **Čherenkov - Licht**) aussenden, deren Geschwindigkeit β größer ist als die Lichtgeschwindigkeit im Medium β_{thr}. Durch Wahl eines entsprechenden Radiators können Leptonen in einem Untergrund von Protonen und geladenen Pionen identifiziert werden. Durch Verwendung eines sphärischen Spiegels wird das entstandene Čherenkov - Licht als Ring auf einem Photonendetektor abgebildet. Durch Festkörper - Photonenkonverter in Form von CsI - bedampften Photokathodenplättchen werden Elektronen erzeugt, die durch ein elektrisches Feld in dem Gasdetektor beschleunigt werden. Sie lösen in diesem eine Sekundärelektronenlawine aus, die räumlich auf das Plättchen begrenzt bleibt, in dem das Primärelektron erzeugt wurde. Abbildung 3.4 zeigt einen Querschnitt durch den Detektor.

Der Photonendetektor ist vom Radiatorgas durch ein Fenster aus CaF_2 getrennt, dessen Transmissionseigenschaften für Čherenkov - Photonen in dem Wellenlängenbereich, wie sie im C_4F_{10} enstehen, besonders gut ist. Da die Photonenausbeute wegen der Weglänge der Teilchen im Radiator nicht sehr groß ist ($\approx$ 10 pro Lepton), müssen die Verluste so gering wie möglich gehalten werden.

Die Spiegelsegmente bestehen aus 2 mm Kohlefasermaterial, um die Wahrscheinlichkeit für Sekundärteilchenproduktion zu verringern, und sind mit Al bedampft, wodurch eine hohe Reflektivität bis zu $\lambda_{min} < 135$ nm erreicht wird.

Die durch die Randfelder des Magneten im RICH verursachte Änderung der Auflösung übertrifft nur für Teilchenimpulse $< 100\,\mathrm{MeV}$ und bei sehr großen Polarwinkeln die Auflösung des Detektors. Die Vielfachstreuung der Elektronen im Radiatorgas steigt mit kleiner werdendem Impuls stark an und übertrifft die Randfeldeffekte.

Čherenkov Photonen

Durchquert ein hochenergetisches, geladenes Teilchen ein Di - Elektrikum, so emitieren die angeregten Atome Licht, wenn die Geschwindigkeit β des Teilchens größer als die Phasengeschwindigkeit β_{thr} elektromagnetischer Felder in diesem Medium ist. Dieser Zusammenhang ist durch Gleichung 3.3 gegeben.

$$\beta > \beta_{thr} = 1/n = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma_{thr}^2}} \tag{3.3}$$

Dabei gilt für den Schwellenwert des Lorentz - Faktors die Gleichung 3.4.

$$\gamma_{thr} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}} \tag{3.4}$$

Durch Wahl eines Radiators mit geeignetem Brechungsindex n bzw. Lorentz - Faktor γ_{thr} kann zwischen Elektronen und langsameren geladenen Teilchen (π, p etc.) unterschieden werden.
Das Licht bildet unter einem festen Winkel Θ_C zur Teilchenbahn eine Wellenfront und damit einen Kegel von Čherenkov Photonen. Der Öffnungswinkel ($2 \cdot \Theta_C$) des Čherenkov Kegels erreicht einen asymptotischen Wert, da die Elektronen aus den Schwerionenkollisionen im relevanten Impulsbereich von $> 100\,\mathrm{MeV/c}$ ein β von nahezu 1 besitzen. Er ist definiert durch Gleichungg 3.5.

$$\Theta_C = \arccos \frac{1}{\beta n} \xrightarrow{\beta \to 1} \frac{1}{\gamma_{thr}} \tag{3.5}$$

Für den in HADES eingesetzten Radiator C_4F_{10} mit einem Brechungsindex n von 1,0014 ergibt sich ein Öffnungswinkel von 3,03° für Teilchen mit einem β von 1. Die Ringe im Photonendetektor haben dadurch einen konstanten Durchmesser von ca. 5 cm.

Untersuchungen zur Quanteneffizienz des Spiegels, Absorptionseigenschaften des Radiators und Nachweiswahrscheinlichkeit des Photonen - Dektektors wurden im Rahmen von [Fab03] und [Ebe04] durchgeführt.

Einsatzzweck

Der RICH - Detektor wird aufgrund seiner Hadronenblindheit im Rahmen des HADES - Triggersystems eingesetzt, um all die Ereignisse zu selektieren, in denen $e^{\pm}$ enthalten sind. Aus den Positionen der Ringmittelpunkte auf der Ebene der Photokathode läßt sich der Winkel der Teilchenbahn relativ zur Strahlachse bestimmen.
In der Analyse wird daraus, zusammen mit Informationen der Vieldraht - Driftkammern (siehe Abschnitt 3.2), die Position des Zerfallsvertex mit hoher Genauigkeit bestimmt. Dies gilt aber nur unter der Annahme, daß der Zerfallsvertex im Bereich um das Target liegt. Für größere Entfernungen stimmt der im RICH - Detektor gemessene Winkel nicht mehr. Hier muß daher die Rekonstruktion allein aus den Informationen der Driftkammern erfolgen.

3.1.3 Flugzeit - Wand (TOF + TOFINO)

Zur Bestimmung der Flugzeit und zur Ereignischarakterisierung durch Bestimmung der Multiplizität werden zwei unterschiedliche Flugzeit - Detektoren eingesetzt. Bei Polarwinkeln oberhalb von 45° wird ein Plastikszintillator aus Stangen quadratischen Querschnitts verwendet (TOF). Unterhalb von 45° kommen Szintillatorplatten zum Einsatz (TOFINO).

TOF

Im Polarwinkelbereich von 45° bis 85° wird ausschließlich die Flugzeitinformation verwendet, um Hadronen gegenüber Elektronen zu diskriminieren. Die Granularität des TOF - Detektors ist an diese Anforderung angepaßt. Der Querschnitt der Szintillatoren ist so gewählt, daß die Wahrscheinlichkeit eines Doppeltreffers in einem Szintillator für zentrale Au + Au - Kollisionen kleiner als 20% ist.
Elektronen haben aufgrund ihrer gegenüber Hadronen geringeren Masse bei gleichem Impuls eine höhere Geschwindigkeit. Daher liefert die Flugzeit eine Möglichkeit zur Identifikation von Hadronen.

Neben der Flugzeitinformation liefert der TOF - Detektor auch noch eine Ortsinformation, indem die Differenz zwischen den Zeiten an den beiden Enden des Szintillators gemessen wird. Mit Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht im Szintillatormaterial läßt sich daraus der Ort ermitteln, an dem das Teilchen den Detektor durchquert hat. Die Ortsauflösung des TOF - Detektors beträgt in x - Richtung $\approx 2\,\mathrm{cm}$, das heißt entlang der Szintillatorstäbe.

Durch Bestimmung der Signalamplitude im Sekundärelektronenvervielfacher (→ **Sekundärelektronenvervielfacher**) kann man zudem noch eine Information über den Energieverlust ($\frac{dE}{dx}$) erhalten, der proportional zur Energie der Teilchen

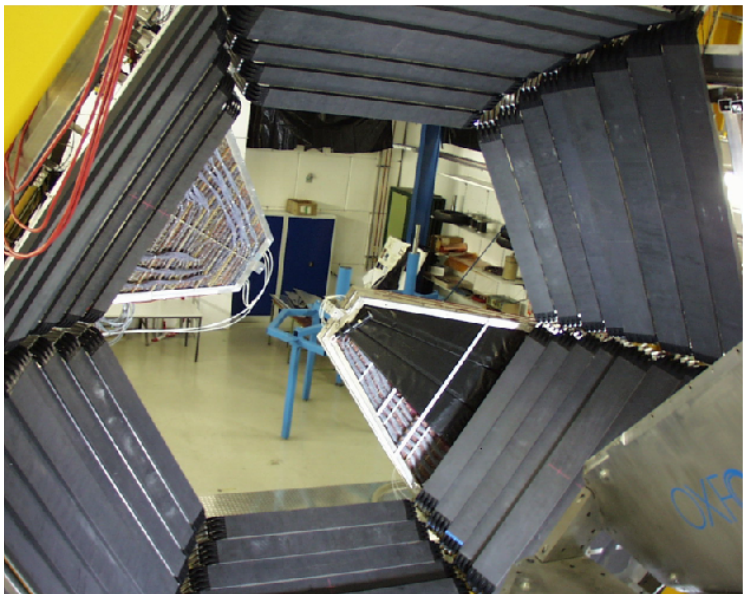

Abbildung 3.5: *TOF - Detektor Setup. Das Bild zeigt den Flugzeitdetektor für den Bereich von 45° bis 85° in allen sechs Sektoren. Im Hintergrund sind zwei Sektoren des SHOWER - Detektors zu erkennen. Auf dem rechten Detektor sind drei Segmente des TOFINO Detektors montiert.*

ist. Diese Information wird zur Teilchenidentifikation eingesetzt. Damit liefert der TOF Detektor zwei voneinander unabhängige Möglichkeiten zur Teilchenidentifikation.

Die Zeitauflösung (150 ps) des TOF - Detektors geht über die Messung der Flugzeit in die Teilchenidentifikation ein und beeinflußt somit die Spektrometereigenschaften.

TOFINO

Im Polarwinkelbereich von 18° bis 45° ist die Flugzeitinformation nicht ausreichend für die Unterscheidung zwischen Hadronen und Leptonen. Hier wird deshalb zusätzlich ein Schauerdetektor (siehe Abschnitt 3.1.4) zur Teilchenidentifikation eingesetzt. Trotzdem wird die Multiplizitätsinformation zur Ereignischarakterisierung benötigt. Diese Information liefert ein Szintilationsdetektor der aus vier Segmenten je Sektor besteht. Jedes Segment wird von einem Sekundärelektronenvervielfacher ausgelesen. Im Fall von Doppeltreffern liefert dieser Detektor jedoch keine eindeutige Information mehr und ist daher nur für leichte Stoßsysteme geeignet.

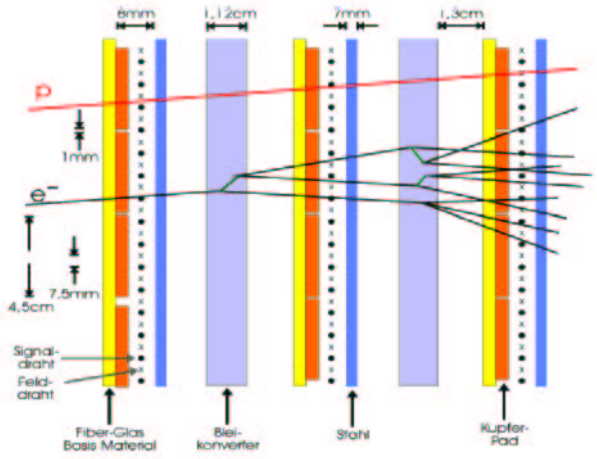

Abbildung 3.6: *Aufbau des Pre - Shower - Detektors. Zu sehen sind die zwei Bleikonverter, die drei Vieldrahtkammern sowie eine Elektronenspur (e^-) mit erzeugtem elektromagnetischem Schauer und ein Hadron (Proton p), das keinen Schauer erzeugt. Aus [Lin]*

Durch Korrelation der Ortsinformation mit dem SHOWER - Detektor kann die Auflösung verbessert werden. Gleichzeitig liefert diese Korrelation auch eine Information zur Teilchenidentifikation, sofern im TOFINO - Detektor nur ein Treffer vorliegt.

3.1.4 Multiplizitätsdetektor (PRE - SHOWER)

Im Bereich von 18° bis 45° kommt zur Teilchenidentifikation ein Schauerdetektor zum Einsatz, da der Flugzeitunterschied zwischen Hadronen und Leptonen für hochenergetische Teilchen, die in diesen Winkelbereich hinein emitiert werden, sehr gering ist.

Hochenergetische, geladene Teilchen können durch Ionisation oder durch Ablenkung im Coulombfeld des Kernes Energie in Form von Bremsstrahlung verlieren, die wiederum Elektron - Positron - Paare erzeugt. Die Strahlungsintensität der Bremsstrahlung eines Teilchens der Masse m ist gegeben durch Gleichung 3.6.

$$I = \frac{z^2 Z^2 e^4}{m^2} \tag{3.6}$$

Mit $z \cdot e$ als Ladung des Teilchens und $Z \cdot e$ als Ladung des Atomkernes an dem die Ablenkung stattfindet. Die Intensität, der von einem Proton erzeugten Bremsstrahlung ist $\approx 3 \cdot 10^6$ mal kleiner als die eines Elektrons. Infolgedessen erzeugen die Elektronen im Gegensatz zu den Hadronen beim Durchqueren

eines Absorbermaterials mit hoher Kernladungszahl eine Kaskade aus Photonen und e^+ - e^- - Paaren durch sukzessive Bremsstrahlung und Paarbildung. Die longitudinale Entwicklung ist bestimmt durch den hochenergetischen Anteil der Kaskade, und die Zahl der Sekundärteilchen nimmt mit der durchquerten Strahlungslänge zu.

Um bei den Elektronenenergien von wenigen 100 MeV eine hohe Schauereffizienz zu erreichen, besteht der Detektor aus zwei Bleikonvertern mit je einer Dicke von 2 Strahlungslängen (1,12 cm). Vor, zwischen und hinter den Bleischichten wird mittels Vieldrahtkammern die (Schauer -) Teilchenzahl über die Ladung ermittelt. Die Vieldrahtkammern bestehen aus nur einer Ebene von Signal - und Felddrähten, sowie einer flächigen Kathode aus $3 \times 3\,cm^2$ großen Feldern. Die Kammern werden im sogenannten Self - Quenching - Streamer - Mode (→ **Self - Quenching - Streamer - Mode**) betrieben.

Für Elektronen steigt die erzeugte Ladungsmenge von der ersten bis zur dritten Vieldrahtkammer bis auf das Dreifache an. Dadurch ist deren Identifizierung möglich, da Hadronen diesen Effekt nicht haben. Doppeltreffer sind eine mögliche Quelle für Fehlinterpretationen. Diese Rate beträgt etwa 10 %, kann aber auf etwa 2 % gesenkt werden, wenn die Flugzeitinformation des TOFINO - Detektors berücksichtigt wird.

Strenggenommen handelt es sich bei diesem Schauerdetektor nur um einen Pre - Schauer - Detektor, da aufgrund des gewählten Detektoraufbaues die erzeugten elektromagnetischen Schauer nicht in ihrer gesamten longitudinalen Entwicklung detektiert werden.

3.2 Vieldraht - Driftkammern (MDC)

Zur Verfolgung der Spuren aller geladenen Teilchen durch das Magnetfeld des HADES - Spektrometers dienen vier Driftkammern, je zwei davor und dahinter. Dadurch wird die Bestimmung des Ablenkwinkels durch das Magnetfeld und damit des Impulses des Teilchens möglich. Um die geforderte Massenauflösung von besser als 1% im Bereich der Masse des ω - Mesons zu erreichen, ist eine Ortsauflösung von besser als 100 μm nötig [Sch95]. Das Detektordesign orientiert sich daneben an der Forderung nach hoher geometrischer Akzeptanz. Die azimutale Akzeptanz wird lediglich durch die Spulenkästen des Magneten begrenzt. Die polare Akzeptanz reicht von 18° bis 85° und ist damit identisch mit der der anderen Detektoren.

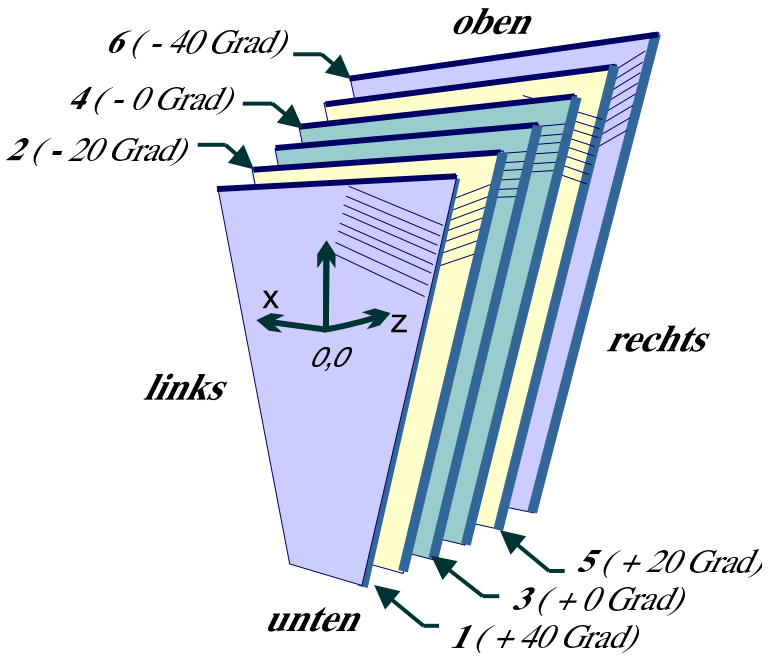

Abbildung 3.7: *Schematischer Aufbau der Driftkammern.*

Driftzellen und Feldgeometrie

Wie in Abbildung 3.7 gezeigt, besteht jede Driftkammer aus sechs Ebenen mit Signal - und Felddrähten, die zwischen Ebenen mit Kathodendrähten liegen. Dadurch entstehen sechs Ebenen von Driftzellen, die unter sechs verschiedenen Winkeln verlaufen, um die Ortsauflösung in polarer und azimutaler Richtung zu erreichen. Tabelle 3.1 gibt die Größen der Driftzellen und ihre Anzahl pro Kammer an.

Ebene	Institute	Aktive Kanäle/Modul	Zell Größe (x) [mm]	Zell Größe (z) [mm]
I	GSI	1006	5	5
II	DUBNA	1104	6	5
III	FZR	1098	12	8
IV	Orsay	1159	14	10

Tabelle 3.1: *Anzahl der Signaldrähte der Driftkammern und Größe der Driftzellen. Die asymetrie der Zellen in Ebene III und IV führt zu einer Inhomogenität der Driftgeschwindigkeitsverteilung (vgl Abbildung 6.15).*

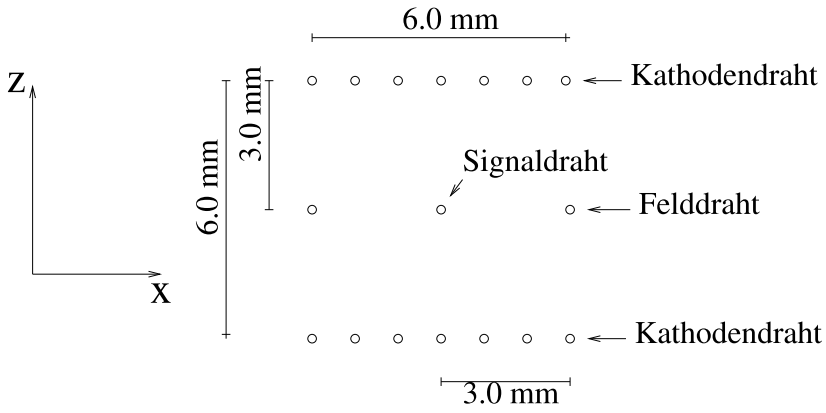

Abbildung 3.8: *Schematischer Aufbau der Driftzellen.*

In Abbildung 3.8 ist der schematische Aufbau einer Driftzelle dargestellt, wie sie für die Simulationen verwendet wird. In den realisierten Kammern verlaufen die Kathodendrähte entlang der Höhe der trapezförmigen Kammern und damit senkrecht zu den 0° - Ebenen. Die sich daraus ergebenden Feldgeometrien werden in [Mar04a] mit denen aus [Zen97] verglichen. Ein signifikanter Unterschied ließ sich nicht feststellen.

Für die Rekonstruktion des Ortes, an dem das Teilchen die Kammer durchquert hat, sind eigentlich drei Ebenen Signaldrähte ausreichend. Die Redundanz ist aber aus Gründen der Effizienz der Kammern, sowie zur Reduzierung der Vieldeutigkeiten nötig, die durch Mehrfachtreffer entstehen können. Durch die Messung der Driftzeiten, der beim Durchgang eines geladenen Teilchens entstehenden Elektronencluster, kann die Entfernung des Teilchens vom Signaldraht bestimmt werden. Aus den Kreuzungspunkten aller Signaldrähte, die ein Signal gesehen haben, kann unter Zuhilfenahme der Driftzeiten der Durchgangspunkt der Teilchenspur mit der geforderten Genauigkeit bestimmt werden.

Die Drahtwinkel der sechs Ebenen wurden so gewählt, daß die Auflösung in polarer Richtung, in die die Teilchen aufgrund der Geometrie des Magnetfeldes hauptsächlich abgelenkt werden, optimiert ist. Wie bereits in [Zen97] gezeigt, und in [Mar04a] detailliert studiert, ist das elektrische Feld und damit die Driftgeschwindigkeit nicht im gesamten Volumen einer Zelle konstant. Dies limitiert die Ortsauflösung der Kammern. Abbildung 6.14 und 6.15 zeigen die Driftgeschwindigkeitsverteilung für die vier Ebenen.

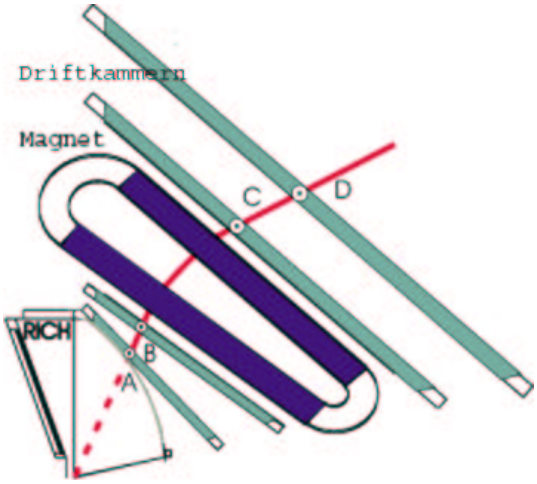

Abbildung 3.9: *Durch Bestimmung von vier Punkten auf der Bahn eines Teilchens kann der Impuls ermittelt werden. Aus [Lip00]*

Spurverfolgung

Für die Rekonstruktion der Teilchenimpulse ist es erforderlich, den Ort und die Richtung der Teilchenspuren vor und hinter dem Magnetfeld zu kennen. Das Prinzip zeigt Abbildung 3.9. Das Magnetfeld erstreckt sich bis in den Bereich zwischen den inneren und äußeren Kammern (siehe Abschnitt 3.1.1 und Abbildung 3.3). In erster Näherung kann dieses Feld für die Spurverfolgung vernachlässigt werden. Dies erlaubt die Annahme, daß die Teilchen zwischen den inneren und den äußeren Kammern auf geraden Bahnen fliegen.

Zur Bestimmung der Orte, an denen ein Teilchen durch die Kammern hindurchgeflogen ist, werden die Signaldrähte, die ein Signal geliefert haben auf eine Ebene projiziert. Diese Ebene wird je nach Anforderung an verschiedenen Stellen positioniert. Sollen die Treffer für jede Kammer unabhängig bestimmt werden, so wird die Projektionsebene in der Ebene der Kathode zwischen den beiden 0° Lagen jeder Kammer positioniert und die Position aller getroffenen Signaldrähte dieser Kammer auf sie projiziert.
Für den Fall, daß eine Zuordnung der Treffer jeweils in den beiden inneren und den beiden äußeren Kammern notwendig ist, wird die Projektionsebene in die Mitte zwischen die beiden inneren bzw. äußeren Kammern plaziert. Die Positionen aller getroffenen Signaldrähte der beiden Kammern werden auf diese Ebene projiziert.

An den Orten auf der Ebene, an denen sich eine Mindestanzahl an Drähten kreuzt, ist ein Teilchen hindurchgeflogen. Im ersten Fall (unabhängige Kammern) beträgt die Mindestanzahl an getroffenen Drähten fünf. Im zweiten Fall sollte die Mindestanzahl an Drähten zehn sein, fünf pro Kammer. Durch den Ausfall von Teilen der Ausleseelektronik kann es jedoch Gebiete in einer Kammer geben, wo weniger als vier Lagen zu einem Treffer beitragen können. In diesem Fall wird im Anschluß daran noch eine Suche in jeder der beiden Kammern individuell aber mit herabgesetzter Mindestanzahl durchgeführt.

Im Falle der individuellen Suche ist der Kreuzungspunkt der Drähte in der Projektionsebene der Ort des Treffers. Bei der kombinierten Suche werden die einzelnen Treffer der beiden Kammern auf die Ebene projiziert, wobei für beide Kammern eine Mindestanzahl an Signaldrähten von fünf gefordert wird. Bei dieser Projektion wird angenommen, daß die Teilchenspur vom Target ausgeht. Die Region, in der sich zwei Treffer von je einer der beiden Kammern überlappen, wird als Ort des Treffers auf die beiden Kammern zurückprojiziert.

Die erste Methode (unabhängige Suche) wird hauptsächlich im Rahmen des Alignments eingesetzt. Die andere Methode liefert bereits eine erste Näherung für ein Bahnsegment für jedes Teilchen. Die Zuordnung der beiden Bahnsegmente zueinander findet im Rahmen der Impulsbestimmung statt.

Die Hauptquelle für Elektronen und Positronen sind Paare aus Konversion oder dem π^0-Dalitz-Zerfall bei denen der Impuls eines Leptons häufig gering, und deshalb die Ablenkung so groß ist, daß es die äußeren Kammern nicht mehr erreicht. In der Regel ist der Öffnungswinkel des Paares aber groß genug, um das Elektron und Positron schon in der zweiten Ebene der Driftkammern als getrennte Treffer zu erkennen.
Die Spuren dieser e^+-e^--Paare sind Teil des Untergrundes, der aus den Daten herausgefiltert werden sollte. Dies wird detailiert in [Bie04] diskutiert.

Multiplizitäten und Doppeltreffer

In zentralen Au + Au-Stößen erwartet man etwa 25 geladene Teilchen pro Sektor, von denen die meisten unter kleinen Polarwinkeln auftreten. In diesem Bereich ist daher die Wahrscheinlichkeit, daß eine Driftzelle sowohl von einem e^+ / e^-, als auch von einem Proton oder Pion durchquert wird, nicht mehr vernachläßigbar. Tritt das zweite Teilchen innerhalb der Doppeltrefferauflösung des TDC-Chips in die Zelle ein, so wird nur die Driftzeit der erzeugten Elektronen des Teilchens registriert, dessen Elektronen näher am Signaldraht erzeugt wurden. Dadurch kann die Information dieser Zelle nur eingeschränkt für die Spurrekonstruktion verwendet werden.

Anhand der Signallänge (TAT (→ **Time above threshold**)) kann dieser Fall erkannt werden. Wenn jedoch die Elektronen des Teilchens, dessen Elektronen weiter weg vom Signaldraht erzeugt wurden, erst eintreffen nachdem das Signal des ersten Teilchens wieder unter die Schwelle des verwendeten Diskriminators abgesunken ist, so wird dieses Teilchen überhaupt nicht registriert.

Für die innerste Ebene der Driftkammern mit einer Zellgröße von 5 mm beträgt die Doppeltrefferwahrscheinlichkeit 35 %. Derselbe Wert ergibt sich für alle anderen Ebenen, obwohl die Teilchendichte pro Fläche abnimmt, je weiter entfernt die Kammer vom Target ist. Da jedoch auch die Zellgröße von Ebene I bis zu Ebene IV zunimmt (sie Tabelle 3.1), bleibt die Wahrscheinlichkeit für Doppeltreffer konstant.

3.3 Konzept des Triggers

Das HADES Triggersystem besteht aus zwei Stufen. Für die erste Stufe werden anhand der Teilchenmultiplizität im TOF - Detektor zentrale Reaktionen ausgewählt, sofern eine Reaktion im Target stattgefunden hat, was durch die Antikoinzidenz des Signals von Start - und Veto - Detektor angezeigt wird. Eine Verknüpfung des Multiplizitätstriggersignales mit dem Zeitsignal der Start - Veto - Detektor - Antikoinzidenz wird für die Flugzeitmessung von TOF und TOFINO und die Driftzeitbestimmung der MDC - Detektoren verwendet.

Für die zweite Triggerstufe werden im RICH -, TOF - und SHOWER - Detektor $e^{\pm}$ anhand ihrer spezifischen Signaturen (Ring im RICH, Schauer Charakteristik und Flugzeit im TOF) gesucht und ihre Position bestimmt. Die Korrelation dieser Positionen anhand ihres Azimuthwinkels liefert Trefferkombinationen, die zu einem $e^{\pm}$ gehören. Werden mindestens zwei solche Kombinationen gefunden, so enthält das Ereignis ein Di - Elektron.

Durch die erste Triggerstufe wird die Digitalisierung des Ereignisses veranlaßt. Die Ereignisrate von 10^8 Teilchen pro Sekunde im Strahl, von denen 10^6 zu einer Wechselwirkung im Target führen, werden dadurch um einen Faktor 10 auf 10^5 getriggerte (LVL 1) Ereignisse gesenkt. Durch die zweite Triggerstufe wird die Rate um einen weiteren Faktor hundert reduziert.

Die bei einem Ereignis enstehenden Datenmengen sind bei dieser Rate von modernen Speichermedien handhabbar. Das ursprüngliche Konzept des Triggers sah noch eine dritte Stufe vor, die in einem Bereich nach Spuren von Di - Elektronen in den Driftkammern suchen sollte, der durch RICH - bzw. META - Detektor anhand der Position der Treffer definiert wird. Dadurch können unkorrelierte Elektronenkandidaten verworfen werden. Dies sind zum

Beispiel niederenergetische Leptonen im RICH, vorallem aber hochenergetische Pionen im TOF - Detektor.

Nur ein eindeutig identifiziertes Di - Elektronenpaar sollte dann als Trigger für die Speicherung des Ereignisses sorgen. Aufgrund der fortschreitenden technischen Entwicklung bei der Kapazität von Festplatten und Magnetbändern kann diese Triggerstufe allerdings entfallen. Dadurch gewinnt man zusätzliche Sicherheit, da bei Fehlern im Triggercode Verluste von Ereignissen mit Di - Elektronen auftreten können.

Kapitel 4

Datenaufnahme des MDC - Subsystems

4.1 Anforderungen

Aus den zu untersuchenden physikalischen Fragestellungen (siehe Kapitel 2) und dem Aufbau des Spektrometers (siehe Kapitel 3) resultieren hohe Anforderungen an die Ausleseelektronik.
Die Tatsache, daß mit dem HADES - Spektrometer hauptsächlich seltene Proben untersucht werden sollen, erfordert hohe Wechselwirkungsraten, die wiederum nur eine sehr kurze Zeitspanne für die Auslese der Daten zulassen. Für eine Strahlintensität von 10^8 Teilchen pro Sekunde im Strahl mit einer Rate von 10^5 registrierten Stößen ergibt sich eine maximale Zeit von $10\,\mu$s pro Ereignis, die zur Digitalisierung und Auslese der Daten zur Verfügung steht. Diese Daten werden allerdings nur über einen Multiplizitätstrigger selektiert und sind nicht mit Di - Elektronen angereichert. Diese werden erst in der zweiten Triggerstufe selektiert, wodurch ein Zwischenspeichern der Ereignisdaten bis zum Eintreffen der Entscheidung des LVL 2 - Triggers erforderlich ist. Die Zeitspanne hierfür beträgt etwa $150\,\mu$s, woraus eine Tiefe von ≈ 16 Ereignissen für den Puffer der Daten in der ersten Triggerstufe resultiert.

Als zweite Randbedingung für den Aufbau der Elektronik erfordert der zur Verfügung stehende Platz direkt am Detektor im Fall der Driftkammern eine sehr kompakte Bauweise. Die komplette Elektronik zum Digitalisieren der Daten muß im Schatten der Spulenkästen untergebracht werden, um die geometrische Akzeptanz nicht einzuschränken.
In konventioneller Bauweise würden die Signale aller 27.000 Kanäle vom Detektor weg zur Ausleseelektronik geführt. Das ist aus Platzgründen für die benötigten Kabel und wegen der Probleme mit Laufzeitunterschieden der Signale auf den Kabeln nicht sinnvoll. Daher erfolgt die Digitalisierung direkt am Detektor.

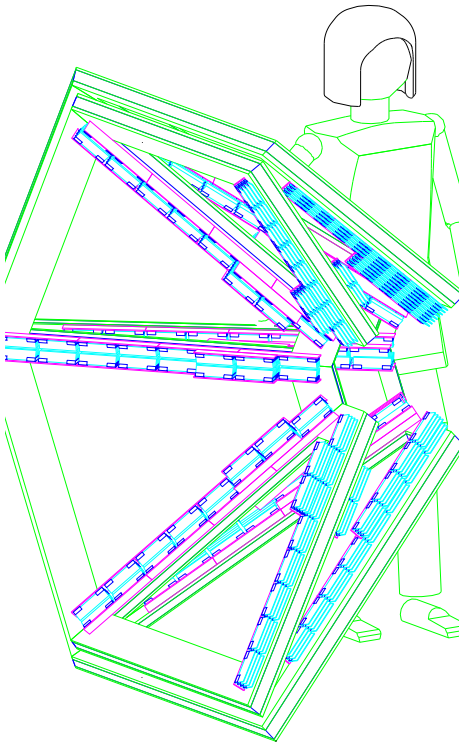

Abbildung 4.1: *Zwischen den Modulen der Ebene I und II ist nur wenig Platz für die Montage der Ausleseelektronik. Gezeigt ist die Montageposition der Elektronik auf den Seitenrahmen der Driftkammern in geneigter Anordnung. Sie liegt dadurch weitgehend im Schatten der Magnetspulen, um zu vermeiden, daß die Elektronik in das aktive Volumen des Detektors hineinragt.*

Die Elektronik muß so plaziert werden können, daß sie nicht in das aktive Volumen des Detektors hineinragt, um zusätzlichen Untergrund durch Vielfachstreuung auszuschließen. Abbildung 4.1 verdeutlicht die Platzsituation im Bereich zwischen den Driftkammern der Ebenen I und II. Vor der Ebene I befindet sich der RICH - Detektor. Seine Druckschale hat in der Mitte der Kammern nur wenig Abstand ($< 1\,\mathrm{cm}$) von der Fensterfolie der Driftkammer. Die Ausleseelektronik kommt der Druckschale bis auf wenige Millimeter ($\approx 3\,\mathrm{mm}$) nahe.

Aufgrund der kompakten Bauweise und der Platzierung direkt am Detektor ergibt sich zudem die Forderung nach möglichst geringer Leistungsaufnahme der Elektronik, da eine Kühlung nur begrenzt möglich ist. Für den Einbau

von Kühlkörpern ist z. B. auf den TDC - Chips kein Platz vorhanden, da diese in das aktive Volumen der Kammern hineinragen würden, wodurch die Akzeptanz eingeschränkt würde. Darauf wird in Abschnitt 4.3 näher eingegangen.

Diese Randbedingungen erfordern eine hohe Integrationsdichte der Elektronik unter Verwendung von flexibel konfigurierbaren Logikbausteinen und DSP (→ **Digital - Signal - Processor**) - Bausteinen, um sie an geänderte Anforderungen für die unterschiedlichen Bedingungen der zu untersuchenden Fragestellungen anpassen zu können. Die Programmierung der Logikbausteine wird im Anhang A diskutiert, die Programme der DSP's in Abschnitt 4.5.1 und 4.5.2.

4.2 Aufbau der Ausleseelektronik

In Abbildung 4.2 ist das Schema der MDC - Auslese dargestellt. Das System besteht in der Reihenfolge des Datenflusses aus den folgenden Komponenten:

- Front - End - Elektronik (FEE, → **Front - End - Elektronik**)
  Bestehend aus:
  - Daughterboard (DBO, → **Daughterboard**)
    (Analogelektronik)
  - Motherboard (MBO, → **Motherboard**)
    (Zeitmessung, Digitalisierung)
- Read - Out - Controller (ROC, → **Read - Out - Controller**)
  (Level 1 - Pipe - Verwalter)
- Concentrator (HACON, → **Concentrator**)
  (Busumsetzer VME nach GTB (→ **Geräte Treiber Bus**))
- Trigger - Receiver (DTR, → **Trigger - Receiver**)
  (Busumsetzer Triggerbus nach VME)
- Steuerungs - und Auslese - Modul (SAM, → **Steuerungs - und Auslese - Modul**)
  (Level 2 - Pipe - Verwalter; Sub - Event - Builder (→ **Sub - Event - Builder**))
- Detector Trigger Unit (DTU, → **Detector Trigger Unit**)
  (Schnittstelle zum globalen Triggerbus)

Die Verbindung zwischen Motherboard und Read - Out - Kontroller wird über die Level 1 - Busse hergestellt. Dabei werden bis zu 3 Motherboards über einen Bus verbunden, wie in Abbildung 4.3 dargestellt. Die Anzahl der Motherboards

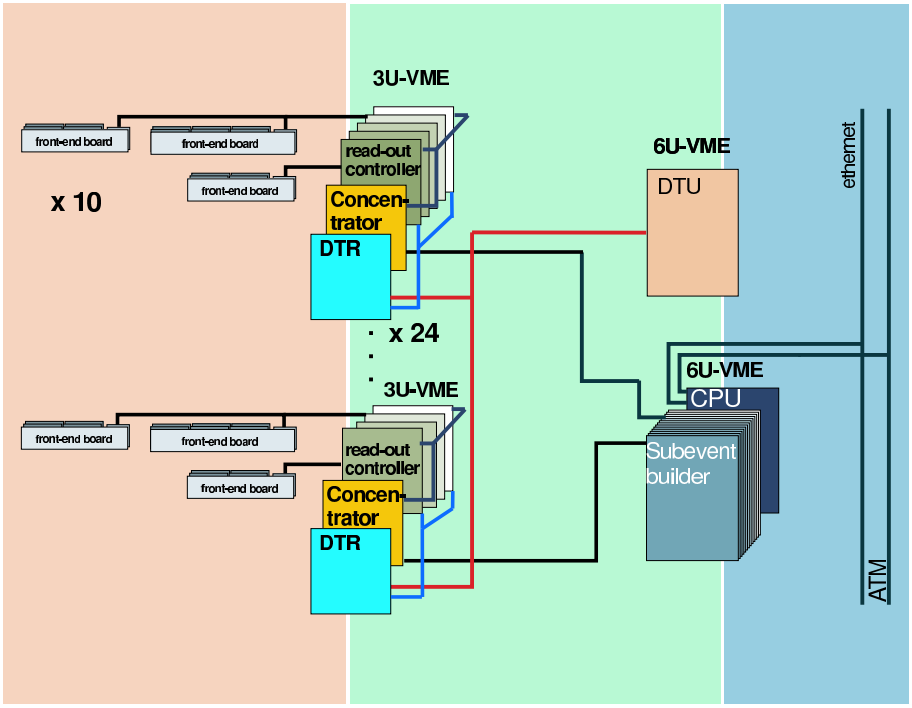

Abbildung 4.2: *Schema der MDC-Auslese. Der Hintergrund kennzeichnet jeweils den Triggerlevel, zu dem die Daten in den Modulen im Vordergrund gehören. Aus [Pac03].*

pro Level 1-Bus ist so gewählt, daß im Mittel über jeden Bus die gleiche Anzahl an Datenworten pro Ereignis übertragen wird. Dadurch reduziert sich die Anzahl der benötigten Bussysteme von 16 (Gesamtanzahl der Motherboards einer Kammer) auf 10, da Motherboards, für die eine geringe Datenrate erwartet wird, zusammengeschaltet werden.

Die fünf Read-Out-Kontroller, die die Daten einer Driftkammer auslesen, sind in einem 3 Unit hohen VME-Crate zusammengefaßt. In jedem dieser 24 Crates befindet sich noch je ein Trigger-Reciever und ein Konzentratormodul. Dieses Modul stellt über den GTB-Bus die Verbindung zu den SAM-Modulen her.

4.2.1 Daughterboard

Aufgabe der Daughterboards ist die Aufbereitung des analogen Signals der Signaldrähte der Driftkammern in ein digitales Signal, das zur Zeitmessung verwendet werden kann. Eine Kette aus Verstärker, Pulsformer und Schwellwert-Diskriminator bereiten das Eingangssignal auf. Die Eingänge sind über Schutzdioden geerdet, um bei Spannungsüberschlägen in der Kammer die Elek-

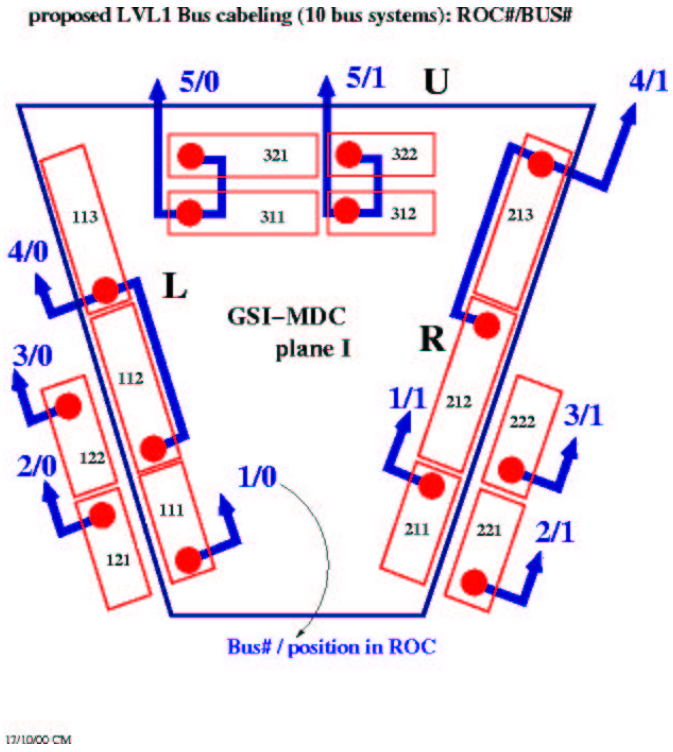

Abbildung 4.3: *Konzept der Level 1 - Busse am Beispiel der Ebene I. Alle 6 Kammern einer Ebene sind identisch verkabelt. ([Mü03])*

tronik vor den dann fließenden hohen Strömen zu schützen. Das Ausgangssignal wird in ein Signal nach GTL (→ **Gunning Transceiver Logic**) - Standard umgewandelt, damit es direkt zur Steuerung der Zeitmessung mittels der TDC - Chips auf den Motherboards verwendet werden kann.

Die Kette vom Verstärker über den Pulsformer zum Schwellendiskriminator ist in einem Chip mit acht Kanälen realisiert (ASD [New93]). Dieser Chip ist auf geringen Stromverbrauch($\approx 15\,\mathrm{mW}$/Kanal) bei gleichzeitig schneller Anstiegszeit ($\approx 5\,\mathrm{ns}$) und guter Doppelpulsauflösung von $\approx 20\,\mathrm{ns}$ ausgelegt (siehe [New93]).

In Abbildung 4.4 ist das Schaltbild für einen Kanal der Analogelektronik wiedergegeben. Dem differentiellen Verstärker (AMPL) wird das Signal der Kammer am Eingang IN+ zugeführt. Die Leitung vom Eingang IN- wird parallel zur Signalleitung bis zur Kammer geführt. Dadurch wirken sich Störsignale in gleicher Weise auf beide Eingänge des Verstärkers aus und haben somit keinen Einfluß auf das Ausgangssignal. Für den Fall, daß in der Kammer ein Hochspannungsüberschlag stattfindet, werden die dann fließenden Ströme über die Schutzdioden gegen Erde abgeleitet.

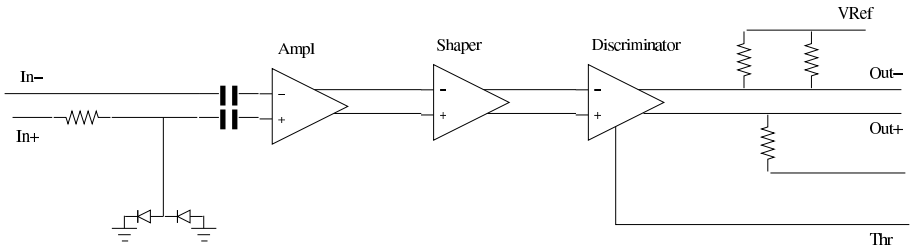

Abbildung 4.4: *Schaltbild eines Kanals der Analogelektronik auf den Daughterboards. An der Leitung IN+ ist der Signaldraht der Driftkammer angeschlossen. IN- wird bis zum Anschlußpunkt der Kammer geführt, hängt dort aber freifloatend. Die beiden Dioden links unten sind Schutzdioden. Die Leitung THR führt die Thresholdspannung zu, VRef ist die Referenzspannung zur Erzeugung des GTL Pegels.*

Der Pulsformer glättet den Verlauf des verstärkten Signals durch Integration, damit der nachfolgende Diskriminator nicht durch starke Signalschwankungen mehrfach schaltet. Der Diskriminator vergleicht den Pegel des Eingangssignals mit der eingestellten Schwelle und liefert immer dann ein Signal am Ausgang, solange das Eingangssignal oberhalb der Schwelle liegt. Durch Bestimmen der Zeit zwischen den beiden Flanken dieses Signales und dem Referenzsignal des Triggersystemes erhält man zwei Zeiten pro Signal.
Mittels der Spannung VRef wird der GTL - Pegel für die TDC - Eingänge erzeugt. Nicht dargestellt sind alle Infrastrukturelemente der Schaltung.

Jedes Daughterboard enthält zwei ASD8 - Chips mit je acht Kanälen und versorgt somit 2 TDC - Chips mit Eingangssignalen. Da alle 16 Kanäle auf einem Daughterboard dieselbe Thresholdspannung bekommen, mußten die Chips so ausgewählt werden, daß die Reaktion der beiden Chips auf einem Board auf eine Änderung der Thresholdspannung nahezu gleich ist.
Die digitalen Ausgangssignale der Diskriminatoren werden über einen Summenverstärker als COR (→ **Common Or**) - Signal an die Motherboards weitergeleitet. Dadurch liegt am Ausgang ein Signal an, sobald eines der Eingangssignale oberhalb der Schwelle liegt.

4.2.2 Motherboard

Die in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Analogkarten liefern für jeden Draht der Driftkammer ein Signal, das zur Weiterverarbeitung mit einem Digitalbaustein geeignet ist. Dieses Signal wird in die auf den Motherboards sitzenden TDC (→ **Time to Digital Converter**) - Chips eingespeist. Die Zeit zwischen diesem

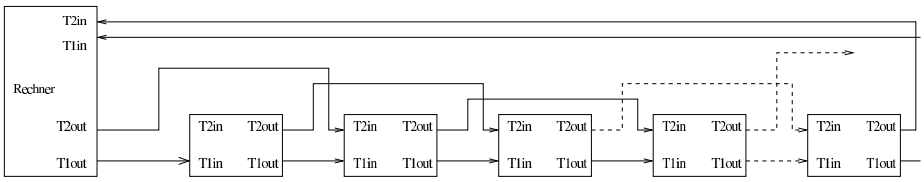

Abbildung 4.5: *Blockschaltbild der TDC - Kette. Auf diese Weise können bis zu 15 TDC - Chips zusammengeschaltet werden. Nach [Gle96].*

Signal und dem über die LVL1 (→ **Level 1 - Bus**) - Busse verteilten CMS (→ **Common - Stop - Signal**) - Signal wird von den TDC - Chips gemessen. Die Umsetzung der Zeitdauer in digitale Information erfolgt durch den Meßkreis des TDC - Chips, der in Anhang D beschrieben ist.

Die Digitalisierung der Signale findet innerhalb der TDC - Chips ohne Einfluß durch Steuersignale von außen statt. Lediglich zur Auslese und zur Initialisierung der Chips werden externe Signale benötigt. Diese werden von einem CPLD (→ **Complex Programable Logic Device**) erzeugt, der auch das Multiplexen der Datenleitungen und Adressleitungen auf den Level 1 - Bus vornimmt. Dazu wurden 11 Daten mit 7 Adressleitungen auf 9 Busleitungen umgesetzt.

Die Auslese der TDC - Chips auf den Motherboards erfolgt im sogenannten Token - Modus (→ **Token - Modus**). Dabei wird ein Signal durch den ROC an den ersten TDC einer Kette angelegt. Dieser sendet daraufhin seine Daten und reicht dann das Signal an den nächsten TDC - Chip weiter. Am Ende der Kette wird das Signal entweder an das nächste Motherboard weitergereicht oder an den Read - Out -Kontroller zurückgeschickt, wodurch das Ende der Auslese signalisiert wird. In Abbildung 4.5 ist das verwendete Prinzip dargestellt.

Die Initialisierung erfolgt hingegen im CS - Mode (→ **Chip - Select Mode**). Dabei wird jedes einzelne Register der TDC - Chips vom DSP des Read - Out - Kontrollers direkt adressiert und beschrieben. Das Auslesen dieser Register ist allerdings nur im Token - Modus möglich. Die Bedeutung der Register ist im Anhang C erläutert. Dort ist auch die Initialisierungssequenz für die Motherboards erklärt. Die TDC - Chips sind im Normalzustand im Modus Token - Read - Out. Sie werden nur während eines Kalibrationstriggers in den Modus Chip - Select geschaltet. Die Funktionsweise des TDC - Chips ist in [Gle96] erläutert.

Abbildung 4.6 zeigt das Blockdiagramm der Motherboards. Zur Ansteuerung der TDC - Chips dient ein CPLD - Chip. Der Takt, der zur Erzeugung des Signaltimings auf dem Level 1 - Bus gebraucht wird, wird durch einen Clockchip mit einer Frequenz von 50 MHz erzeugt. Diese wird durch den CPLD auf 5 MHz

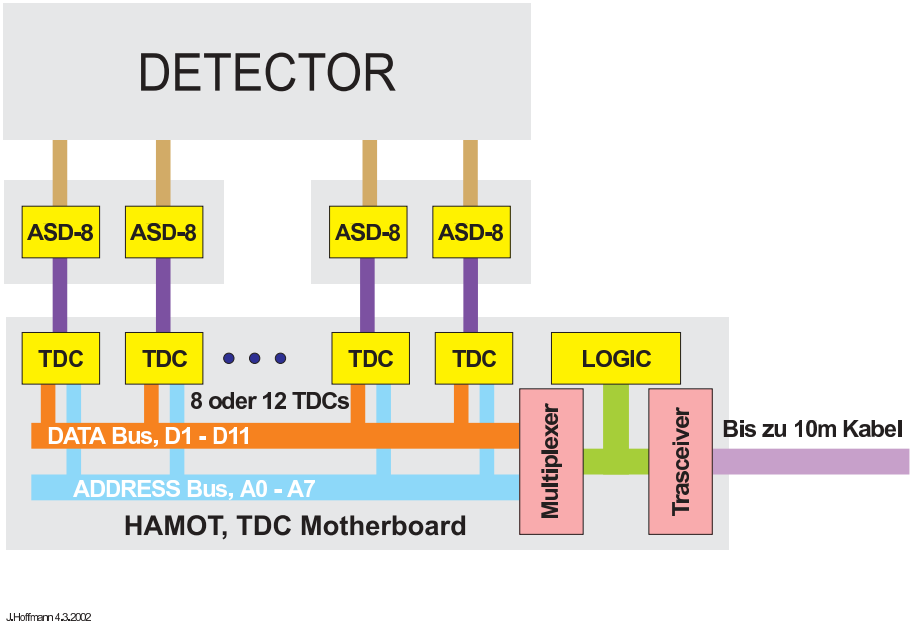

Abbildung 4.6: *Blockschaltbild des Motherboards (HAMOT - Hades motherboard). Zwischen dem Detektor und dem Motherboard sitzen die Daughterboards mit den ASD8 - Chips. ([Hof03])*

heruntergeteilt und den TDC - Chips zugeführt, die dann daraus die intern benötigte Frequenz von 50 MHz erzeugen. Das Signal der Clockleitung kann über die Eingänge der Daughterboards einkoppeln und dadurch zu korrelierten Signalen führen.

Die Thresholds, die für die Schwellendiskriminatoren auf den Daughterboards benötigt werden, erzeugt ein DAC (→ **Digital to Analog Converter**) - Chip. Für jedes Daughterboard wird ein eigener Kanal des DAC - Chips verwendet. Dadurch haben je 16 Kanäle des Motherboards die gleiche Schwelle.
Das von den Daughterboards kommende "Common Or" - Signal wird über einen Summierverstärker über den Level 1 - Bus an die Read - Out - Kontroller weitergeleitet.

Die Verbindung der Motherboards mit dem Level 1 - Bus geschieht über spezielle Treiberkarten, auf denen sich die nötigen Verstärkerchips befinden. Verwendet wird ein differentielles Niederspannungssignal, das auch in der Computertechnik für schnelle Bussysteme (SCSI) verwendet wird.

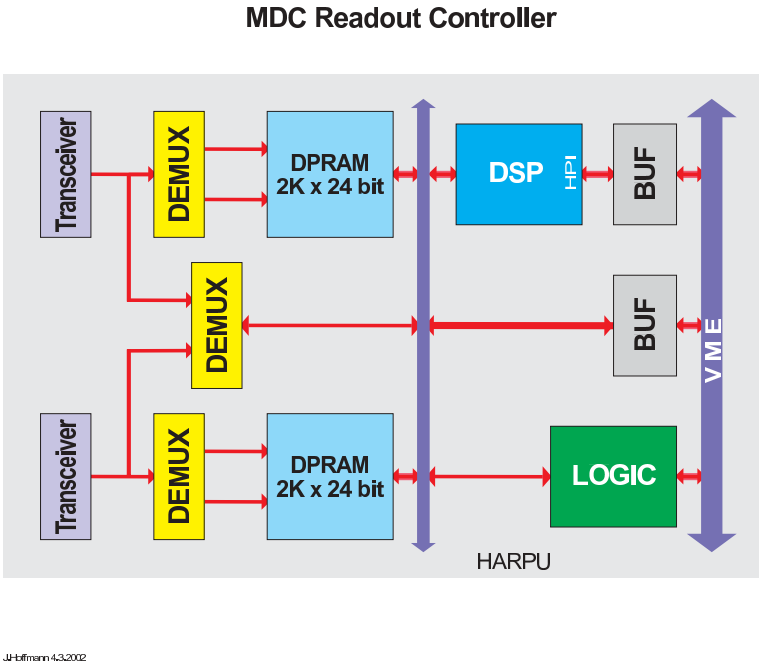

Abbildung 4.7: *Blockschaltbild des Read - Out - Kontrollermoduls. Die Transceiver verbinden den Read - Out - Kontroller mit den Motherboards über den Level 1 - Bus. Die Daten der Motherboards werden in den beiden DPRAM Blöcken zwischengespeichert. Der VME Bus verbindet die Read - Out - Kontroller untereinander und mit dem Konzentrator und dem Trigger - Modul.([Hof03])*

4.2.3 Read - Out - Kontroller

Der Read - Out - Kontroller besitzt zwei Level 1 - Bussysteme. Über jeden Bus können bis zu drei Motherboards ausgelesen werden. Die Steuerung der Auslese erfolgt durch einen DSP (→ **Digital - Signal - Processor**), unterstützt durch einen SRAM (→ **Statischer Speicher**) - CPLD. Dieser muß nach dem Einschalten der Spannungsversorgung neu programmiert werden. Dafür befindet sich auf dem ROC ein weiterer fest programmierter CPLD für die Steuerung der Programmierung des Haupt - CPLD's.

Abbildung 4.7 zeigt das Blockdiagramm des Read - Out - Kontroller - Moduls. Die Daten werden von den Motherboards automatisch in den beiden DPRAM - Blöcken abgelegt. Die Adressierung dieser Speicher geschieht durch einen Zähler, der in der Logik implementiert ist. Der Zähler wird durch das Strobesignal inkrementiert, das von den Motherboards gesendet wird, sobald ein Datenwort auf dem Bus anliegt. Die Steuerung des Datentransfers auf dem Backplane - Bus (VME) wird durch den DSP durchgeführt. Sein Programm wird in Abschnitt 4.4.1 diskutiert.

Mode	RES	TOK	MOD	WRM	Bedeutung
Reset	0	0	0	0	Reset des Motherboards
Init	0	0	1	0	Initialisierung der TDC Adressen
Setr	1	1	0	1	Auslese der TDC Setup Daten
Acq	1	1	1	1	Auslese der Zeitdaten
Trd	1	0	0	1	Token Auslese Modus
Tstw	0	1	0	0	Test Modus zum Schreiben
Tstr	0	1	0	1	Test Modus zum Lesen
Jtag	0	0	1	1	JTAG Test und Programmierung
Skip	0	1	1	0	Übergehe den Defekten TDC Chip

Tabelle 4.1: *Bedeutung der vier Modeleitungen auf dem Level 1-Bus. Die Spalten RES, TOK, MOD und WRM geben jeweils den Pegel der entsprechenden Modeleitung an.(nach [Hof98a].)*

Der DSP wird über ein serielles Interface programmiert. Dieses ist in Abbildung 4.7 mit HPI[1] bezeichnet. Über diese Schnittstelle ist es auch möglich, mit dem DSP zu kommunizieren, während er sein Programm ausführt.

Level 1-Bus

Die Daten zwischen Motherboard und Read-Out-Kontroller werden auf dem Level 1-Bus in Form differentieller Niederspannungssignale[2] übertragen. Die Pegel der Signalleitungen sind so gewählt, daß im normalen Betrieb der Stromverbrauch der Treiberbausteine minimal ist.

Der Bus besitzt 9 Datenleitungen, 3 Adressleitungen zur Selektion des Motherboards in der Kette, 4 Modeleitungen, mit denen die Motherboards gesteuert werden, eine Leitung für das Tokensignal zur Auslese, Common-Stop- und Common-Or-Signale und einen JTAG (→ **Joint Test Action Group**)-Bus, der zur Programmierung der CPLD-Chips auf den Motherboards verwendet wird.

In Tabelle 4.1 ist die Bedeutung der vier Modeleitungen des Level 1-Busses aufgeführt. Nicht alle möglichen Kombinationen sind in der Logik auch implementiert. Der "Token-Auslese-Modus" ist der Standartmodus des Level 1-Bus. In diesem Modus werden die Daten vom Motherboard zum Read-Out-Kontroller übertragen. Der "Test-Modus zum Schreiben" wid zum Beschreiben der TDC-Register bei der Initalisierung verwendet.

[1] Host-Port-Interface
[2] LVDS-Low voltage differential signal

Da die Daten der Motherboards auf den Leitungen im Multiplexverfahren übertragen werden, müssen sie auf der Seite der Read-Out-Kontroller den richtigen Blöcken im Speicher zugeordnet werden. Dies geschieht, indem jedes der beiden Teile in einen eigenen Speicherbaustein geschrieben wird. Bei der Auslese der Daten zum Weitertransport sind sie dann richtig zusammengesetzt.

Level 1-Pipe

Für jeden der beiden Level 1-Busse gibt es ein eigenes 2 Kilobyte großes RAM für die Daten. In diesen werden die Daten der TDC-Chips bei der Auslese im Token-Modus abgespeichert. Die Adressierung des Speichers geschieht durch ein Register in der Logik, das durch die Strobeleitung des Level 1-Busses inkrementiert wird. Der Puffer wird in Form eines Ringpuffers verwaltet, in dem jeweils nach dem Abschluß der Auslese, die durch die Rückkehr des Tokens vom letzten Motherboard signalisiert wird, die Adressregister ausgelesen werden, und diese Information als Anfangsadresse des nächsten Ereignisses gespeichert wird. Durch Subtraktion der Anfangsadresse des Ereignisses von der Endadresse ergibt sich die Anzahl der geschriebenen Datenworte.

Backplane-Bus

Alle Read-Out-Kontroller eines Auslesecrates sind über den Backplanebus miteinander verbunden. Über diesen Bus erhalten sie das CMS-Signal, das sie an die Motherboards weiterleiten. Daneben erreichen die Triggerinformationen über diesen Bus die Register des CPLD-Chips. Diese werden direkt vom Triggermodul auf den Bus geschrieben und parallel an alle Read-Out-Kontroller verteilt. Der ROC selber sendet die Busy-Signale auf den Triggerleitungen, sowie ein COR (→ **Common Or**)-Signal, das eine *ODER*-Verknüpfung aller Signale der Ausgänge der Daughterboards ist. Zur Steuerung der Logik des Moduls dienen vier Steuerleitungen (Mode Leitungen).

Während der Initialisierunsphase bekommt der DSP ein Programm geladen, das die Auslese steuert und die Behandlung der Daten regelt (siehe Abschnitt 4.4.1). Die Daten werden von den Motherboards auf Anforderung durch den DSP automatisch in ein DPRAM (→ **Dual-Ported-Ram**) geschrieben. Das Adressierungsregister des Speichers wird dabei durch die Strobeleitung des Level 1-Busses inkrementiert.

Bei Eintreffen eines positiven LVL 2-Triggersignals sendet der DSP die zu diesem Ereignis gehörigen Daten an das SAM-Modul weiter, sobald er durch ein Token dazu aufgefordert wird. Dabei wird aus den zwei 16 Bit-Worten, die vom Motherboard gesendet wurden, ein 32 Bit-Wort zusammengebaut und zusätzlich noch die Adresse des ROC, sowie die Information, von welchem Level 1-Bus das

Datenwort kam, hineincodiert (siehe Abschnitt 4.5.1). Die Information, welches Ereignis gesendet werden soll, erhält der DSP aus einem Register in der Logik, in welches diese vom Triggermodul (siehe Abschnitt 4.2.5) geschrieben wurde.

4.2.4 Konzentrator

Das Konzentratormodul stellt die Schnittstelle zwischen den Read-Out-Kontrollern und den SAM-Modulen dar. Aus den LVDS (→ **Low voltage differential signal**)-Signalen des GTB-Busses werden TTL (→ **Transistor-Transistor Logik**)-Signale für den VME (→ **Versa Module Europ**)-Bus erzeugt und umgekehrt, wobei durch die Logik gleichzeitig für das richtige Timing gesorgt wird.

Über zwei Anschlüsse werden die Signale COR (→ **Common Or**) und Busy (→ **Busy**) aus den VME-Crates herausgeführt. Bei diesem Busy-Signal handelt es sich um das gemeinsame LVL 1-Busy Signal aller ROC im Crate.

4.2.5 Trigger-Modul

Aufgabe der Trigger-Module ist es, die Kommunikation des Auslesecrates mit dem HADES-Triggersystem durchzuführen. Die Triggersignale des lokalen Triggerbusses werden auf die Backplane des Auslesecrates umgesetzt. Im Gegenzug werden die BUSY- und ERROR-Signale von der Backplane auf den Triggerbus gelegt. Die Logik des Moduls verlangt, daß die Trigger auf dem Triggerbus von der DTU für Level 1 und Level 2 zeitlich getrennt ankommen, da auf der Backplane die gleichen Datenleitungen für die Triggerinformationen verwendet werden. Eine Unterscheidung zwischen Level 1- und Level 2-Informationen findet nur über die Strobeleitung statt, die der Logik anzeigt, wann ein gültiges Datenwort auf dem Bus anliegt, und zu welchem Trigger es gehört. Über einen Anschluß wird das für die Zeitmessung benötigte CMS-Signal den ROC zugeführt, das parallel an alle Read-Out-Kontroller im Crate verteilt wird.

4.2.6 SAM

Das Steuerungs- und Auslese-Modul (SAM) ist in der MDC-Auslesekette der Sub-Event-Builder (→ **Sub-Event-Builder**). Seine Aufgabe ist es, bei Eintreffen eines positiven Level 2-Triggers die Daten der angeschlossenen Kammern anzufordern und in einem Speicher zu puffern, bis sie vom Ausleseprozess angefordert werden.

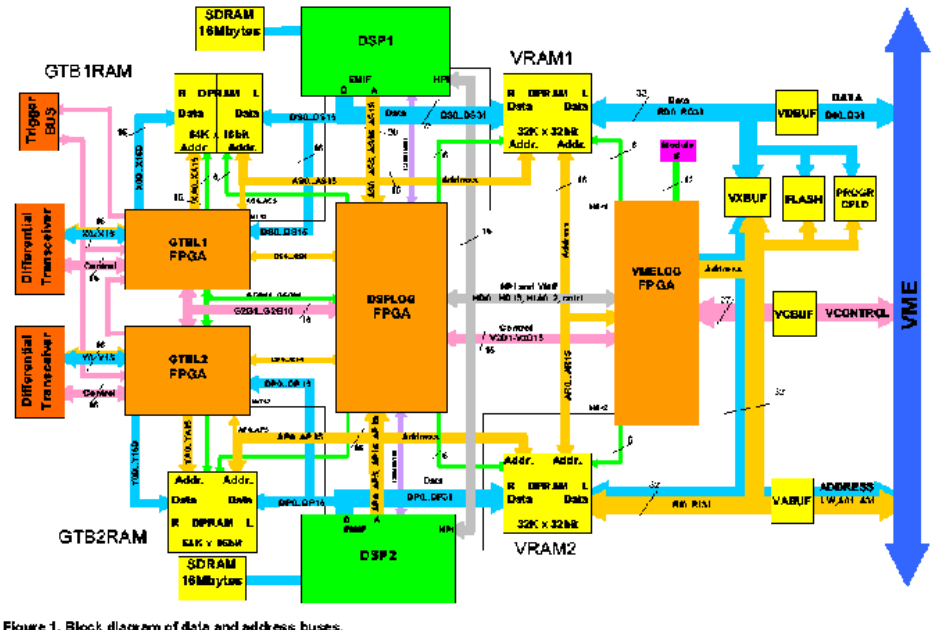

Abbildung 4.8: *Datenbus des SAM - Moduls. Die Speichergrößen sind in Kilobyte angegeben, die Organisation des Speichers führt aber dazu, daß im Falle des CRAM und des X/Y-RAMS effektiv weniger zur Verfügung steht(vgl. Text) [Hof02].*

Das SAM - Modul besitzt zwei DSP, die unabhängig voneinander mit je einem GTB - Port arbeiten. Die Eingangspuffer sind $64\text{k} \times 16\,\text{Bit}$ groß. Der Ausgangspuffer ist 32k Worte groß. Dies erfordert eine Größenbegrenzung auf der Ebene der Read - Out - Kontroller, die berücksichtigt, daß Ereignisse, bei denen sämtliche Signaldrähte ansprechen, die maximale Größe übersteigen können.

Jeder der DSP's hat einen Pufferspeicher von 16 MB zur Verfügung. Dieser Speicher kann allerdings nicht vollständig für die Level 2 - Pipe genutzt werden. Das Konzept der Datenaufnahme erfordert, daß alle Detektorsysteme innerhalb einer begrenzten Zeitspanne die Daten zu einem Ereignis übertragen haben. Sollte dies nicht der Fall sein, so wird das Ereignis verworfen. Ein zu großer Puffer verlängert die Zeitspanne während der das SAM - Modul in der Lage ist Ereignisse zwischenzuspeichern.

Die Triggerbus - Schnittstelle ermöglicht ein Hardware - Busy. Das bedeutet, daß ein eintreffender Trigger automatisch durch ein Flip - Flop mit einem Setzen des Busy - Signales beantwortet wird.

Die VME-Logik unterstützt DMA (→ **Direct Memory Access**)-Modus zur schnelleren Auslese der Module. Dadurch haben die DSP-Chips Resourcen frei für andere Aufgaben(vgl. 4.8).

Die vom LVL 2-Trigger als positiv getriggerten Ereignisse werden vom SAM im Ausgangspuffer bereitgestellt, von wo sie der Ausleseprozeß abholt, der auf der VME-CPU läuft. Dies geschieht im DMA-Modus. Beim Kopieren der Ereignisdaten vom X- bzw. Y-RAM in das V-RAM müssen vom DSP je zwei 16bit-Worte zu einem 32bit-Wort zusammengesetzt werden. Zusätzlich werden noch Informationen über das Modul, welches die Daten bearbeitet, in das Datenwort kopiert. Dadurch wird der Analysesoftware die eindeutige Zuordnung eines Datenwortes zu einem Detektormodul ermöglicht.

4.2.7 Detektor-Trigger-Modul

Das Detektor-Trigger-Modul wird ausführlich in [Lin01] beschrieben. Die vom globalen HADES-Triggerbus gelieferten Signale werden von der DTU über den lokalen Triggerbus an die Front-End-Elektronik (FEE) weitergeleitet. Im Falle des LVL 1-Triggers wird dieser sofort weitergereicht und gleichzeitig ein BUSY1-Signal an die CTU (→ **Central Trigger Unit**) gesendet. Dieses Signal wird für eine Mindestdauer gesetzt, damit die FEE Zeit hat, das Signal selber zu setzen. Die Wegnahme des Signals geschieht nach einer einstellbaren Zeit automatisch, sofern die FEE das Signal nicht selber gesetzt hat. Dieses überlagert das von der DTU erzeugte Busy-Signal und wird von der FEE weggenommen, sobald die Auslese der MBO's fertig ist.

Im Falle des Level 2-Triggers wird dieser in einem FIFO (→ **First in, First out**) zwischengespeichert bis das System in der Lage ist, den nächsten Trigger abzuarbeiten. Die Weiterleitung eines LVL 2-Triggers an das SAM-Modul veranlaßt gleichzeitig über ein Flip-Flop das Setzen des BUSY 2-Signals. Dieses Signal kann nur durch ein Signal von den SAM-Modulen gelöscht werden, wie bereits in Abschnitt 4.2.6 erläutert.

Neben den Triggersignalen werden über den Triggerbus auch der Triggertyp und ein Triggertag übertragen. Der Triggertyp kennzeichnet die Art des auszulesenden Ereignisses (Kalibrierung, Minimum Bias etc. vgl. Tabelle 4.4). Durch das Triggertag im Level 1-Bus bekommt jedes Ereignis eine eindeutige, fortlaufende Nummer zugewiesen. Diese Nummer wird vom Eventbuilder verwendet, um die verschiedenen Sub-Ereignisse der einzelnen Subeventbuilder einander zuordnen zu können.
Im Level 2-Bus dient das Triggertag der Identifizierung des auszulesenden Ereignisses. Da im LVL 2-Trigger eine Untersetzung stattfinden soll, wird zusätzlich noch eine Information über die Triggerentscheidung übertragen. Dies

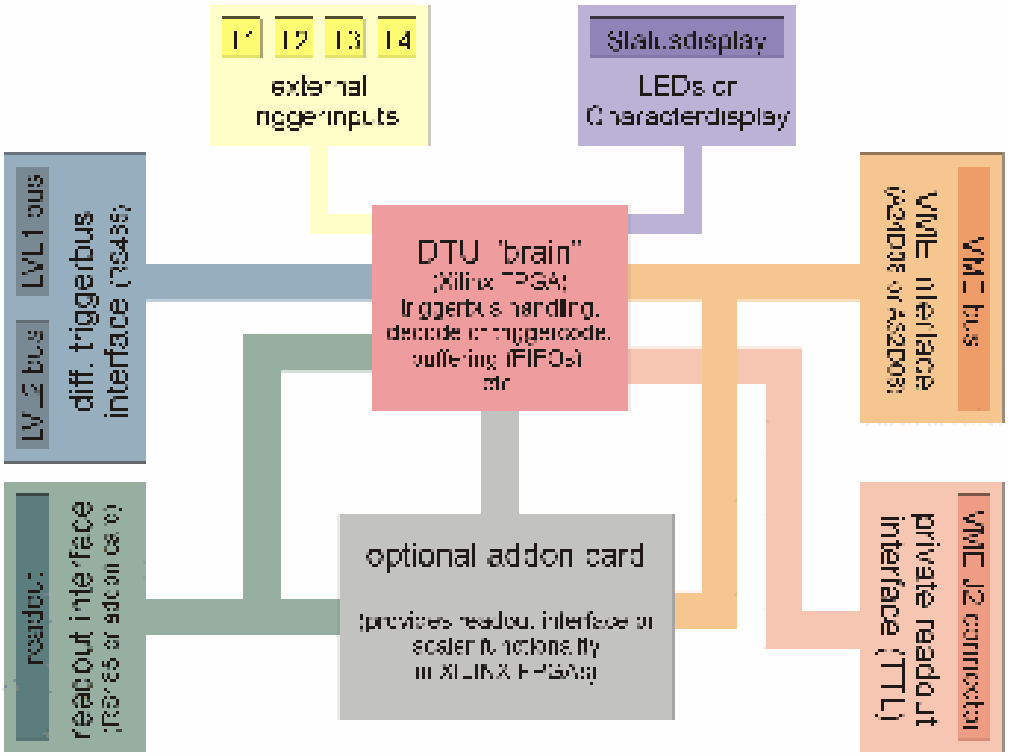

Abbildung 4.9: *Prinzipieller Aufbau der DTU ([Lin01]).*

geschieht über das höchste Bit des Triggertyps. Dieses Bit verwendet inverse Logik. Ein gesetztes Bit bedeutet also eine negative Triggerentscheidung und führt zum Verwerfen des Ereignisses.

Der LVL 2 - Trigger wird mit seinen kompletten Informationen an die ROC geleitet. An die SAM - Module wird nur die Triggerentscheidung und das Triggersignal weitergeleitet. Von den ROC - Modulen erhält die DTU das BUSY - Signal des LVL 1 - Triggers und reicht dieses sofort weiter an die CTU (→ **Central Trigger Unit**). Von den SAM - Modulen erhält sie das BUSY - Signal des LVL 2 - Triggers. Solange dieses anliegt, wird kein weiterer LVL 2 - Trigger an das Subsystem geschickt, auch wenn einer im internen LVL 2 - Trigger Fifo vorliegt. Wenn dieses Fifo voll ist, wird das LVL 2 - BUSY - Signal an die CTU weitergereicht, um das weitere Versenden von LVL 2 - Triggern anzuhalten (siehe Abschnitt4.2.6).

Ebene	November 2002	September 2003	Kanäle pro Modul
1	131 mW / ch	129 mW / ch	1006
2	118 mW / ch	118 mW / ch	1104
3	105 mW / ch	130 mW / ch	1098
4	138 mW / ch	125 mW / ch	1159

Tabelle 4.2: *Leistungsaufnahme der Front-End-Elektronik im Vergleich zwischen den Strahlzeiten vom November 2002 und Oktober 2003. Angegeben in mW pro Kanal. Die Angaben beruhen auf den Messungen aus Tabelle 4.3.*

4.3 Leistungsaufnahme und Kühlung

Kritisch ist die Leistungsaufnahme nur für die Module der Front-End-Elektronik, da sie direkt am Detektor angebracht sind. Für alle anderen Module ist die Leistungsaufnahme unkritisch, da sie in Bereichen angebracht sind, in denen eine effektive Kühlung möglich ist. In Tabelle 4.3 ist die Leistungsaufnahme der gesamten Front-End-Elektronik angegeben im Vergleich für zwei verschiedene Strahlzeiten.

Tabelle 4.2 listet die umgesetzte Leistung pro Kanal für alle vier Ebenen auf. Die Angaben beruhen auf den Daten von Tabelle 4.3. Es fällt auf, daß in Ebene IV die Leistungsaufnahme deutlich gesunken ist, und im Gegensatz dazu in Ebene III eine deutlich höhere Leistungsaufnahme zu verzeichnen ist.

In beiden Ebenen wurden zwei zusätzliche Kammern eingebaut. Dabei wurden die Karten zur Spannungsverteilung für die Ebene III ausgetauscht, da die ursprüngliche Version die Spannungen nicht auf dem gewünschten Pegel stabil hielt. Die Spannungen wurden auch nachgeregelt, da sie aufgrund der höheren Leistungsaufnahme abgesunken waren.

Durch die Verlustleistung, die in Form einer Erwärmung der elektronischen Komponenten auftritt, kann im schlimmsten Fall eine Zerstörung eintreten. Im Falle der TDC-Chips hat sie allerdings einen direkten Einfluß auf die Messung, da die Auflösung des TDC-Meßkreises von der Temperatur des Chips abhängt (siehe Anhang D). Es ist deshalb im Interesse einer hohen Meßgenauigkeit von großer Wichtigkeit, die Temperatur des TDC-Chips möglichst konstant zu halten. Die Ableitung der Wärme geschieht in Form von elektromagnetischer Strahlung, durch welche die umgebende Luft erwärmt wird. Diese führt die Wärme durch Konvektion vom TDC-Chip weg. Die dabei abgeführte Wärme reicht allerdings nicht aus, um die Temperatur des TDC-Chips konstant zu halten. Da die abgegebene Leistung durch Strahlung von der Größe der

Ebene I; 6 Kammern						
	November 2002			September 2003		
LV	U[V]	I[A]	I[A]/module	U[V]	I[A]	I[A]/module
ROC+5	5.16	37.0	6.2	5.16	35.9	6.0
FEE+5	5.67	55.8	9.3	5.67	55.1	9.2
DB +3	3.65	36.2	6.0	3.65	36.2	6.0
DB -3	3.60	36.2	6.0	3.60	36.2	6.0
DB +1	1.37	14.8	2.5	1.37	14.8	2.5
Ebene II; 6 Kammern						
	November 2002			September 2003		
ROC+5	5.14	33.2	5.5	5.14	32.8	5.5
FEE+5	5.65	53.3	8.9	5.69	53.7	9.0
DB +3	3.80	38.0	6.3	3.80	38.0	6.3
DB -3	3.68	38.0	6.3	3.68	38.0	6.3
DB +1	1.52	16.1	2.7	1.52	15.7	2.6
Ebene III						
	November 2002; 4 Kammern			September 2003: 6 Kammern		
ROC+5	5.16	24.7	6.2	5.16	35.1	5.9
FEE+5	5.82	41.0	10.5	5.82	57.2	9.5
DB +3	3.90	28.7	7.2	3.90	41.6	6.9
DB -3	3.67	28.9	7.2	3.67	40.5	6.8
DB +1	1.58	12.2	3.0	1.74	16.6	2.8
Ebene IV						
	November 2002; 2 Kammern			September 2003: 4 Kammern		
ROC+5	5.22	12.7	6.4	5.22	24.1	6.0
FEE+5	5.782	23.0	11.5	5.64	40.4	10.1
DB +3	3.76	15.5	7.8	3.76	29.0	7.3
DB -3	3.53	15.2	7.6	3.45	28.2	7.1
DB +1	1.58	5.8	2.9	1.58	11.7	2.9

Tabelle 4.3: *Leistungsaufnahme der Front - End - Elektronik im Vergleich zwischen den Strahlzeiten vom November 2002 und September 2003. Die Messungen wurden vor der Strahlzeit jeweils bei laufender Datenaufnahme durchgeführt, um eine realistische Belastung des Systems zu haben. Getriggert wurde das System mit einem Noisepulser mit Nachbildung der Spillstruktur. Bedeutung der Spannungen: ROC → Read - Out Kontroller; FEE → Motherboard; DB → Daughterboard*

strahlenden Fläche abhängt, kann die Effizienz der Kühlung durch Anbringen eines Kühlkörpers verbessert werden. Dies ist für die äußeren Kammern kein Problem, da hier aufgrund der großen zur Verfügung stehenden Fläche auf den Kammerrahmen und des großen Abstandes zwischen den Kammern genug Luft vorhanden ist, um die Wärme abzuführen. Für die inneren Kammern reicht die natürliche Konvektion nicht aus, sodaß zusätzlich durch Ventilatoren für Bewegung der Luft gesorgt wird.

Allerdings reicht diese Methode zur Kühlung nicht aus, um die Temperatur konstant genug zu halten. Die Auflösung des TDC-Meßkreises ändert sich um $0{,}21 \pm 0{,}001\,^{\circ}/_{\circ\circ}$ pro Kelvin. Dies erfordert eine Stabilisierung der Temperatur auf $\pm\,1\,^{\circ}$ genau. Daher muß über weitere Methoden zur Kühlung nachgedacht werden. Dies wird im Abschnitt 4.8 diskutiert.
Die Auflösung des TDC-Meßkreises ändert sich um $0{,}2 \pm 0{,}01\,^{\circ}/_{\circ\circ}$ pro mV, was eine sehr präzise Stabilisierung der Versorgungsspannung erfordert. Dazu eignen sich am besten aktive Spannungsregler, die aber aufgrund der Störungen, die sie auf der Versorgungsspannung verursachen, nicht eingesetzt werden können.

4.4 Ablauf der Auslese

Die Auslese des MDC-Systems wird durch das globale HADES-Triggersystem gesteuert. Die Detektor-Triggereinheit (DTU) ist mit der zentralen Triggereinheit (CTU) über den HADES-Triggerbus verbunden. Dieser besteht, getrennt in Level 1- und Level 2-Bus, aus je einer 16-adrigen Flachbandleitung, über die mit differentiellen Niederspannungssignalen die Triggerinformationen übertragen werden. Die Detektor-Trigger-Einheit verteilt diese Signale auf den Front-End-Triggerbus, der zu den Auslesecrates mit den Read-Out-Kontrollern führt, und den SAM-Triggerbus, der die SAM-Module mit den LVL 2-Triggerinformationen versorgt. Über den Front-End-Triggerbus werden die Informationen von beiden Triggerlevels übertragen.
Der LVL 1-Trigger wird aus den Teilchenmultiplizitäten der Flugzeitwand abgeleitet ([Lin01], [Toi04]). Für die Schwerionenreaktionen wird eine Multiplizität von mindestens 4 gefordert. Der LVL 2-Trigger wird hingegen aus einer Korrelation von Treffern in der Flugzeitwand und Ringen im RICH-Detektor gebildet([Toi04]). Zu diesem Zweck müssen diese beiden Detektorsysteme ausgelesen und in den Daten die Koordinaten der Treffer ermittelt werden, bevor die Daten zu einem Modul übertragen werden, das nach Korrelationen sucht. Die gesamte Verarbeitung nimmt etwa 150 μs in Anspruch. Für diesen Zeitraum müssen die Daten aller Detektorsysteme zwischengespeichert werden, da erst danach feststeht, ob das Ereignis überhaupt von Interesse ist.

4.4.1 Unterstützte Triggertypen

In Tabelle 4.4 sind die im HADES - Auslesesystem definierten Triggertypen aufgelistet. Im MDC - System sind davon nur die relevanten in der Auslesesoftware implementiert. Dazu gehören die folgenden Trigger:

1. Begin run (0xd)
2. End run (0xe)
3. Norm1 (0x1)
4. Spec1 (0x6)

Dabei wird der Trigger "Spec1" zur Kalibrierung des Systems benutzt. Seine Frequenz ist so eingestellt, daß sichergestellt ist, daß eine ausreichende Zahl von Triggern während des Spills durchkommt, und gleichzeitig gewährleistet ist, daß das System in den Spillpausen nicht auskühlt. Der Trigger "Norm1" ist der Standart - Trigger, mit dem die Daten eines Ereignisses aus der Front - End - Hardware ausgelesen und im Level 1 - Puffer zwischengespeichert werden, bis der zugehörige LVL 2 - Trigger eintrifft.

Mit den Triggern "Begin run" und "End run" wird jeweils der Anfang und das Ende der Datenaufnahme signalisiert. Dabei ist festgelegt, daß der Anfangstrigger das Trigger - Tag für das erste Ereignis überträgt und die Front - End - Elektronik meßbereit schaltet. Mit jedem danach folgenden Trigger "Norm1" bzw. "Spec1" wird dann das Trigger - Tag für das nachfolgende Ereignis übertragen. Der "End run" - Trigger muß sicherstellen, daß alle noch in den Puffern befindlichen Ereignisse ausgelesen werden können.

Der Unterschied in den Triggernummern zwischen LVL 1 - und LVL 2 - Triggern rührt von der Tatsache, daß beim LVL 2 die Triggerentscheidung im Triggertyp übertragen wird. Die in Tabelle 4.4 als "ILLEGAL" gekennzeichneten Trigger sind ausgeschlossen, da ihre Binärdarstellung keine eindeutige Aussage enthält.

4.4.2 Datenfluß

Mit dem Eintreffen eines Signals am Meßeingang des TDC - Chips beginnt dieser mit der Zeitmessung. Diese läuft bis entweder die maximal eingestellte Zeitspanne verstrichen ist oder ein CMS - Signal eintrifft. Dieses wird vom Triggersystem aus dem Signal des Startdetektors erzeugt, wenn gleichzeitig die Zentralitätsbedingung erfüllt ist, welche aus den Multiplizitäten in der Flugzeitwand abgeleitet werden. Zusammen mit dem CMS - Signal erzeugt das Triggersystem einen LVL 1 - Trigger, der über die DTU an die Front - End - Hardware verteilt wird. Die Read - Out - Kontroller warten auf das Eintreffen

LVL1 bus						LVL2 bus	
Code	Name	Bedeutung	Quelle	Ereignis	(+)	(-)	Name	Ereignis
0x0	ILLEGAL	—	—	Fehler	—	—	—	—
0x1	NORM1	Erzeuge Daten	Lemo (1)	Daten	0x1	0x9	NORM	Folge der Entscheidung
0x2	NORM2	Erzeuge Daten	Lemo (5)	Daten	0x1	0x9	NORM	Folge der Entscheidung
0x3	NORM3	Erzeuge Daten	Lemo (6)	Daten	0x1	0x9	NORM	Folge der Entscheidung
0x4	NORM4	Erzeuge Daten	Lemo (7)	Daten	0x1	0x9	NORM	Folge der Entscheidung
0x5	NORM5	Erzeuge Daten	Lemo (8)	Daten	0x1	0x9	NORM	Folge der Entscheidung
0x6	SPEC1	—	Lemo (9)	Kalibration	0x2	0xa	SPEC1	Entscheide selbst
0x7	SPEC2	0,1Hz. off spill	Lemo (10)	Kalibration	0x3	0xb	SPEC2	Entscheide selbst
0x8	SPEC3	—	Lemo (10)	Kalibration	0x4	0xc	SPEC3	Entscheide selbst
0x9	SPEC4	10Hz	Lemo (11)	Kalibration	0x5	0xd	SPEC4	Entscheide selbst
0xa	SPEC5	—	Lemo (12)	Kalibration	0x6	0xe	SPEC5	Entscheide selbst
0xb	ILLEGAL	—	—	Fehler	—	—	—	—
0xc	ILLEGAL	—	—	Fehler	—	—	—	—
0xd	Begin run	Verteile erstes Tag	Software	speichere Tag	—	—	—	—
0xe	End run	—	Leere Pipes	—	—	—	—	—
0xf	ILLEGAL	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	0x0	0x8	ILLEGAL	Fehler
—	—	—	—	—	0x7	0xf	ILLEGAL	Fehler

Tabelle 4.4: *HADES Trigger Typen. Nach [Bö99]*

dieses Signales und starten danach die Auslese der Motherboards, indem sie das Tokensignal in die TDC - Kette einspeisen. Die TDC - Chips befinden sich ständig im Token - Auslese - Modus. In diesem Modus übertragen sie die Informationen aus den Zeitdatenregistern aller Kanäle bei Eintreffen eines Tokensignals, sofern in den zugehörigen Hitregistern ein Hit eingetragen ist. Der Chip legt die Kanalinformation als 14 - Bit - Datenwort zusammen mit der Chipadresse, der Kanalnummer und der Hitnummer auf den Datenbus und erzeugt ein Strobe - Signal. Dadurch wird die Logik des Motherboards veranlaßt, die Information vom Bus zu lesen und in zwei Blöcken auf den Level 1 - Bus zu übertragen. Jeder dieser Datenblöcke benötigt 100 ns, weshalb der TDC - Chip nach jedem Datenwort 200 ns warten muß, bevor er das nächste senden darf. Hat der TDC alle Daten übertragen, oder gar keine zum Versenden gespeichert, so reicht er das Token an den nächsten Chip in der Kette weiter. Der letzte Chip auf einem Motherboard schickt das Signal über die "Token return" - Leitung weiter. Auf der Bustreiberkarte ist diese Leitung mit der "Token in" - Leitung des nächsten Motherboards verbunden, sofern es sich nicht um das letzte Motherboard in einer Kette handelt. In diesem Fall wird das Signal an den Read - Out - Kontroller weitergereicht. Dieser erkennt am Eintreffen des "Token return" - Signals das Ende der Auslese und ermittelt nun die Ereignislänge. Danach wird noch das LVL 1 - Busy Signal vom Triggerbus weggenommen, das bei Eintreffen des LVL 1 - Triggers durch die Hardware automatisch gesetzt wurde.

Im Read - Out - Kontroller wird jedes Datenwort wieder zusammengesetzt, indem beide Teile in unterschiedlichen Bänken eines Speichers abgelegt werden. Zusätzlich schreibt die Hardware automatisch die Busnummer des Level 1 - Busses und die Adresse des Read - Out - Kontrollers in den Speicher. Nach Abschluß der Datenübertragung ist der Read - Out - Kontroller bereit, das nächste Ereignis aufzunehmen. Trifft vorher ein LVL 2 - Triggersignal ein, so wird dieses registriert und bei Eintreffen des Tokensignals vom SAM - Modul abgearbeitet, indem die Daten als 16 Bit - Worte auf die Backplane geschrieben werden. Der Konzentrator liest die Daten von der Backplane und überträgt sie über den GTB - Bus zum SAM - Modul. Dort werden sie im Eingangspuffer abgelegt. Gleichzeitig zählt ein Zähler die Anzahl der übertragenen Wörter. Dieser Zähler wird als Adresse für den Eingangspuffer verwendet. Nachdem der letzte Read -Out - Kontroller seine Daten übertragen hat, erhält das SAM - Modul das Token zurück. Daraufhin kopiert es die Daten vom Eingangspuffer in den Level 2 - Puffer und ergänzt das Datenwort um die SAM - Adresse und die GTB - Port - Nummer. Zusätzlich erzeugt das SAM noch den Sub - Ereignis - Kopf (siehe Abschnitt 4.7.2).
Der Ausgabepuffer des SAM - Moduls ist in zwei Hälften geteilt. In die eine Hälfte schreibt das Programm die Daten eines Ereignisses aus dem Hauptspeicher, aus der anderen Hälfte liest die CPU die Daten aus und schickt sie an den Event - Builder.

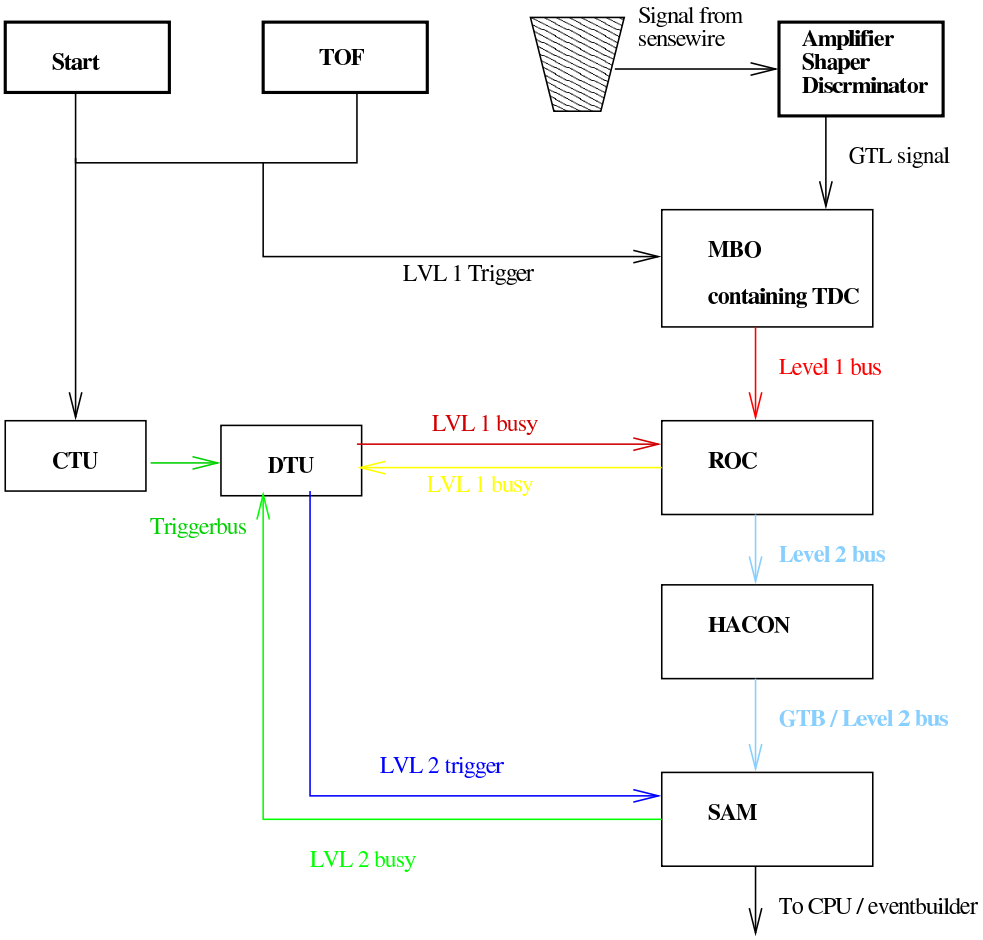

Abbildung 4.10: *Datenfluß im MDC-Datenaufnahmesystem. Jeder Read-Out-Kontroller bedient zwei Level 1-Busse, und jedes SAM-Modul zwei Level 2-Busse.*

4.4.3 Datenraten

Die größten Datenmengen werden bei Reaktionen schwerer Kerne wie z.B. Au + Au, Pb + Pb oder U + U erwartet. Die gesamte Ausleseelektronik ist daher dafür ausgelegt, daß die Totzeit des Systems bei diesen Datenmengen nicht zu groß wird. Durch die zwei Triggerstufen wird eine Ereignisselektion vorgenommen, wodurch die Datenraten reduziert werden.

Für eine Strahlintensität von 10^8 Teilchen pro Sekunde, von denen etwa 10^6 bei einer effektiven Targetdicke von 3,2 mm zu Wechselwirkungen führen, und 190 geladenen Teilchen pro Stoß, die sich auf die 6 Sektoren verteilen ($\rightarrow$ 30 Teilchen pro Sektor) ergibt sich eine Datenmenge von 1,2 GB/s. Durch die zweite Triggerstufe wird diese Datenrate etwa um den Faktor 10-20 reduziert. Sie beträgt

dann noch etwa 120 MB/s. Diese Reduktion ist um einen Faktor 5 - 10 niedriger als vorgesehen, da zum einen der Triggercode nicht auf Effizienz optimiert ist und zum anderen die Bandbreiten heutiger Speichermedien höher sind als zum Zeitpunkt des Designs. Dies führt dazu, daß es möglich ist, einen größeren Anteil an Ereignissen wegzuschreiben, die keine Di - Elektronen enthalten.

4.5 Auslesesoftware

Die eigentliche Steuerung der Datenübertragung wird von DSP - Programmen abgewickelt, die in C geschrieben sind, und mittels spezieller Compiler für den jeweiligen DSP in ausführbaren Code umgewandelt wurden. Diese Programme werden bei der Initialisierung des Systems in die jeweiligen DSP's geladen und zur Ausführung gebracht.
Das letzte Programm in der MDC - Auslesekette ist das Programm auf der VME - CPU, die die Daten aus den SAM - Modulen ausliest und über ATM (→ **Asynchronouse Transfer Mode**) - Netzwerk oder Ethernet zum Event - Builder schickt.

Durch Verändern dieser Programme ist es möglich, das System an die Anforderungen verschiedener physikalischer Fragestellungen anzupassen, zum Beispiel durch unterschiedliche Reaktionen auf verschiedene Triggertypen im Programm des Read - Out - Kontrollers.

4.5.1 DSP - Programm des Read - Out - Kontrollers

Auf dem Read - Out - Kontroller werden die Daten in der sogenannten Level 1 - Pipe zwischengepuffert bis das Ergebnis der LVL 2 - Triggerentscheidung vorliegt. Die Verwaltung dieser Pipe ist die Aufgabe des DSP - Programms des Read - Out - Kontrollers. Dazu wird für jeden Level 1 - Bus des Read - Out - Kontrollers in einem Speicher ein Ringpuffer angelegt, in den die Daten von den Motherboards durch die Hardware geschrieben werden. Nach der Übertragung wird die Länge des Ereignisses ermittelt und in einer Verwaltungsstruktur abgelegt zusammen mit der Triggerinformation und dem Zeiger auf den Anfang des Ereignisses im Speicher. Danach wird das durch die Hardware beim Eintreffen des LVL 1 - Triggers gesetzte Busy - Signal vom Programm wieder gelöscht.

Beim Eintreffen eines LVL 2 - Triggers wird, je nach Status der Triggerentscheidung, entweder der Speicher des Ereignisses freigegeben (negative Entscheidung), oder die Daten des Ereignisses zusammen mit den Sub - Sub - Ereigniskopf Informationen zum SAM - Modul übertragen. Dies geschieht sobald das Token vom SAM - Modul eintrifft.

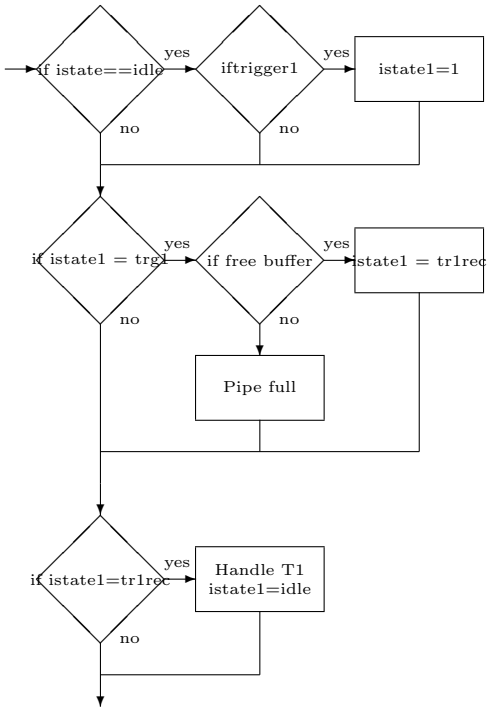

Abbildung 4.11: *Flußdiagramm des Level 1-Triggerteils des ROC-DSP-Codes. Der Ablauf wird mit Abbildung 4.12 fortgesetzt.*

Die Abbildungen 4.11 und 4.12 zeigen die Flußdiagramme der LVLl-1- und LVL 2-Triggerbehandlung des DSP-Codes. Dargestellt ist nur der Ablauf innerhalb der Endlosschleife. Die Initialisierung der internen Variablen und des Speichers geschieht vor dem Eintritt in die Schleife in Abbildung 4.11.

Innerhalb der Schleife wird zunächst geprüft, ob ein LVL 1-Trigger vorliegt. Wenn ja, wird dieser abgearbeitet. Liegt kein LVL 1-Trigger vor, wird geprüft, ob ein LVL 2-Trigger anliegt und dieser abgearbeitet. Liegt kein LVL 2-Trigger vor, so kehrt das Programm an den Anfang der Schleife zurück.

Liegt ein LVL 1-Trigger vor (vgl. Abbildung 4.11), so wird zunächst der aktuelle Stand der Zeiger in den Ringpuffern der Level 1-Puffer gesichert. Dieser wird nach erfolgter Auslese benötigt, um die Größe des Ereignisses zu berechnen. Sollte in der Verwaltungsstruktur für die Ringpuffer noch Platz für das Ereignis sein, so wird die Größe des noch freien Speichers im Ringpuffer berechnet. Sollte dieser ausreichen, um ein Ereignis aufzunehmen, so wird der Typ des anliegenden Triggers ermittelt. Im Falle eines Kalibrierungstriggers wird durch Beschreiben der TDC-Register auf den angeschlossenen Motherboards die Kalibrierung gestartet. Danach folgt, genauso wie bei einem normalen Trigger, die Auslese der Daten.

Im Falle eines “Begin - Run - Triggers” wird eine Initialisierung der Motherboards durchgeführt sowie die Verwaltungsstruktur des Ringpuffers initialisiert. Nach erfolgreicher Auslese wird die Ereignislänge ermittelt indem die Zähler für die Speicheradressierung ausgelesen werden und in der Verwaltungsstruktur gespeichert werden.
Im Falle eines Kalibrationsereignises wird geprüft, ob die Anzahl der übertragenen Datenworte mit der erwarteten Zahl übereinstimmt. Sollte dies nicht der Fall sein, so werden die angeschlossenen Motherboards neu initialisiert. Dadurch soll sichergestellt werden, daß alle Register der TDC - Chips richtig initalisiert sind. Danach wird der Trigger als abgearbeitet markiert und die Motherboards wieder meßbereit geschaltet.

Falls kein Speicher mehr frei ist, wird mit der Abarbeitung des LVL 2 - Triggers fortgefahren. Dasselbe geschieht, wenn die maximale Anzahl an Ereignissen in der Verwaltungsstruktur erreicht ist. Sollte ein ungültiger Triggertyp erkannt werden, so wird dies in der Verwaltungsstruktur vermerkt. Ebenso wird ein Fehler vermerkt, wenn das Token zur Auslese der Motherboards nicht innerhalb einer festen Zeit zurückkommt. Dann ist davon auszugehen, daß der betroffene Level 1 - Bus gestört ist. Sollte dies wiederholt der Fall sein, so erfolgt nach 1000 Ereignissen eine neue Initialisierung auf beiden Level 1 - Bussen. Während der gesamten Schleife zur Abarbeitung des LVL 1 - Triggers liegt das Busy - Signal am Triggerbus an. Dadurch ist sichergestellt, daß kein weiterer Trigger vom Triggersystem gesendet wird.

Bei Eintritt in den Teil, der der Behandlung des LVL 2 - Triggers dient (vgl. Abbildung 4.12), wird zunächst geprüft, ob der Trigger ein “Begin - run” - Trigger war. In diesem Fall gibt es nichts zu tun, und das Programm fährt nach dem Löschen des Triggers mit der Überprüfung auf LVL 1 - Trigger fort.
Wenn ein gültiger LVL 2 - Trigger vorliegt, wird das dazugehörige Triggertag gelesen und ermittelt, ob die Triggerentscheidung positiv oder negativ war. Alle folgenden Schritte werden nur ausgeführt, wenn die Level 1 - Pipe voll ist. Diese Bedingung ist notwendig, um die Synchronisation der Read - Out - Kontroller untereinander sicherzustellen. Ansonsten kann während der Abarbeitung eines LVL 2 - Triggers ein weiterer Trigger eintreffen, der dann nicht erkannt wird.

Im Falle eines positiven LVL 2 -Triggers wird nun die Gesamtlänge des Ereignisses ermittelt, und überprüft, ob die maximale Anzahl an Datenworten für ein einzelnes Ereignis überschritten wird. Sollte dies für einen der beiden Level 1 - Busse der Fall sein, so wird seine Länge auf die maximal mögliche Länge begrenzt und die Daten des anderen Bussystemes komplett verworfen. Ist nur die Summe der beiden Ereignislängen größer als die maximal mögliche, so wird die Länge des Level 1 - Busses begrenzt, der mehr Daten geliefert hat.

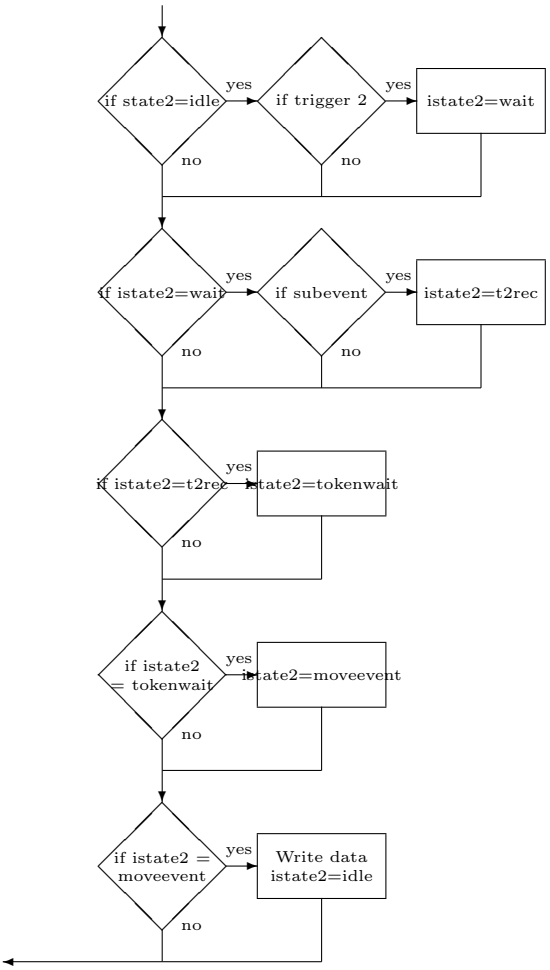

Abbildung 4.12: *Flußdiagramm des Level 2-Triggerteils des ROC-DSP-Codes. Der Ablauf kommt von Abbildung 4.11 und kehrt an den Beginn dieses Teils am Ende zurück.*

Danach wird aus den Daten in einem Zwischenpuffer ein vollständiges MDC-Sub-Sub-Ereignis zusammengestellt. Dies ist notwendig, damit beim späteren Übertragen der Daten zum SAM-Modul der DMA-Modus verwendet werden kann. Danach wartet das Programm bis das Token eintrifft, durch das die Auslese vom SAM-Modul angefordert wird. Nach Eintreffen des Tokens werden die Datenworte nacheinander auf den VME-Bus geschrieben. Nach Abschluß des Schreibvorganges erfolgt die Freigabe des LVL 2-Triggers durch Löschen des Triggerbits.

Die Ereignislänge wird auf 337 Worte begrenzt. Das entspricht der Anzahl der Datenworte für ein Kalibrationsereignis, das von der längsten Kette (bestehend aus zwei Motherboards a 64 Kanälen und einem mit 96 Kanälen) geliefert wird, wenn je TDC-Chip jeweils ein Kanal kalibriert wird.

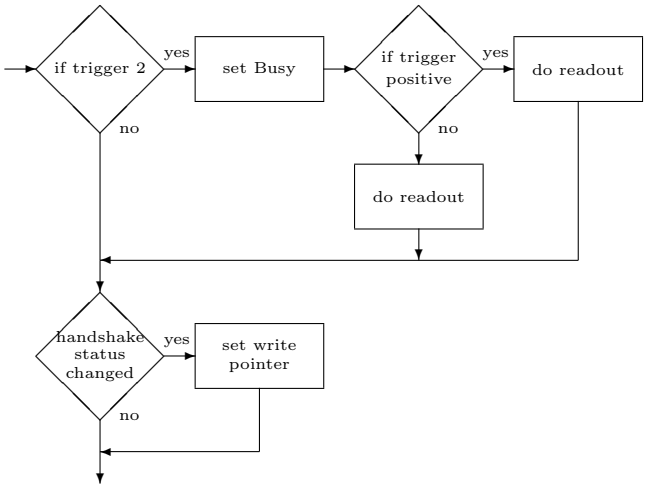

Abbildung 4.13: *Flußdiagramm des Triggerteils des SAM - DSP - Codes. Der Ablauf wird mit Abbildung 4.15 fortgesetzt.*

Für normale Ereignisse sollte diese Grenze nie erreicht werden, es sei denn, starke Störungen treten auf, die nahezu alle Kanäle einer Kammer aktivieren. Diese Datenworte entsprechen keinen realistischen Driftzeiten. Daher werden Datenworte mit Zeitwerten kleiner als 500 Kanäle nicht übertragen.

4.5.2 DSP - Programm des SAM - Moduls

Das DSP - Programm für das SAM - Modul nutzt die Möglichkeiten des eingesetzten DSP's voll aus. Dazu gehört zum Beispiel die Fähigkeit durch Interrupts das Programm zu unterbrechen, um während der Übertragung der Daten aus dem Hauptspeicher in den Ausgabepuffer auf einen LVL 2 - Trigger reagieren zu können. Dieser muß mit höchster Priorität abgearbeitet werden, da sonst der Speicher im Read - Out - Kontroller vollständig gefüllt werden könnte, was die Totzeit im LVL 1 erhöht. Die Übertragung der Daten aus dem Hauptspeicher in den Ausgabepuffer des SAM - Moduls wird durch eine DMA (→ **Direct Memory Access**) - Unit durchgeführt. Dadurch ist der DSP mit diesem Vorgang nicht belastet und hat Resourcen frei, die z.B. zur Komprimierung der Daten genutzt werden können. Die Abbildungen 4.13 und 4.14 sind die Flußdiagramme für den Code des SAM - DSP. Der Ablauf erfolgt in einer Endlosschleife.

Vor dem Eintritt in die Schleife erfolgt die Initialisierung aller internen Variablen und des Speichers, der komplett gelöscht wird, um sicherzustellen, daß nicht alte Ereignisse gelesen werden. Abbildung 4.13 zeigt das Flußdiagramm des Teiles, der für die Behandlung des Triggers zuständig ist.

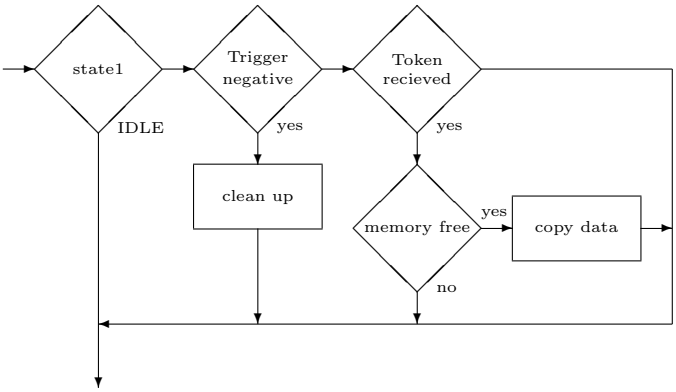

Abbildung 4.14: *Flußdiagramm der Statemaschine zur Behandlung des Triggers im SAM-DSP-Code. Dies ist der Code, der sich in Abbildung 4.13 im Block "do readout" befindet.*

Ist ein Trigger vorhanden, so wird überprüft, ob der Trigger positiv oder negativ war und eine Auslese gestartet, indem das Token auf den GTB-Bus geschickt wird. Wenn die Auslese abgeschlossen ist, wird vom letzten Read-Out-Kontroller das Token an das SAM-Modul zurückgeschickt. Das Programm prüft solange den Status des "Tokenreturn"-Bits im Statusregister bis dieses gesetzt ist. Für einen negativen Trigger wird danach das Token vom GTB-Bus genommen um den Read-Out-Kontrollern das Ende der Auslese zu signalisieren. Im Falle eines positiven Triggers geschieht dies erst, wenn die Daten vom Eingangspuffer in den Hauptspeicher kopiert wurden.

Im nächsten Schritt wird geprüft, ob sich der Status des Handshakebits für den VME-Bus geändert hat. Dieses Bit wird von der CPU gesetzt, wenn sie mit dem Auslesen des Puffers fertig ist. Dadurch signalisiert sie dem Programm, daß sie zum anderen Puffer umschalten will.

Die Statemaschine (→ **Statemaschine**) in Abbildung 4.14 dient zur Behandlung der Trigger. Im Falle eines positiven Triggers wird die Auslese gestartet. Sobald die Auslese abgeschlossen ist, wird dies als neuer Status für die Statemaschine vermerkt. Im nächsten Durchlauf wird sie dann die ausgelesenen Daten behandeln. Im Falle eines negativen Triggers wird, sollte die Auslese bereits abgeschlossen sein, der Status wieder auf "idle" gesetzt und das Busy-Signal vom Triggerbus entfernt. Danach ist das Modul bereit, den nächsten Trigger zu empfangen.

Wurde im vorherigen Durchlauf der Statemaschine der erfolgreiche Abschluß der Auslese erkannt, werden die Daten aus den Eingangspuffern in den Hauptspeicher kopiert. Dabei werden aus zwei 16-Bit-Wörtern jeweils ein 32-Bit-Wort

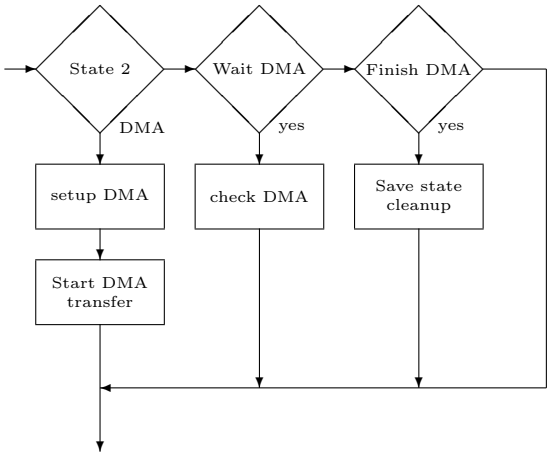

Abbildung 4.15: *Flußdiagramm der Statemaschine zur Behandlung der Komunikation mit der CPU im SAM - DSP - Codes. Am Ende erfolgt ein Rücksprung zum Anfang von Abbildung 4.13.*

zusammengesetzt und gleichzeitig zusätzliche Informationen in das Datenwort codiert. Zusätzlich wird die Subeventstruktur gefüllt. Zuletzt wird das Busy - Signal vom Triggerbus genommen und das Token vom GTB - Bus entfernt.

Die Statemaschine zur Behandlung der Kommunikation mit der CPU aus Abbildung 4.15 prüft das Handshakebit im Status - Register und initiert einen neuen DMA - Transfer. Dieser sorgt für die Übertragung der Daten eines oder mehrerer Ereignisse aus dem Hauptspeicher in den Kommunikationsspeicher. Der nächste Schritt prüft, ob dieser abgeschlossen ist. Daraufhin wird noch die Länge des Datenblocks und ein Decodiermuster in die ersten beiden Wörter des Puffers geschrieben. Durch Setzten eines Bits in einem Register wird danach der CPU signalisiert, daß der neue Puffer zur Auslese bereit ist. Danach kehrt das Programm zum Anfang zurück und ist in der Lage, den nächsten Trigger zu erkennen. Sollte der DMA - Transfer nicht abgeschlossen sein, wird der Status nicht geändert und mit dem Prüfen auf neue Trigger fortgefahren.

4.5.3 Ausleseprogramm der CPU

Aufgabe des Ausleseprogramms auf der CPU ist es, aus allen SAM - Modulen die Daten in den Puffern zu lesen und sie an den Event - Builder weiterzuleiten. Da dieser die Subevents von allen Detektorsystemen innerhalb einer definierten Zeit benötigt, damit das Ereignis als vollständig angesehen werden kann, wird vor der Auslese verlangt, daß alle SAM - Module ein Ereignis in ihren Puffer geschrieben haben. Dadurch wird die Auslese synchronisiert, wodurch sichergestellt ist, daß alle SAM - Module das gleiche Sub - Ereignis im Puffer bereithalten.

Das Lesen der Daten geschieht über Blocktransfer. Dabei wird von der CPU nur der Datentransfer angestoßen. Alle SAM-Module in einem Crate senden dann nacheinander alle Daten aus dem Komunikationsspeicher an die CPU. Ist ein Modul mit der Übertragung fertig, so sendet es ein Token an das nächste Modul, das daraufhin mit der Übertragung anfängt. Das Token vom letzten Modul gelangt zur CPU, die daran das Ende der Auslese erkennt und nun aus den übertragenen Daten ein Sub-Ereignis zusammensetzt.

Die Datenübertragung von der CPU zum Event-Builder geschieht über eine Glasfaserverbindung eines ATM-Netzwerkes oder über Ethernet. Das HADES-Datenaufnahme-System ist detailliert in [Mue02] beschrieben.

4.6 Software zur Hardware-Steuerung

4.6.1 Initialisierungs-Software

Um die Initialisierung des Auslesesystems auch mit einer grafischen Benutzeroberfläche durchführen zu können, wurden Bibliotheken geschrieben, welche die nötigen Funktionen zur Initialisierung, Start, Stop und Reset der Hardware enthalten. Die im Listing 4.1 genannten Funktionen erfüllen diese Aufgaben. Einige dieser Funktionen sind sehr einfach, wie z.B. Sam_start(). Diese Funktion startet den DSP auf einem SAM-Modul. Die Funktion Sam_Init() hingegen ist komplex, da sie alle CPLD-Programme, Setup-Informationen und DSP-Programme laden muß.
Diese Funktionen sind global für alle eingesetzten Hardwaremodule gleich definiert. Unterstützt ein Modul die Funktionalität nicht, so muß die zugehörige Funktion dies in ihrem Rückgabewert signalisieren.

```
int Sam_init(const char *sam_name, const Param *param);
int Sam_loadThresholds(const char *sam_name, const Param *param);
int Sam_reset(const char *sam_name, const Param *param);
int Sam_start(const char *sam_name, const Param *param);
int Sam_stop(const char *sam_name, const Param *param);
int Sam_initialized(const char *sam_name, const Param *param);
int Sam_running(const char *sam_name, const Param *param);
int Sam_lvl1Busy(const char *sam_name, const Param *param);
int Sam_lvl2Busy(const char *sam_name, const Param *param);
int Sam_error(const char *sam_name, const Param *param);
unsigned long int Sam_statusRegister(const char *sam_name,
            const Param *param, const char *reg);
```

Listing 4.1: *Funktionen des SAM-Kontroll-Programmes*

Die Informationen über die zu ladenden Programme, Setupinformationen und zu verwendenden Adressen erhalten die Funktionen mittels einer Parameterbibliothek, die im Moment noch auf Tcl-Dateien zugreift, später aber über EPICS [epi] auf die HADES-Datenbank zugreifen wird.

Sam_Init()

Diese Funktion initialisiert die gesamte, am SAM-Modul angeschlossene Hardware. Dazu führt sie zunächst einen Reset der Hardware durch, indem das Reset-Signal auf den GTB-Bus gelegt wird. Das führt dazu, daß alle Read-Out-Kontroller am GTB-Bus in den Reset-Zustand gehen. In diesem Zustand ist der DSP angehalten, und die Logik wartet auf die Initialisierung. Gleichzeitig wird auch die Logik des Konzentrator-Modules in den Reset Zustand versetzt. Die Initialisierung erfolgt in zwei Schritten.

1. **Schritt**
   Im ersten Schritt der Initialisierung werden das Programm für die SAM-DSP und die DSP und CPLD der Read-Out-Kontroller sowie Initialisierungswerte für die DSP-Programme in den Speicher des SAM-Moduls geladen. Danach wird der DSP des SAM-Moduls gestartet. Dieser führt dann den zweiten Schritt der Initialisierung aus. Danach kehrt diese Funktion zum Aufrufer zurück.

2. **Schritt**
   Zunächst wird die Programmierlogik der Read-Out-Kontroller freigeschaltet, um den Logikbaustein, der die Kontrollogik enthält, programmieren zu können. Das Programmieren des CPLD geschieht, indem die Daten des Programms byteweise auf den GTB-Bus geschrieben werden. Die Bytes werden von der Programmierlogik des Read-Out-Kontrollers in eine serielle Bitfolge umgewandelt und in den CPLD-Baustein geschrieben. Mit dem anschließend überprüften Inhalt des CPLD-Bausteins wird sichergestellt, daß dieser erfolgreich programiert wurde. Im Fehlerfalle wird ein erneuter Ladeversuch durchgeführt. Schlägt auch dieser fehl, so wird der Initialisierungsvorgang abgebrochen.
   Durch entsprechende Signale auf den Mode-Leitungen des GTB-Busses wird die Kontrollogik anschließend initialisiert. Die Initialisierung der Read-Out-Kontroller erfolgt nach einem Wechsel in den entsprechenden Modus des GTB-Busses. Dabei erhält jeder Read-Out-Kontroller eine Adresse zugewiesen, die zur Zuordnung der Daten zu einer Kammer benötigt wird.
   Danach wird das Programm für die Auslese in die DSP der Read-Out-Kontroller geladen. Eine Überprüfung führt im Fehlerfalle zu einem erneuten Ladeversuch. Schlägt auch dieser fehl, so wird der Initialisierungsvorgang abgebrochen. Andernfalls wird mit dem Laden der Initialisierungs- und Kalibrierungsinformationen für die Motherboards fortgefahren. Hat das SAM-Modul hierbei ebenfalls im zweiten Versuch einen Fehler gefunden, so wird die Initialisierung abgebrochen. Bei erfolgreichem Laden wird anschließend der DSP der Read-Out-Kontroller gestartet.

Sam_load_Thresholds()

Diese Funktion dient dazu, bei Änderungen der Thresholdinformationen diese neu in die Read - Out - Kontroller zu laden. Dazu wird Thresholdinformation im Speicher des SAM abgelegt und danach dem DSP - Programm ein Kommando erteilt, diese Information an die angeschlossenen Read - Out - Kontroller zu übermitteln. Die neuen Thresholdwerte werden dann bei dem nächsten "Begin run" Trigger gesetzt.

Sam_reset()

Diese Funktion versetzt das System in einen wohldefinierten Zustand. Dazu werden sämtliche DSP angehalten und neu gestartet, wodurch alle Programmvariablen erneut initialisiert werden. Zusätzlich werden die Initialisierungs - und Kalibrierungsinformationen neu an die Read - Out - Kontroller übertragen.

Sam_start()

Durch Setzen eines Bits in der Kontrollogik des SAM - Moduls wird der DSP gestartet. Beide DSP können unabhängig voneinander durch ein eigenes Bit gestartet werden.

Sam_stop()

Diese Funktion setzt das durch die Funktion Sam_start gesetzte Bit zurück, wodurch der DSP angehalten wird.

Sam_initialized()

Diese Funktion ermittelt ob das SAM - Modul mitsamt aller angeschlossener Front - End - Hardware erfolgreich initialisiert wurde.

Sam_running()

Diese Funktion liefert die Information, ob der DSP des SAM - Moduls sich im RUN - Zustand befindet. Sie liefert eine 2 Bit - Information zurück.

Sam_lvl1busy()

Da das SAM - Modul nur LVL 2 - Trigger erhält, hat es keine Informationen darüber, ob das System zur Zeit in einem LVL 1 - Busy - Zustand ist. Diese Funktion kehrt daher immer mit dem Rückgabewert 0 zum Aufrufer zurück.

Sam_lvl2busy()

Die Funktion liefert den Status des LVL 2 - Busy aus dem Triggerregister zurück.

Sam_error()

Diese Funktion ermittelt aus dem Triggerregister den Status des Fehlerbits und liefert ihn zurück.

Sam_statusRegister()

Diese Funktion liefert den Inhalt eines beliebigen Hardwareregisters zurück. Bevor sie auf ein Register zugreift, muß sie sicherstellen, daß sich das SAM - Modul im richtigen Modus befindet. Da die Funktion als "unsigned long" deklariert ist, kann keine Information darüber zurückgeliefert werden, ob der Registerzugriff fehlgeschlagen oder das Register leer ist. Ursache dafür ist, daß ein fehlschlagender Registerzugriff mit dem Rückgabewert 0 beantwortet werden soll.

4.6.2 Generierung der Setup - Informationen

Die Initialisierung der TDC - Chips wird durch die Read - Out - Kontroller bei Eintreffen des "Begin run" - Triggers durchgeführt. Dabei greift das DSP - Programm auf Daten im Speicher des Read - Out - Kontrollers zu, in dem die auszuführenden Aktionen in Form von Adress - und Datenworten abgelegt sind. Es wird jeweils eine Adresse gelesen und an diese das zugehörige Datenwort geschrieben. Die Adressen zeigen dabei auf gültige Adressen im Read - Out - Kontroller - CPLD und auf den angeschlossenen Motherboards.
Diese Initialisierungsinformationen werden von der SAM - Initialisierungsroutine in den Speicher des Read - Out - Kontrollers geschrieben. Da es sich bei diesen Informationen um Paare von hexadezimalen Werten handelt, wurde ein Programm zur Generierung dieser Dateien aus kommentierten Textdateien entwickelt. In diesen Dateien ist, getrennt nach Funktionalität, die Information zur Initialisierung abgelegt. Dies sind:

- Informationen zur Initialisierung der TDC - Schnittstelle
- Informationen zur Konfiguration der TDC - Kanäle
- Informationen zur Einstellung der Schwellen
- Informationen zur Konfiguration des "Common OR" - Signales

Dabei soll die Datei für die Initialisierung der TDC - Schnittstelle nicht vom Benutzer modifiziert werden. Die Information über die Schwellen hingegen kann sich in Abhängigkeit vom Detektorzustand häufiger ändern. Auch die Information, welche Kanäle aktiv sind, kann einer häufigeren Änderung unterworfen sein. Diese Dateien werden aus der HADES - Analysesoftware heraus erzeugt, die sie aus der HADES - Datenbank liest. Dadurch wird es möglich festzustellen, wann welche Schwellen eingestellt waren, und welche Kanäle aktiv waren.

```
plane 1
thresholdversion  256
-------------------------------------------------
------------ Plane  1----------------
-------------------------------------------------
ROC  1
mbo  111  0  6b  61  6f  60 -1  -1
mbo  211  1  60  66  60  60 -1  -1
ROC  2
mbo  121  0  60  60  60  60 -1  -1
mbo  221  1  85  60  67  63 -1  -1
ROC  3
mbo  122  0  60  60  60  60 -1  -1
mbo  222  1  77  60  6b  60 -1  -1
ROC  4
mbo  112  0  89  78  7d  80 81  8c
mbo  113  0  86  60  76  60 98  79
mbo  212  1  7d  60  60  60 70  60
mbo  213  1  6e  60  6e  60 60  60
ROC  5
mbo  321  0  60  8b  67  63 60  60
mbo  311  0  76  60  68  82 67  60
mbo  322  1  65  60  7a  69 -1  -1
mbo  312  1  6c  60  6b  83 -1  -1
###
```

Listing 4.2: *Konfigurationsdatei für die Schwellen*

Spalte	Bedeutung
1	Motherbordkennung
2	Motherbord Name
3	Port Nummer am ROC
4-9	Threshold Werte

Tabelle 4.5: *Aufbau einer Zeile der Datei zur Konfiguration der Schwellenwerte.*

In Listing 4.2 ist eine Schwellendatei gezeigt. Anhand dieser Datei wird der Aufbau des gesamten Auslesesystems für eine Kammer definiert. Für jeden Read-Out-Kontroller gibt es einen Block, in dem für jeden Port alle an diesem Port angeschlossenen MBO's aufgeführt sind. Da es zwei unterschiedliche Motherboards gibt (8 oder 12 TDC-Chips → 4 oder 6 Thresholdwerte), sind alle nicht vorhandenen TDC-Chips durch einen Wert von "-1" für die zugehörigen Schwellen gekennzeichnet.

Tabelle 4.5 zeigt den Aufbau einer Zeile der Threshold Datei, wie sie von der Analyse geschrieben wird. Diese Datei enthält keine Kommentare, da sie nicht mehr vom Nutzer editiert werden sollte, sondern nur noch durch ein ROOT (→ **ROOT**)-Macro aus der HADES-Datenbank erzeugt werden soll. Im Kopf dieser Datei steht, welche Version von Thresholds aus der Datenbank in diese Datei

geschrieben wurde, und für welche Ebene diese Werte sind. Danach folgt für jeden Read - Out - Kontroller ein Block mit den Schwellenwerten. Das Programm "tdcsetup" erzeugt aus diesen Dateien die Informationen für die Read - Out - Kontroller getrennt nach Initialisierungs - und Kalibrierungsinformationen.

Das gleiche Verfahren wird auch zur Erzeugung der Masken für die TDC - Kanäle verwendet, um Fehler zu vermeiden, die durch Tippfehler in der Konfigurationsdatei entstehen.

Damit später zurückverfolgt werden kann, wann welche Schwellenwerte und Masken in den Read - Out - Kontrollern geladen waren, wird vom Programm eine Versionsinformation in die Ausgabedateien geschrieben, und mit dieser Version auch eine Bestätigung in der Datenbank durchgeführt. Diese Aufgabe soll in Zukunft von der HADES - Run - Kontrolle [3] durchgeführt werden. Dadurch wird das gesamte "tdcsetup" - Programm ersetzt, da es dann möglich ist, die gesamten Initialisierungsinformationen vollautomatisch aus der Datenbank zu erzeugen, und nur dann als gültig zu markieren, wenn sie in die Front - End - Elektronik geladen wurden.

4.7 MDC - Datenstrukturen

Um die Daten auf der Analyseseite später richtig zuordnen zu können, ist es nötig, neben den eigentlichen Daten immer auch Adressen zu übertragen. Zusätzlich müssen auch Informationen über aufgetretene Fehler weitergeleitet werden. Die grundlegenden Datenstrukturen wie der Aufbau des Datenwortes, der Aufbau des Sub - Ereignisses oder die Bedeutung der Fehlerbits soll im folgenden erläutert werden.

4.7.1 Das MDC - Datenwort

Jedes Datenwort, das von der Auslese geliefert wird, muß eindeutig zu einem Draht in einer Driftkammer zuzuordnen sein. Folgende Informationen müssen also enthalten sein:

- Um welchen Sektor handelt es sich,
- welches Modul liefert die Daten,
- von welchem Layer innerhalb des Moduls stammt die Information und
- welcher Draht hat das Signal gesehen.

[3] Programm zu Steuerung der Auslese

Bits	Mögliche Werte	Bedeutung	Gefüllt von
30,31	immer 0	reserviert	
26-29	1..12	SAM Adresse	SAM
25	0,1	SAM Port	SAM
22-24	1..5	Read-Out-Kontroller Adresse	ROC
21	0,1	LVL1 BUS am Read-Out-Kontroller	ROC
19-20	0..2	Motherboard Adresse	ROC
15-18	1..12	TDC Adresse	TDC
12-14	0..7	TDC Kanal Nummer	TDC
11	0,1	Hit im Kanal	TDC
0-10	0..4095	TDC Datenwort	TDC

Tabelle 4.6: *Bedeutung der Bits im MDC-Datenwort. Angegeben ist auch der jeweils mögliche Wertebereich des Feldes.*

Daher muß an verschiedenen Stellen der Auslesekette eine Adressinformation in das Datenwort eingefügt werden. In Tabelle 4.6 ist der Aufbau des Datenwortes gezeigt.
Neben den eigentlichen Daten liefert der TDC noch eine Information mit, die den Kanal innerhalb des TDC bestimmt und seine Adresse in der Kette auf einem Motherboard. Der Read-Out-Kontroller fügt dem Datenwort die Information über den Level 1-Bus, die Adresse des Motherboards innerhalb des Busses und seine eigene Adresse hinzu.

Dadurch ist das Datenwort nun eindeutig einem Meßdraht in der Kammer zugeordnet. Die fehlende Information, um welche Kammer es sich handelt, kann erst auf der Ebene des SAM-Moduls hinzugefügt werden. Dabei wird aus der SAM Adresse und dem SAM Port eine virtuelle Addresse gebildet, die eine Kammer eindeutig identifiziert.

4.7.2 Das MDC-Sub-Ereignis

In [Kol] wurde festgelegt, daß jeder Sub-Event-Builder (→ **Sub-Event-Builder**) genau ein Sub-Ereignis abliefert. Im MDC-Auslese-System wird das SAM-Modul als Sub-Event-Builder bezeichnet. In Tabelle 4.7 ist der Aufbau des HADES Sub-Ereignisses beschrieben. Diese Datenstruktur muß vom SAM-Modul gefüllt und zusammen mit den zu dem Ereignis gehörenden Daten der Auslese über den Ausgabepuffer zur Verfügung gestellt werden.

Wie bereits in Abschnitt 4.5.2 erläutert, muß das SAM-Modul die von den Read-Out-Kontrollern gelieferten Daten beim Umkopieren vom Eingangspuffer in den Zwischenspeicher umsortieren und mit den nötigen Zusatzinformationen

Wort	Name	Bedeutung
1	SubEventSize	Größe des Subevents in 32 Bit Worten
2	SubEventDecoding	Big oder Little Endian Byteorder
3	SubEventId	Spezifiziert die Datenquelle(Detektor)
4	SubEventTriggerTag	Triggernummer des Events

Tabelle 4.7: *Aufbau des HADES - Sub - Ereignis - Kopfes.Nach [Kol]*

Wort	Name	Bedeutung
1	SubSubEventTriggerTag	Triggernummer des Events
2	SubSubEventSize	Größe des Subevents in 32 Bit Worten
3	SubSubEventType	Nummer des Readoutkontrollers und Triggertyp

Tabelle 4.8: *Aufbau des HADES - MDC - Sub - Sub - Ereignis Kopfes.*

versehen. Zudem muß den Daten der Sub - Ereignis - Kopf vorangestellt werden. Das erste Wort des Kopfes enthält die Länge des Sub - Ereignisses in 32 Bit Worten. Das SAM - Modul hat diese Information nach der vollständigen Übertragung der Daten von den Read - Out - Kontrollern in den Eingangspuffer in einem Register zur Verfügung. Das zweite Wort des Kopfes (SubEventDecoding) enthält eine Information über die Sortierung der Bytes im Datenstrom. Zusätzlich wird in diesem Wort das höchstwertige Bit gesetzt, wenn in den Daten ein Fehler erkannt wurde.

In das dritte Datenwort des Kopfes wird vom SAM die Sub - Event - Id geschrieben. Dies ist eine Zahl, die im gesamten HADES - Auslesesystem eine eindeutige Zuordnung der Daten zu einem Sub - Event - Builder ermöglicht. Für die MDC Sub - Ereignisse ist der Bereich von 200 bis 299 für die Sub - Event - Id reserviert. Die Information, welche Sub - Event - Id ein SAM - Modul verwendet, wird, wie bereits in Abschnitt 4.5.2 und 4.6.1 erläutert, dem DSP - Programm beim Starten übergeben. Die beiden DSP des SAM - Moduls sind in der Lage, unabhängig voneinander Sub - Ereignisse zu generieren. Sie benötigen daher jeder eine eigene Sub - Event - Id.

Im vierten Wort des Sub - Event - Kopfes wird die Triggernummer des Ereignisses gespeichert. Dem SAM - Modul steht diese Information nur aus den Kopfworten der Read - Out - Kontroller zur Verfügung, da die Hardware des SAM - Moduls es nicht erlaubt, den HADES - Triggerbus vollständig zu implementieren. Eine Konsistenzüberprüfung ist daher nur für die Read - Out - Kontrollern untereinander möglich.

Bit	Bedeutung
3	Kein Token vom LVL1 Bus 1
2	Kein Token vom LVL1 Bus 0
1	Daten durch zu großes Ereignis überschrieben
0	Sub-Ereignis zu groß

Tabelle 4.9: *Liste der Fehlerinformationen im MDC Sub-Sub-Ereignis-Kopf. Die Information ist im SubSubEventType Wort des Sub-Sub-Ereignis-Kopfes im dritten Byte kodiert.*

Für Debugingzwecke wurde ein sogenannter Sub-Sub-Eventkopf eingeführt. Diese Datenstruktur besteht aus den in Tabelle 4.8 aufgeführten Informationen. Mit Hilfe dieser Informationen, die jeder Read-Out-Kontroller liefern "muss", ist es dem DSP-Programm möglich, die Daten des Sub-Events zu kopieren.

4.7.3 Propagation von Fehlerinformationen

Die Übermittlung von Fehlern in der Hardware und im Datenstrom ist wichtig, um bei der späteren Analyse der Daten, insbesondere bei der Berechnung von Effizienzen, genaue Fehler angeben zu können. Es gilt zwischen Hardwarefehlern und Softwarefehlern zu unterscheiden. Im Auslesesystem der Driftkammern ist die erste Fehlerquelle in der Hardwarekette das Motherboard.

Wie bereits in Abschnitt 4.2.2 erläutert, geschieht die Auslese der TDC-Daten durch den Read-Out-Kontroller mittels eines Token, das in die TDC-Kette eingespeist wird. Der letzte TDC in der Kette soll dieses Token an den Read-Out-Kontroller zurückschicken. Durch Fehler bei der Initialisierung der TDC-Chips, Zerstörung des CPLD-Chips auf dem Motherboard durch Überhitzung etc., besteht die Möglichkeit, daß das Token nicht wieder zum Read-Out-Kontroller zurückkommt. Das bedeutet, daß keine Daten vom betroffenen Level 1-Bus gelesen werden können (siehe Tabelle 4.9).

Starke elektrische Störfelder können dazu führen, daß sehr viele TDC-Kanäle ansprechen. Die dabei entstehende Datenmenge kann unter Umständen zu Problemen bei Puffergrößen führen. Daher ist eine Beschränkung der Datenmenge auf der Ebene der Read-Out-Kontroller angebracht. Hierbei wird zwar die gesamte Information aus den Motherboards ausgelesen, aber nur ein begrenzter Anteil davon im Falle eines positiven LVL 2-Triggers an das SAM-Modul übertragen (siehe Tabelle 4.9).

Jeder Read-Out-Kontroller prüft bei der Dekodierung des Triggertyps, ob er einen gültigen (unterstützten) Triggertyp (vgl. Abschnitt 4.4.1) erhalten hat. Diese Information wird über ein Bussystem übermittelt, auf dem Übertragungsfehler auftreten können. Im Falle eines ungültigen Triggercodes wird daher ein leeres Sub-Sub-Event erzeugt, in dessen Kopf das entsprechende Fehlerbit gesetzt ist.

Diese Fehlerinformationen werden vom Read-Out-Kontroller im dritten Datenwort des Sub-Sub-Eventheaders in den oberen vier Bits des zweiten Bytes gespeichert. In Tabelle 4.9 ist die Bedeutung der Fehlerbits erläutert.

Durch das Programm des SAM-Moduls findet beim Kopieren der Daten aus dem Eingangspuffer in den Hauptspeicher eine Überprüfung der Triggernummern der einzelnen Read-Out-Kontroller statt. Wird hierbei eine Inkonsistenz festgestellt, so wird das Fehlerbit im Sub-Ereignis-Kopf gesetzt, auch wenn keiner der Read-Out-Kontroller ein Fehlerbit gesetzt hat. Sollte einer der Read-Out-Kontroller ein Fehlerbit gesetzt haben, so wird ebenfalls das Bit im Sub-Event-Decoding gesetzt.

4.8 Optimierungsmaßnahmen

Sowohl bei der Auslesegeschwindigkeit des Systems als auch bei der Fehlerinformation gibt es noch Möglichkeiten zur Optimierung. Die Geschwindigkeit läßt sich durch Verringerung der zu übertragenden Datenmenge steigern. Der Ereigniskopf macht im Normalfall den Hauptbestandteil der Daten aus. Solange der Read-Out-Kontroller keinen Fehler findet, ist der Kopf der Daten entbehrlich und kann weggelassen werden. Im Falle eines Fehlers muß der Kopf noch weitertransportiert werden.

Eine zweite Möglichkeit zur Datenreduktion besteht darin, beim Versenden der Daten durch den Read-Out-Kontroller die Zeitinformation im Datenwort zu prüfen. Liegt der Zeitwert unterhalb einer Grenze, so handelt es sich bei dem Datenwort lediglich um Störungen, die zum Beispiel durch Rauschen der Elektronik verursacht werden. Solche Datenworte sollten dann schon auf der Ebene der Read-Out-Kontroller verworfen werden.

Das Hauptproblem besteht aber in der zu übertragenen Datenmenge auf dem Level 1-Bus zwischen Motherboard und Read-Out-Kontroller. Jedes Datenwort benötigt hier 200 ns für die Übertragung. Lediglich durch Reduzierung der Datenmenge auf den Motherboards kann hier Zeit eingespart werden. Dies kann entweder durch Optimierung der Schwellen für die Diskriminatoren geschehen, oder durch Abschalten von besonders stark Rauschenden TDC-Kanälen.

Im Driftkammersystem gibt es zwei Hauptquellen von Untergrundsignalen, die von der Elektronik verursacht werden. Diese sind die clock noise (→ **clock noise**) und die common stop noise (→ **common stop noise**). Erstere wird von der zur Synchronisation der TDC-Ausleseschnittstellen nötigen 5 MHz-Clock auf den Motherboards verursacht, die von der Platine abstrahlt, und über die FPC (→ **Flexible Printed Circuit**)-Kabel einkoppelt, mit denen die Signaldrähte der Kammer mit den Vorverstärkern auf den Daughterboards verbunden sind. Dies verursacht in den Zeitspektren horizontale Bänder in regelmäßigen Abständen.

Die CMS-Noise tritt in den Zeitspektren als scharfe Linie bei sehr kurzen Zeiten auf. Verursacht wird sie durch das Einkoppeln des CMS Signales in den Vorverstärker. Die Messung wird aber abgebrochen, weil die Logik des Motherboards den Eingangskreis des TDC nach dem Eintreffen des CMS-Signals sperrt. Zugleich wird damit auch die Spitzenunterdrückung des Meßkreises abgeschaltet, sodaß Zeiten kleiner als die eingestellte Spitzenunterdrückung auftreten können. Da der TDC also nur eine Flanke des CMS-Signals sieht, enthält der Kanal auch nur einen Hit. Durch Zählen der Hits pro Kanal kann auf der Ebene der Read-Out-Kontroller eine Unterdrückung von solchen Daten vorgenommen werden, bei denen nur ein Hit pro Kanal gefunden wurde.

Ebenfalls bei sehr großen Datenmengen, wenn also nahezu alle Kanäle der Kammer ansprechen, ist eine Reduktion möglich. Dies wird durch starke Störimpulse hervorgerufen, die die Verstärkerschaltung der Daughterboards zum Schwingen bringen. Die Zeitspanne zwischen den beiden Flanken dieses Signales auf der Ausgangsseite des Schwellendiskriminators ist charakteristisch für die Kapazität einer Zelle. Durch Bestimmen der Differenz der beiden gemessenen Driftzeiten und Vergleich mit einem Referenzwert für die entsprechende Zelle können Datenworte, die auf einer Selbsterregung des Verstärkers beruhen, ermittelt werden. Solche Daten tragen keine relevante Information und können verworfen werden. Dies kann allerdings nur auf dem SAM-Modul erfolgen, da nur hier genug Speicher für die Referenzwerte zur Verfügung steht. Die Daten müssen daher über den Level 2-Datenbus (GTB) transportiert werden. Die Reduktion bringt an dieser Stelle keinen Vorteil für die Auslese der Front-End-Elektronik, sie reduziert lediglich die wegzuschreibende Datenmenge.

Als zusätzliche Quelle von Rauschen wurde die Übertragung der Daten auf dem Level 2-Bus ermittelt. Diese Störungen sind nur bei sehr hohen Raten von Relevanz, da hier die Wahrscheinlichkeit stark ansteigt, daß ein LVL 1-Trigger eintrifft, während eine Level 2 Datenübertragung stattfindet. Das bedeutet, daß die Störungen vom Level 2-Bus die Digitalisierung eines neuen Ereignisses beeinflussen, und damit die Datenmenge ansteigt. Dies läßt sich verhindern, indem die Übertragung auf dem Level 2-Bus nur dann stattfindet, wenn der LVL

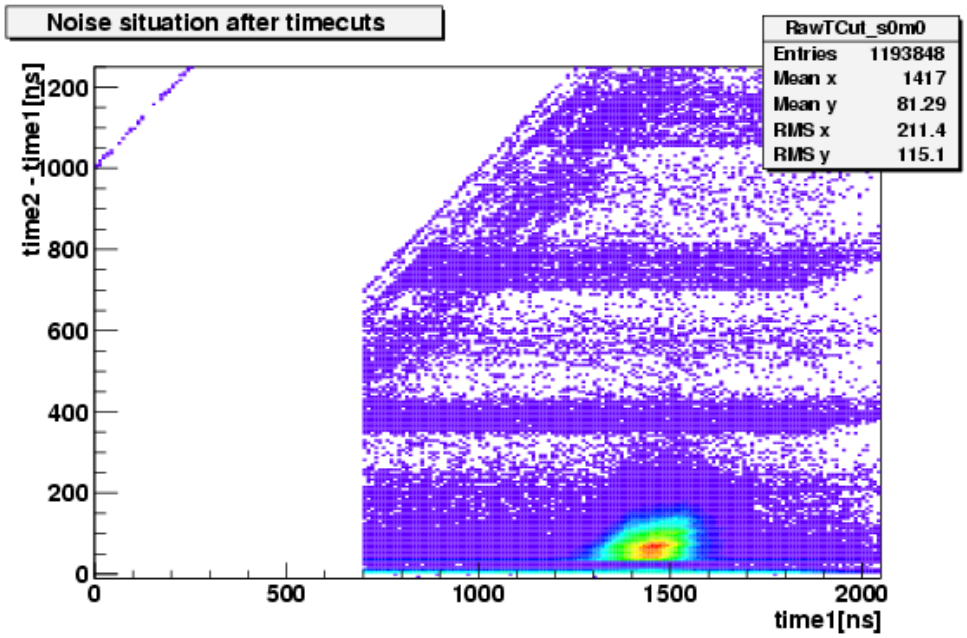

Abbildung 4.16: *Noise Situation einer Kammer. CMS - Noise ist das schmale Band in der linken oberen Ecke. Bei den horizontalen Bändern in regelmäßigen Abständen handelt es sich um die "Clock - Noise". Daten vom september 2003.*

1 - Trigger durch ein Busy - Signal blockiert ist. Auf der einen Seite wird durch dieses Vorgehen zwar die Totzeit im LVL 1 verlängert, die absolute Performance des Systems könnte aber durch die reduzierte Datenmenge auf dem Level 2 - Bus ansteigen.

Um aber weiterhin statistische Informationen über die Noisesituation der Kammern zu erhalten und die Häufigkeit von sogenannten "Monsterevents" abschätzen zu können, ist es nötig, in solch einem Fall zusätzliche Informationen zu übertragen. Dies kann entweder im Anschluß an die Daten durch den Read - Out - Kontroller geschehen, die dann vom SAM ausgewertet werden, oder über einen unabhängigen Kanal, der diese Informationen z.B. dem Slow - Control - System (→ **Slow - Control - System**) zur Verfügung stellt.

Die neuen Schwellenwerte werden im Speicher des SAM hinterlegt und ein Komando an das DSP - Programm übermittelt, diese Werte an die angeschlossenen Read - Out - Kontroller zu übertragen, und den DSP - Programmen der Read - Out - Kontroller das Kommando zum Setzen der Schwellenwerte zu erteilen. Wegen der relativ langen Zeitspanne, die dafür notwendig ist, sollte dieser Vorgang nur in den Spillpausen erfolgen.

Bei der Kühlung der TDC - Chips bestehen ebenfalls noch Möglichkeiten der Optimierung. Dies betrifft hauptsächlich die inneren Kammern (vgl. 4.3), da zwischen diesen nur sehr wenig Platz zur Verfügung steht. Neben der im Moment verwendeten Methode der Kühlung durch Strahlung / Konvektion könnte zum Beispiel auch eine aktive Kühlung verwendet werden.Dabei müssen Kühlkörper durch die ein Kältemittel geleitet wird, in Kontakt mit den TDC - Chips gebracht werden. Um dabei die Akzeptanz nicht zu beeinträchtigen, kann ein Metallstreifen helfen, die Wärme von den TDC - Chips aufzunehmen und an den Kühlkörper weiterleiten, der im Schatten der Magnetspulen untergebracht werden muß. Das System muß allerdings so ausgelegt sein, daß bei einem eventuell auftretenden Leck kein Kältemittel austritt, um zu verhindern, daß dadurch ein Kurzschluß in der Elektronik verursacht wird.

Kapitel 5

Qualitätskontrolle der MDC - Daten

5.1 Einführung

Die Qualität der Driftkammerdaten bestimmt die erreichbare Massenauflösung und beeinflußt die Akzeptanz und die Effizienz des Spektrometers. Daher ist eine genaue Kenntnis der einzelnen die Datenqualität beeinflussenden Parameter und ihre Überwachung während der Datenaufnahme notwendig. Dieser Überwachungsprozeß wird als QC (→ **Qualitätskontrolle**) bezeichnet.

Die Qualitätskontrolle findet in zwei Schritten statt. Im ersten Schritt werden die Detektorfunktionen während der Datenaufnahme anhand der Rohdaten überwacht. Dadurch wird sichergestellt, daß sich die Akzeptanz des Detektors nicht durch den Ausfall von Teilen der Ausleseelektronik unkontrolliert ändert, oder die Effizienz des Detektors wegen schlechter Gasqualität oder ungünstiger Hochspannung absinkt. Dieser Schritt wird als Echtzeitüberwachung bezeichnet. Im zweiten Schritt wird eine detailierte Analyse der Rohdatensätze vorgenommen, die von der Datenaufnahme erzeugt wurden. Die Aufarbeitung der Rohdaten für die vollständige Analyse endet mit der Produktion von DST (→ **Data Summary Tape**).

Im folgenden Abschnitt (5.2) werden die zur Echtzeitüberwachung geeigneten Parameter vorgestellt. Sie sollen Informationen über die Datenqualität liefern, anhand der es möglich ist, zu entscheiden, ob die Betriebsparameter des Detektors zusammenpassen.
Im Abschnitt 5.3 werden die Parameter beschrieben, auf deren Grundlage die Auswahl von Datensätzen ähnlicher Qualität vorgenommen wird.

5.2 Echtzeit - Qualitätskontrolle und Fehlerkorrekturen

Die Datenaufnahme stellt einen Teil der Ereignisse, die aufgezeichnet werden, der Online - Überwachungssoftware zur Verfügung. Durch Analyse dieser Daten müssen Informationen über den Zustand des Detektors ermittelt werden, die eine Aussage über eine mögliche Akzeptanzänderung oder eine geänderte Effizienz erlauben. Um eine kontinuierliche Kontrolle der Daten zu ermöglichen, muß sich die Analyse auf die Parameter beschränken, die mit geringem Zeitaufwand zu ermitteln sind. Die Analyse soll mit geringem Zeitversatz zur Datenaufnahme stattfinden, damit schnell auf Änderungen im Detektorverhalten reagiert werden kann. Alle Analysen, die große Ereigniszahlen ($> 5 \cdot 10^5$ Ereignisse) benötigen, eignen sich nicht für die Onlineüberwachung. Die Analyse solch großer Ereigniszahlen benötigt zu viel Zeit, sodaß die Verzögerung zu groß ist und eine zeitnahe Reaktion auf Änderungen der Betriebsparameter des Detektors nicht mehr gewährleistet ist.

Es gibt zwei Gruppen von Parametern in der Online - Analyse. Die erste Gruppe sagt etwas über den Zustand der Ausleseelektronik. Dazu gehören die Informationen über aufgetretene Fehler (siehe Abschnitt 5.2.1), die von verschiedenen Komponenten der Ausleseelektronik in den Datenstrom eingefügt werden, und die Ergebnisse der internen Kalibrierung der TDC - Chips, durch die die Zeitauflösung bestimmt wird. Da die Zeitauflösung der TDC - Chips von der Temperatur des Chips abhängt (vgl. [Wü97].), ist aus den Kalibrierungsfaktoren ein Rückschluß auf die Temperatur des Chips möglich.

Die zweite Gruppe ermöglicht es, Informationen über den Zustand des Detektors zu ermitteln. Zu dieser Gruppe gehören die Driftzeitspektren, die Multiplizitäten pro Drahtebene, Driftgeschwindigkeit und die intrinsische Auflösung. Diese Informationen basieren auf einer höheren Analyseebene als die Hardwareinformationen. Daher wird eine größere Anzahl von Ereignissen benötigt, um eine hinreichend genaue Aussage über den Zustand des Detektors treffen zu können, was gleichzeiig eine deutliche zeitliche Verzögerung bedeutet.

Die Parameter der ersten Gruppe sollen helfen, zu entscheiden, ob die Ausleseelektronik ordnungsgemäß funktioniert. Durch eine vollständige Reinitialisierung wird sichergestellt, daß die Ausleseelektronik in den Grundzustand versetzt wurde und alle Parameter der Elektronik in einem definierten Zustand sind. Dies betrifft die Initialisierungsinformationen der TDC - Chips, die Schwellen für die Diskriminatoren und die DSP - Programme der Read - Out - Kontroller und der SAM - Module.

Für die Überwachung eines langsamen Temperaturanstieges bei Ausfall der Kühlung ist das Zeitverhalten des Slow - Controll - Systems ausreichend und führt bei Überschreiten eines Grenzwertes zum Abschalten der Versorgungsspannung. Schnelle Temperaturanstiege hingegen, wie sie zum Beispiel bei den CPLD - Chips der Motherboards vorgekommen sind, werden hierdurch jedoch nicht schnell genug erkannt. Sie können aber anhand einer Änderung der Kalibrationsfaktoren erkannt werden.

Die Parameter der zweiten Gruppe liefern Informationen über das Leistungsverhalten des Detektors. Sie werden durch die Betriebsparameter des Detektors bestimmt, die miteinander korreliert sind. Aufgrund der Informationen soll zu entscheiden sein, ob alle Detektorparameter zusammenpassen.
Die Driftgeschwindigkeit wird von der Gaszusammensetzung und der angelegten Hochspannung beeinflußt. Unter optimalen Bedingungen ist die Korrelation dieser Parameter nicht sehr groß, sodaß eine geringe Änderung eines Parameters noch keine Änderung der Driftgeschwindigkeit verursacht. Muß der Detektor jedoch aus technischen Gründen mit asymetrischen Spannungen betrieben werden, so kann eine geringe Änderung der Gaszusammensetzung eine starke Änderung der Driftgeschwindigkeit zur Folge haben (siehe [Mar04a]).

Über die mittlere Multiplizität pro Draht erhält man eine Information über die Güte der eingestellten Schwellen am Diskriminator. Die effektiven Schwellen hängen von drei Spannungen ab. Dies sind zum einen die tatsächliche Schwellenspannung und zum anderen die beiden Versorgungsspannungen des ASD8 - Chips von $\approx \pm 3$V. Da sich diese unter Belastung ändern, ist auch die effektive Schwelle einer Änderung unterworfen. Durch unterschiedliche Teilchenmultiplizitäten jedes Ereignisses schwankt die Stromaufnahme des ASD8 - Chips von Ereignis zu Ereignis. Eine Stabilisierung der Spannung ist im Zeitrahmen von 100 Hz nicht möglich. Dazu müßte auf jedem Daughterboard eine Schaltung zur Spannungsstabilisierung untergebracht werden, die zusätzliche Verlustleistung verursacht und Platz benötigt.

Die Güte der eingestellten Schwellen ist daher immer ein Kompromiß zwischen geringem Rauschen und Effizienz, da durch zu hoch eingestellte Schwellen immer auch Signale weggeschnitten werden, was letztendlich zu einer Verringerung der Effizienz führt.

Die Driftzeitverteilung nimmt eine Sonderstellung ein, da sie einen Hardwareparameter, nämlich die Verzögerung des CMS - Signals, mit einem Detektorparameter, nämlich der Driftgeschwindigkeit, korreliert. Passen diese beiden nicht zusammen, so wird die Driftzeitverteilung entweder bei kleinen oder bei großen Driftzeiten beschnitten, was zu Verlusten in der Effizienz führt.

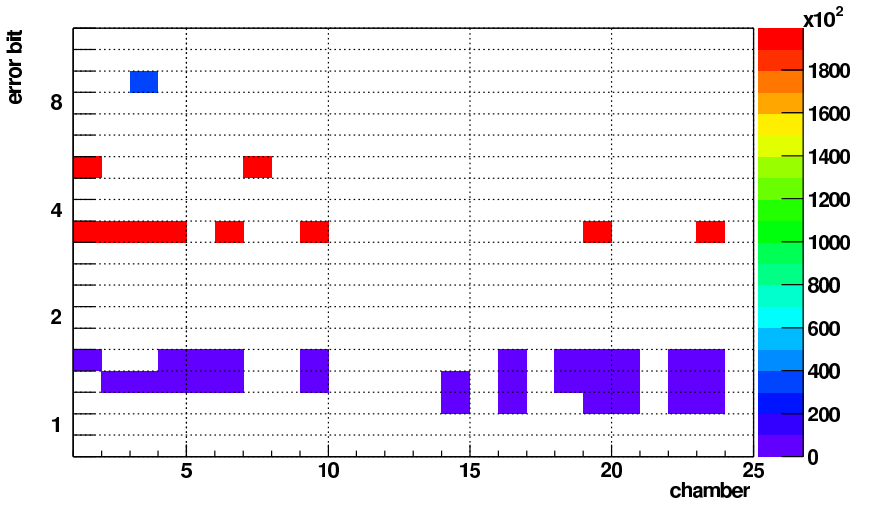

Abbildung 5.1: *Häufigkeitsverteilung der Fehlerbits aus dem MDC-Sub-Sub-Event-Kopf. Jeder Block zeigt einen Fehler an. Dargestellt ist die Häufigkeit, mit der ein bestimmter Fehler in einem ROC auftritt, für alle Kammern. Entlang der senkrechten Achse repräsentieren 5 aufeinanderfolgende Zeilen die ROCs einer Kammer. Analysiert wurden 200.000 Ereignisse vom Ende der Strahlzeit Januar 2004*

5.2.1 Darstellungsformen der Rohdaten

An verschiedenen Stellen des Auslesesystems werden Informationen über aufgetretene Fehler in die Daten codiert. Aus diesen Informationen kann der Zustand der Hardware schnell ermittelt werden. In Abschnitt 4.7.3 sind die möglichen Fehler aufgeführt, die vom Read-Out-Kontroller erkannt werden. Zusätzlich ist Vorsorge getroffen, daß, wenn ausnahmsweise Fehler bei der Auslese der Read-Out-Kontroller auftreten, diese durch Vergleich der Triggernummern der einzelnen Ereignisse, die von den Read-Out-Kontrollern geliefert werden, durch das SAM-Modul erkannt werden. Solche Ereignisse werden durch ein gesetztes Fehlerbit im Sub-Event-Header gekennzeichnet, sofern dieses nicht schon durch einen Fehler aus den Read-Out-Kontrollern gesetzt ist. Dadurch sind diese Fehler auf der Analyseseite nicht immer ohne weiteres eindeutig zuzuordnen.

Die Fehlermeldungen des Read-Out-Kontrollers bedeuten, daß ein Teil der Daten verlorengegangen ist. Dies geschieht entweder durch Ausfall von Front-End-Elektronik, oder durch zu große Datenmengen. Der Fehler, der vom SAM-Modul erkannt wird, bedeutet, daß ein Teil der Daten unbrauchbar ist, da er offensichtlich von einem anderen Ereignis stammt. Durch diesen Datenverlust wird die Akzeptanz und die Effizienz der Spurrekonstruktion beeinflußt, da

die Hiterkennung in der Rekonstruktionssoftware erfordert, daß mindestens Drähte aus 5 Ebenen einer Driftkammer ein Signal liefern. Nur dann ist die erreichbare Ortsauflösung der Kammer besser als die geforderten 120 μm. Die Hiterkennung kann unter Verringerung der Ortsauflösung auch mit weniger als 5 Drähten arbeiten, muß dann jedoch die Daten von zwei Ebenen Driftkammern miteinander kombinieren.
Als Ursache für fehlende Signale kommt neben der Effizienz der Driftkammern auch die Hardware in Frage. Wie bereits in Abschnitt 4.7.3 erläutert, können zwei Probleme zum Fehlen der Information von Driftkammerdrähten führen. Dies sind die Größe des Ereignisses und der Ausfall von Motherboards.

Im Fall der Größe des Ereignisses werden Teile der Daten vom Read - Out - Kontroller nicht zum SAM - Modul übertragen, wenn die Datenmenge die Größe des Puffers zur Kommunikation mit der CPU überschreitet. In diesem Fall kann anhand der Adresse des letzten Datenwortes, das von dem betroffenen Read - Out - Kontroller übertragen wurde, ermittelt werden, von welchen Drähten Informationen fehlen. Die Anzahl der Datenworte wird auf 327 Worte pro Read - Out - Kontroller je Level 1 - Bus begrenzt. Für die längste Kette von 3 Motherboards ($2*64+96$ Kanäle) ergibt sich damit ein maximaler Verlust pro Read - Out - Kontroller von 111 Datenworten von 448 insgesammt.

Im Fall des totalen Ausfalls von Motherboards wird das Problem sehr viel schwerwiegender, da nun im schlimmsten Fall alle 448 Datenworte der längsten Kette fehlen können. Keines der Motherboards ist nur mit Signaldrähten einer Ebene verbunden, wodurch die Wahrscheinlichkeit, daß in diesem Fall mehr als eine Ebene zu einem Hit fehlt, größer ist als im vorhergehenden Fall.

Abbildung 5.1 zeigt die auftretenden Fehler im Auslesesystem, die von der Hardware während der Auslese erkannt wurden. Die Bedeutung der einzelnen Fehlerbits ist in Abschnitt 4.7.3 erklärt (siehe Tabelle 4.9).

In diese Kategorie gehört auch die Darstellung der Information, welche TDC - Kanäle Daten liefern, und welche nicht. Überlagert mit der Information, von welchen Kanälen keine Daten zu erwarten sind, können die Schwellen für die Diskriminatoren auf den Analogkarten überprüft werden. Im Falle von Kalibrierungsdaten läßt sich auf diese Weise feststellen, ob die Kanalmasken richtig in den TDC geladen wurden. Zugleich kann an diesen Informationen aber auch erkannt werden, ob Fehler im Adressteil des Datenwortes vorliegen. Tauchen nämlich Informationen von Kanälen auf, die überhaupt keine Daten liefern sollten, weil sie abgeschaltet sind, so liegt ein Fehler in der Adresskodierung des Datenwortes vor. Solche Datenworte müssen in der Analyse ausmaskiert werden, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

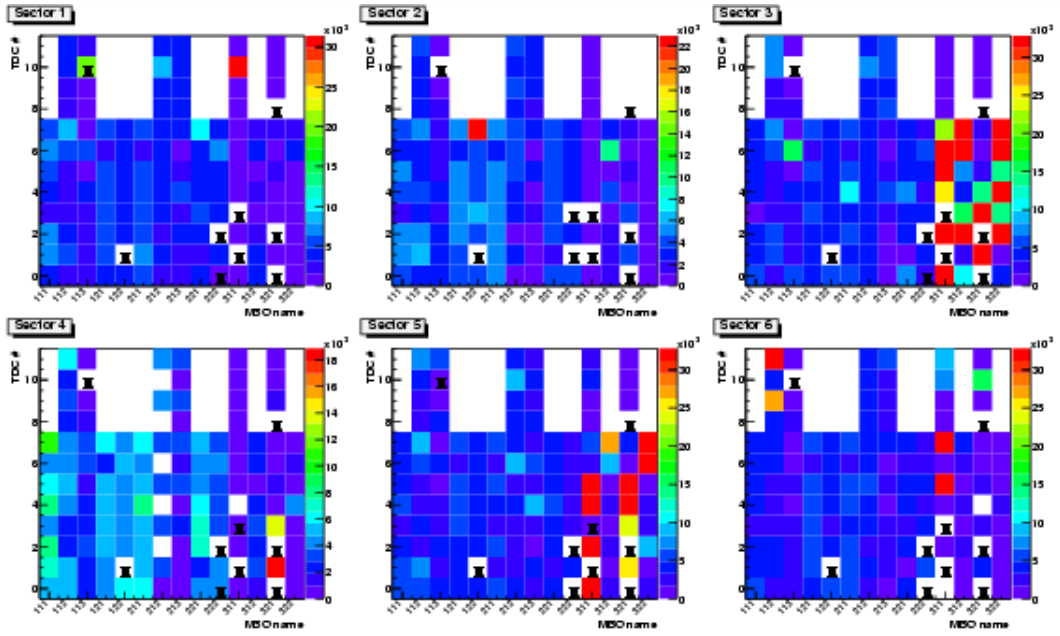

Abbildung 5.2: *Häufigkeitsverteilung der aktiven TDC - Kanäle für alle Motherboards der Ebene I. Ein 'x' steht für TDC - Chips ohne angeschlossene Signaldrähte.*

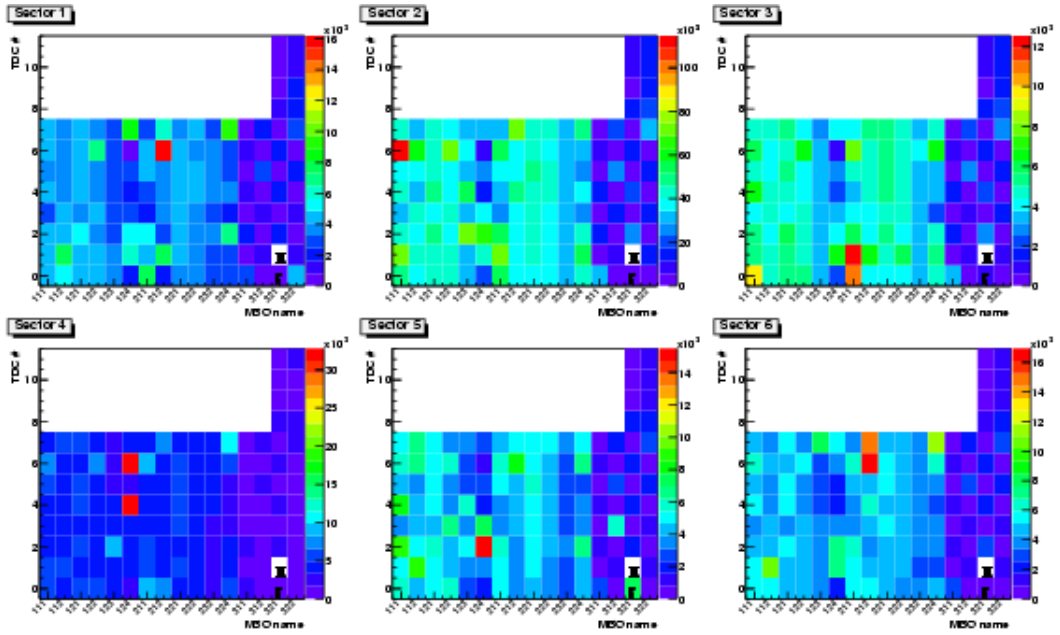

Abbildung 5.3: *Häufigkeitsverteilung der aktiven TDC - Kanäle für alle Motherboards der Ebene II. Ein 'x' steht für TDC - Chips ohne angeschlossene Signaldrähte, ein 'r' für Chips, bei denen nur vier Kanäle belegt sind.*

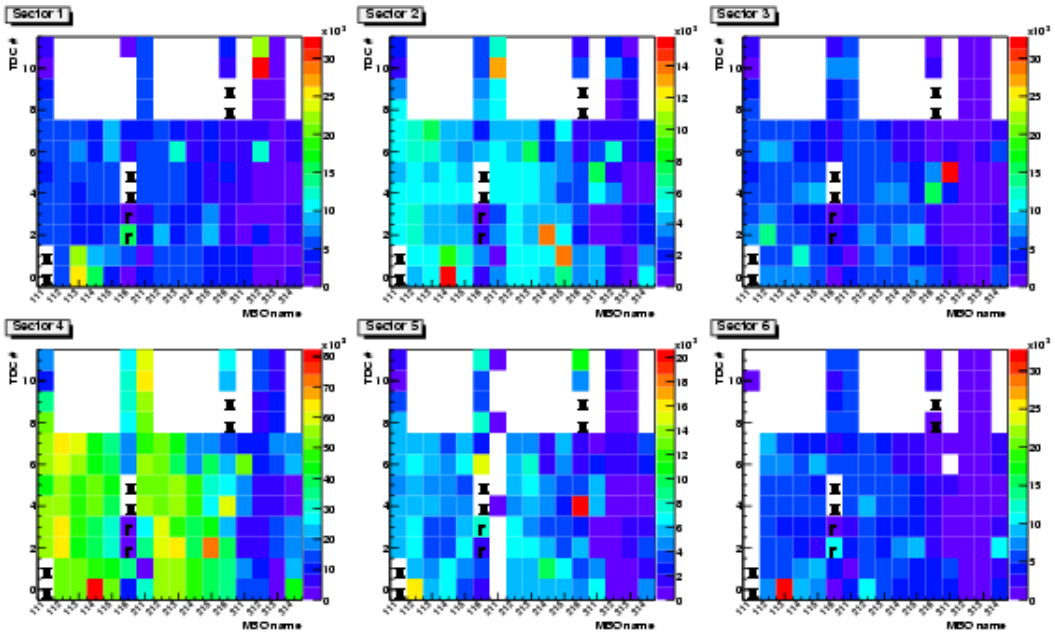

Abbildung 5.4: *Häufigkeitsverteilung der aktiven TDC - Kanäle für alle Motherboards der Ebene III. Näheres siehe Abbildung 5.3.*

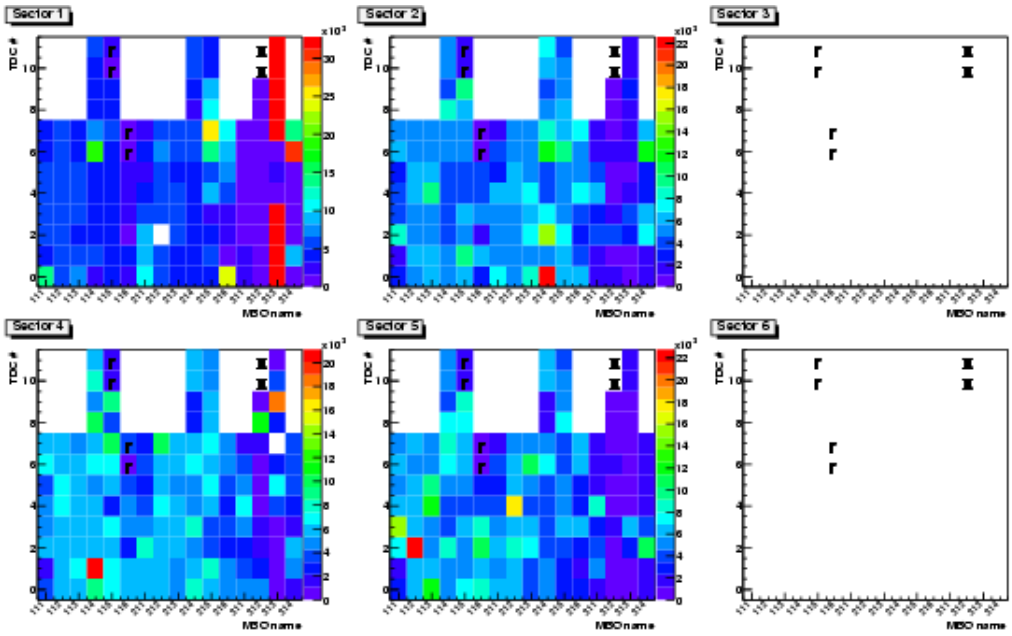

Abbildung 5.5: *Häufigkeitsverteilung der aktiven TDC - Kanäle für alle Motherboards der Ebene IV. Näheres siehe Abbildung 5.3.*

Ursache für Adressierungsfehler können elektrische Störungen während der Datenübertragung sein, die zu einzelnen Bitfehlern führen. Allerdings können auch mechanische Defekte der Motherboards, bei denen einzelne Signale aufgrund einer Ablösung des elektrischen Anschlusses eines Chips von der Leiterbahn von diesem Chip nicht mehr übertragen werden können, Defekte von Treiberbausteinen oder Beschädigungen der Level 1-Buskabel, zum Ausfall von einzelnen Bits des Datenwortes führen.

Die Information über aktive Kanäle ist in den Abbildungen 5.2 bis 5.5 für die vier Ebenen dargestellt. Die mit einem 'x' markierten Stellen haben keine Kanälen mit Signaldrähten verbunden. An den Stellen mit einem 'r' sind nur vier Kanäle des TDC-Chips mit einem Signaldraht verbunden. Hier ist also die Multiplizität kleiner als bei den TDC-Chips mit acht belegten Kanälen.

Diese Fehler führen zu einer Reduktion der Akzeptanz des Detektorsystems. Ein Teil der Fehler kann korrigiert werden, indem die Anforderungen an die Anzahl der Drähte, die zu einem Hit beitragen, herabgesetzt wird. Dies macht aber nur dann Sinn, wenn nicht mehr als zwei Ebenen betroffen sind, da ansonsten die Auflösung zu stark absinken würde.

5.2.2 Kalibrierung

Das Meßprinzip des TDC-Chips beruht auf einer Kette von Invertern. Es ist im Detail in Anhang D beschrieben. Weitere Informationen dazu finden sich in [Git94], [Gle96] und [Wü97].

Für jede Messung liefert der TDC-Chip ein Datenwort, das die Anzahl der Gatter enthält, die während der Zeit zwischen dem Startsignal vom Signaldraht und dem Referenzsignal vom Triggersystem umgeschaltet haben. Um diese Information in eine Zeit umwandeln zu können, ist die Kenntnis der Anzahl der Gatter notwendig, die pro Zeiteinheit umschalten. Diese Information erhält man aus der internen Kalibrierung des TDC-Chips.

Dabei erzeugt der Chip selbstätig eine Folge von vier Pulsen. Die ersten drei werden als Startsignal auf den Eingang aller acht Meßkreise gelegt, der vierte Puls dient zum Stoppen der Meßkreise. Da die Länge und die Abstände der Pulse gleich sind (200 ns), ist damit eine definierte Zeitmessung möglich. Das verwendete Signal ist schematisch in Abbildung 5.6 dargestellt.

Durch Auswerten der sechs Werte dieser Messung erhält man eine Information über die Zeitauflösung des TDC-Chips unter den Bedingungen zum Zeitpunkt der Messung. Es gibt zwei Parameter, die einen Einfluß auf die Meßkreise des TDC-Chips haben und die Zeitauflösung beeinflussen.

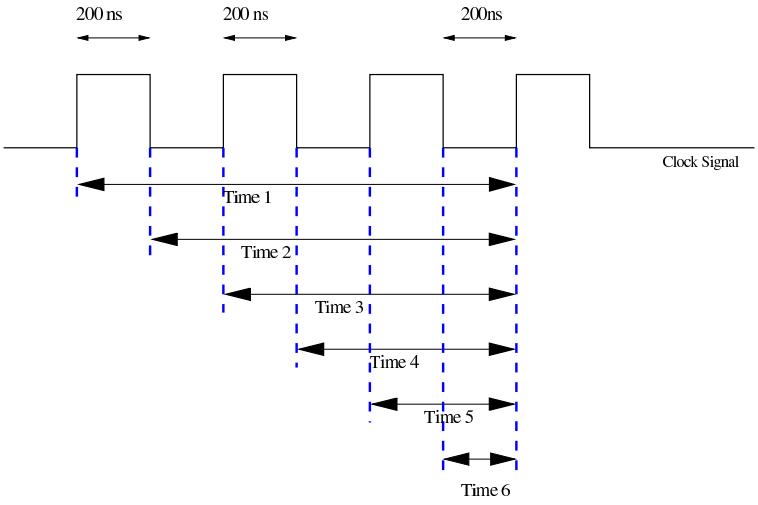

Abbildung 5.6: *Das verwendete Schema der Zeitmessung für die interne Kalibration der TDC - Kanäle. Die ersten drei Pulse werden in Relation zum letzten Puls gemessen, wobei jede Flanke eines Pulses eine neue Messung startet.*

In [Wü97] sind die Versorgungsspannung und die Temperatur des TDC - Chips als Parameter mit direktem Einfluß auf die Daten diskutiert worden. Für die Abhängigkeit von der Versorgungsspannung wurde ein Wert von $0{,}2 \pm 0{,}1\,^\circ/_{\circ\circ}$ pro mV ermittelt, und für die Abhängigkeit von der Temeratur von $0{,}21 \pm 0{,}001\,^\circ/_{\circ\circ}$ pro Kelvin. Bei einem Meßbereich von 1μs bedeutet dies eine Änderung von je 0,4 μs pro mV und Kelvin. Um die Meßgenauigkeit konstant zu halten, ist es erforderlich, die Zeitauflösung in der Analyse fortlaufend zu korrigieren.

Da sich der Chip unter Last erwärmt, ist zu erwarten, daß die Zeitauflösung die Struktur des Strahls widerspiegelt, sofern die Rate der Kalibrierungstrigger in der Phase, wo kein Strahl auf das Target trifft, geringer ist als die Strahltriggerrate. Dann hat der Chip die Möglichkeit abzukühlen, wodurch er eine andere Zeitauflösung erhält. Im Experiment wird versucht, die Triggerrate für die Kalibrierung so hoch zu wählen, daß in den Strahlzeitpausen der Chip nicht abkühlen kann, gleichzeitig aber im Strahl die Totzeit des Triggers nicht durch die Kalibrierungstrigger beeinflußt wird.

Jeder TDC - Kanal liefert 6 Meßwerte für einen Kalibrierungstrigger. Der Meßkreis des TDC - Chips ist so eingestellt, daß er beide Flanken des Eingangssignales als Startsignal für eine Messung interpretiert. Daraus ergeben sich die sechs Zeitwerte, die zur Berechnung der Zeitauflösung verwendet werden (vgl. Abbildung 5.6.).

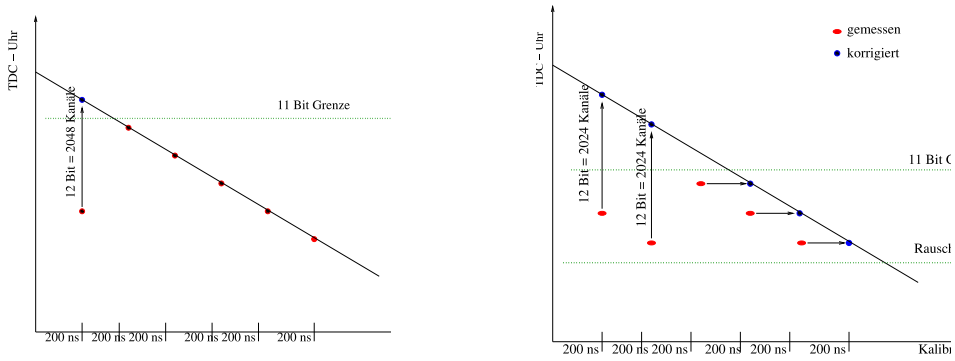

Abbildung 5.7: *Darstellung der gemessenen Zeiten aus der internen Kalibration. Links für den Fall, daß nur die erste Zeit oberhalb der Grenze liegt, bei der durch das fehlende Bit der TDC - Daten eine Zeit niedriger ist als sie sein müßte. Rechts ist der Fall gezeigt, daß eine Zeit durch die Grenze für Rauschen weggeschnitten wird. Die ovalen Symbole kennzeichnen die gemessenen Zeiten, die Kreise die korrigierten.*

Aufgrund der Begrenzung des Datenwortes auf 11 Bit Zeitdaten kann bei entsprechend großen Meßwerten ein Bit fehlen. Dies muß bei der Analyse der Daten berücksichtigt werden. Das DSP - Programm des Read - Out - Kontrollers, das im September 2003 eingesetzt wurde, hat eine untere Grenze für alle Zeitdaten gesetzt, um Untergrundrauschen zu unterdrücken. Diese Grenze wurde auch auf die Kalibrierungsdaten angewendet, was zur Folge hat, daß ein oder zwei Meßwerte verloren gingen.
Je nachdem welche Meßwerte verloren gehen, wird der abgedeckte Meßbereich des TDC - Chips eingeschränkt. Da die Zeitauflösung aufgrund des verwendeten Meßprinzips (siehe Anhang D) aber konstant ist, kann der aus den verbleibenden Meßwerten ermittelte Kalibrierungsfaktor verwendet werden. Allerdings ist sein statistischer Fehler größer als bei den Kanäle, bei denen alle sechs Zeitwerte der Kalibration zur Verfügung stehen.

Für die Onlineüberwachung der Zeitauflösung ist eine Methode zur schnellen Bestimmung notwendig. In [Zum04] sind die Methoden beschrieben, die in der Analyse eingesetzt werden. Diese eignen sich jedoch nicht für den Einsatz in der Echtzeitüberwachung, da sie zu viel Zeit für die Berechnung der Zeitauflösung benötigen.
Die für die Echtzeitüberwachung entwickelte Methode berechnet die Zeitauflösung, indem die dritte Zeit als Referenz genommen wird, und jeweils die Steigung einer Geraden zu den anderen fünf Zeiten bestimmt wird. Der Mittelwert der Verteilung der Steigungen ist die Zeitauflösung, und die Breite der Verteilung ist der Fehler in der Zeit.

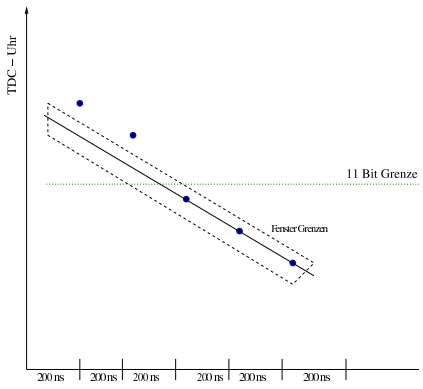

Abbildung 5.8: *Durch ein Fenster, das um die Gerade durch die beiden letzten Zeitwerte herum gesetzt wird, kann festgestellt werden, an welcher Stelle ein Zeitwert verlorengegangen ist, da hier die Zeitwerte oberhalb des Fensters liegen.*

Damit dieses Verfahren funktioniert, müssen die Zeitwerte erst in die richtige Reihenfolge gebracht werden. Aufgrund der Grenzwerte für die Zeitmessungen kann es vorkommen, daß von den Zeitwerten, bei denen das oberste Bit fehlt, welche weggeschnitten werden, wodurch weniger als sechs Zeitwerte übertragen werden. Von der Analysesoftware werden die Zeitwerte aber der Reihe nach einsortiert ohne solche Lücken zu berücksichtigen. Daher ist es erforderlich, die Zeitwerte erst durch Umsortieren an die richtigen Positionen zu bringen, damit die richtigen zeitlichen Abstände der einzelnen Einträge zueinander bestimmt werden können. Abbildung 5.7 verdeutlicht dies. Im linken Teil der Abbildung 5.7 wurde der erste Zeitwert durch den Wegfall des Bits 12 im Datenwort beschnitten. Dies kann erkannt werden durch eine Analyse der Differenz zweier benachbarter Zeitwerte. Liegt solch ein Fall vor, so wird das Bit 12 im Datenwort wieder gesetzt und der Vergleich zur Kontrolle erneut durchgeführt. Im rechten Teil der Abbildung 5.7 werden die ersten drei Zeitwerte durch das fehlende Bit 12 im Datenwort beschnitten. Durch diese Beschneidung fällt das dritte Datenwort unter die Rauschgrenze, die im September 2003 auch auf die Kallibrationsdaten angewendet wurde, und wird vom Auslesesystem verworfen. Dadurch stimmt der angenommene Zeitabstand von 200 ns zwischen den Zeitwerten zwei und drei in der Analyse nicht mehr. Er beträgt nun vielmehr 400 ns.

Dieser Fall kann erkannt werden, indem eine Gerade durch die letzten beiden Zeitwerte gelegt wird, und man vergleicht, welche der davorliegenden Zeitwerte in einem Fenster um diese Gerade liegen. In Abbildung 5.8 ist dies dargestellt.

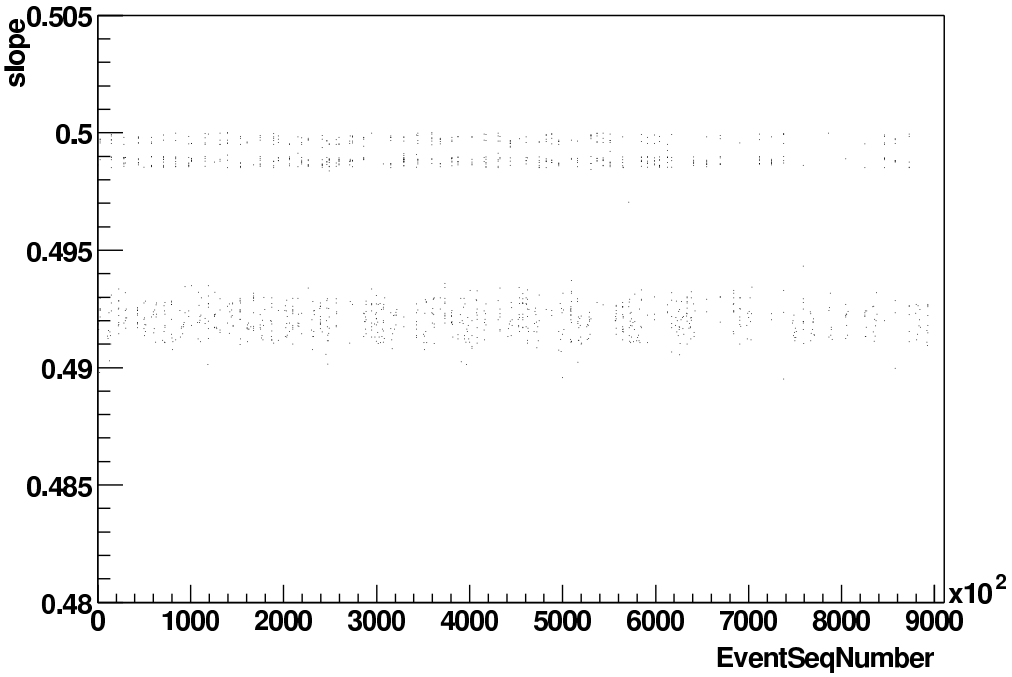

Abbildung 5.9: *Kalibrationsparameter für einen Kanal, wie sie von der beschriebenen Methode geliefert werden. Es ergeben sich zwei Bänder von Kalibrierungsfaktoren, von denen eines von Messungen während eines Spills des Strahls stammt, während das andere in der Ruhepause zwischen zwei Spills gemessen wurde. Die Daten stammen aus der Strahlzeit vom September 2003.*

Die Ergebnisse dieser Methode sind in Abbildung 5.9 für einen einzelnen Kanal eines TDC - Chips dargestellt. Die zwei Bänder in diesem Bild beruhen auf den Spannungsunterschieden, die sich durch die Tatsache ergeben, daß die Belastung des Chips während der Strahlpausen geringer ist, sinkt die Belastung der Versorgungsspannung, was zu größeren Kalibrierungsfaktoren führt. Dieser Effekt ist aber vernachläßigbar, da sich kein langsamer Abfall vom oberen Band zum unteren zeigt. In Abbildung 5.9 erscheint der Übergang von einem Band zum anderen abrupt zu erfolgen. Die Variation der Kalibrationsfaktoren innerhalb der Bänder sind so klein, daß sie keinen Einfluß auf die Qualität der Daten haben.

Strahlunterbrechungen oder die Abschaltung der Spannungsversorgung können jedoch dazu führen, daß die Kalibrationsfaktoren sich im anschließenden Strahlbetrieb langsam ändern. Um Ereignisse auswerten zu können, die während dieser Phase aufgenommen werden, ist es erforderlich, die Kalibrationsfaktoren in der Analyse dynamisch anzupassen.

In der Strahlzeit vom November 2003 wurde erstmals jeder Kanal eines TDC - Chips in einem Rotationsverfahren einer Kalibration unterzogen. Bei diesem Verfahren wurde mit jedem Kalibrationstrigger durch den DSP des Read - Out - Kontrollers die Maske für die zu kalibrierenden Kanäle in den TDC - Chips so verändert, daß jeweils der nächste Kanal kalibriert wurde.
In der davorliegenden Strahlzeit (November 2002) wurden nur zwei Kanäle pro Chip kalibriert und die Kalibrationsfaktoren der übrigen Kanäle durch Offsets nachgeführt. Diese Offsets wurden anhand von dedizierten Kalibrationsmessungen vor und nach der Strahlzeit bestimmt. Für die Strahlzeit vom November 2001 liegen lediglich dedizierte Kalibrationsmessungen vor. Aus diesen wurde ein Mittelwert gebildet und als Kalibrationsfaktor verwendet.

Die gleichzeitige Kalibrierung aller TDC - Kanäle ist wegen der dabei auftretenden großen Datenmengen nicht möglich. Durch das Rotationsverfahren wird die thermische Last, die durch den Kalibrierungsvorgang entsteht, gleichmäßig über die Fläche des Chips verteilt, wodurch die Änderung der Kalibrierungsfaktoren aufgrund der Kalibrationsmessung minimiert wird.

Für die Überwachung der Zeitauflösung der Driftkammerelektronik ist die Temperatur der Ausleseelektronik von besonderem Interesse, da bei Überhitzung die Elektronik zerstört werden kann. Die Spannungsversorgung wird vom SCS - System überwacht und protokolliert. Eine starke Änderung der Kalibrierungsfaktoren weist auf eine Temperaturänderung des Chips hin. Sinken die Kalibrierungsfaktoren ab, so ist dies ein Zeichen für die Erhöhung der Temperatur. Unterhalb einer Schwelle sollte auf eine solche Änderung der Kalibrationsfaktoren mit einer Abschaltung des Systems reagiert werden, um eine Zerstörung von Komponenten durch Überhitzung zu verhindern.
Da die Chips in SMD (→ **Surface mounted device**) - Technik ausgeführt sind, nehmen sie auch die Temperatur der Leiterplatte auf, bzw. geben Wärme an sie ab. Anhand der Kalibrierungsfaktoren der ersten beiden TDC - Chips relativ zu den anderen auf einem Board kann daher eine Aussage über die Temperatur in der Umgebung des CPLD - Chips gemacht werden. Sollte diese stark ansteigen, so ist davon auszugehen, daß sich der CPLD - Chip aufgrund einer Fehlfunktion stark erhitzt, was zu seiner Zerstörung führt. Durch rechtzeitiges Abschalten der Versorgungsspannung kann die Zerstörung des Chips verhindert werden.

5.2.3 Driftzeitspektren

Die Verteilung der Driftzeit liefert eine Information darüber, ob die gewählte Verzögerung für das Stopsignal zu den Parametern des Driftgases paßt. Ist die Verzögerung zu groß, so werden Signale von Teilchen, die nahe am Signaldraht vorbeifliegen und wegen der früheren Ankunftszeit des Signals zu langen Meß-

zeiten führen, durch Überschreitung des TDC-Meßbereiches verworfen. Bei zu kurzer Verzögerung werden Signale von Teilchen, die einen größeren Abstand vom Signaldraht haben, unterdrückt.

Eine kontinuierliche Kontrolle der Driftzeitverteilung erlaubt daher auch Rückschlüsse auf das Zeitverhalten des Triggersystems, da dieses die zeitliche Lage des Stopsignals bestimmt.

Für diese Kontrollen ist die Darstellung der mittleren Driftzeiten für eine Kammer summiert über $\approx$1000 Ereignisse am besten geeignet. Diese Form ist exemplarisch in Abbildung 5.10 für die einzelnen Kammern dargestellt. Die mittlere Driftzeit sollte für alle Kammern einer Ebene ähnlich sein. In Abbildung 5.10 fällt auf, daß für die Sektoren 3, 5 und 6 in Ebene I die mittlere Driftzeit größer ist als für die Sektoren 1 und 2. Grund ist die schlechte Unterdrückung des Untergrundrauschens für diese, sowie die Kammern in den Sektoren 5 und 6. Dies wird durch Abbildung 5.11 verdeutlicht.

In dieser Abbildung ist die "Time-Above-Threshold"-Zeit gegen die erste gemessene Zeit aufgetragen. Die scharfen Kannten werden durch die Schnitte in der Analyse verursacht. Sehr kleine und sehr große Driftzeiten stellen keine relevante Information dar. Dies gilt auch für sehr kleine "Time-Above-Threshold"-Zeiten. All diese Zeiten werden durch Störsignale verursacht.

Für Sektor 3 Ebene I ist ein deutlich höherer Untergrund zu erkennen. Dies gilt ebenso für Sektor 4 und 5 in Ebene I, wobei der Effekt hier nicht so stark ausgeprägt ist. Vergleicht man dies mit Abbildung 5.10, erklärt sich die deutliche Erhöhung des Mittelwertes der Driftzeit im Sektor 3 und die leichte Erhöhung in Sektor 4 und 5.

In Ebene II gilt dies für alle Kammern ab Sektor 3. Hier ist gegenüber den ersten beiden Sektoren ebenfalls eine leichte Erhöhung des Mittelwertes der Driftzeit zu beobachten. Wohingegen bei den beiden äußeren Ebenen der Untergrund schon so stark ausgeprägt ist, daß ein Unterschied zwischen den Verteilungen in Abbildung 5.11 nicht zu erkennen ist.

Die Mittelwerte der Driftzeiten einer Kammer liefern Informationen über die Zeitlage des "Common-Stop"-Signales relativ zum Ereignis und über die Driftgeschwindigkeit. Sollte die mittlere Driftzeit aller Kammern zu einem anderen Wert springen, so weist dies auf eine Änderung im Zeitverhalten des Triggersystems hin. Ein langsames Ansteigen der mittleren Driftzeit hingegen bedeutet eine Änderung in der Driftgeschwindigkeit, die in der Regel durch eine veränderte Gaszusammensetzung verursacht wird.

Abbildung 5.10: *Trenddarstellung der Driftzeitverteilung. Für jede Kammer ist die Driftzeit gemittelt über 1000 Ereignisse als Funktion der Zeit dargestellt. Die Daten stammen aus der Strahlzeit vom September 2003. Von oben nach unten sind die vier Ebenen und von links nach rechts die sechs Sektoren dargestellt.*

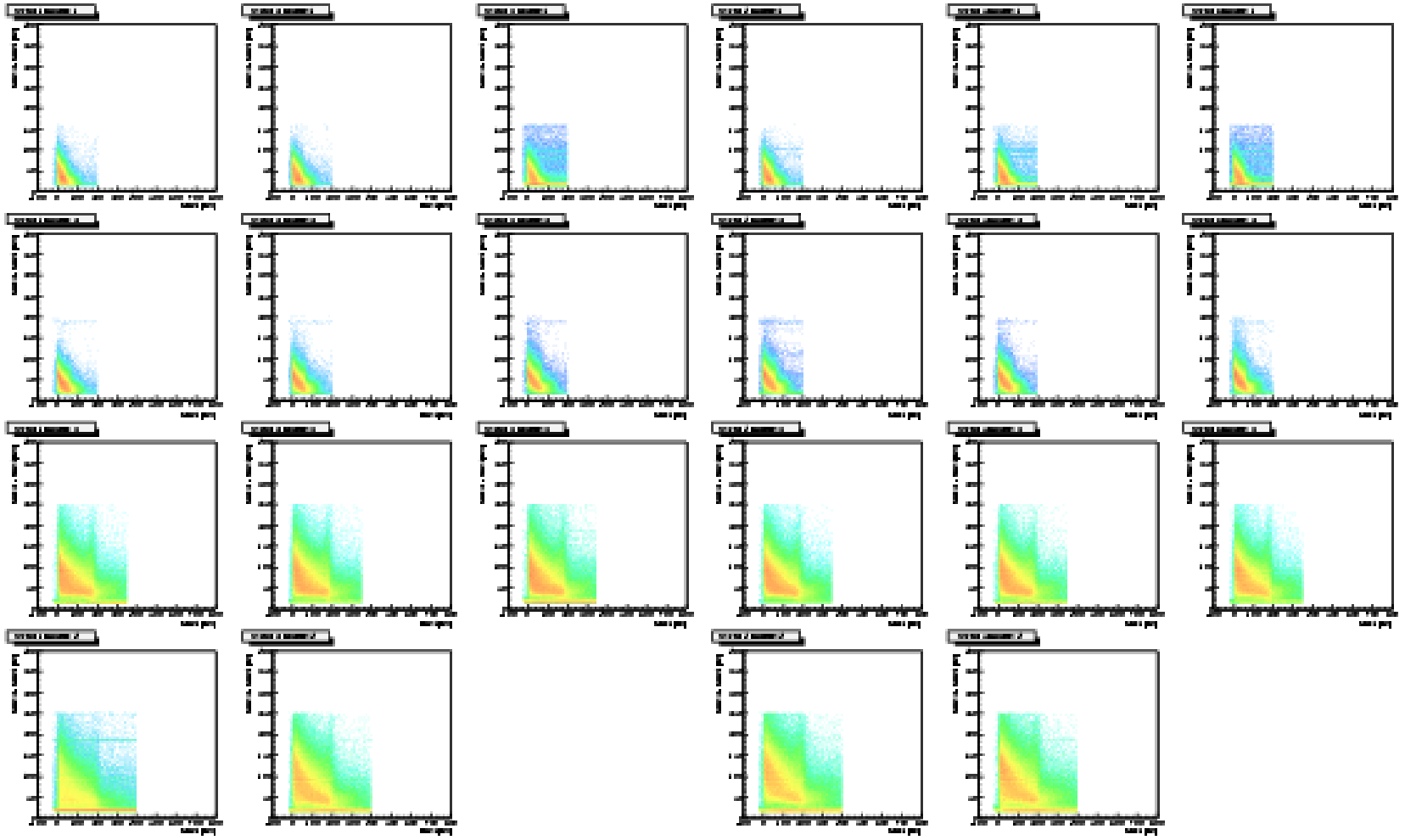

Abbildung 5.11: *"Time above threshold" (tat) als Funktion der ersten gemessenen Zeit für alle Kammern. Daten aus der Strahlzeit September 2003. Aufgetragen sind die Sektoren nach rechts und die Ebenen nach unten.*

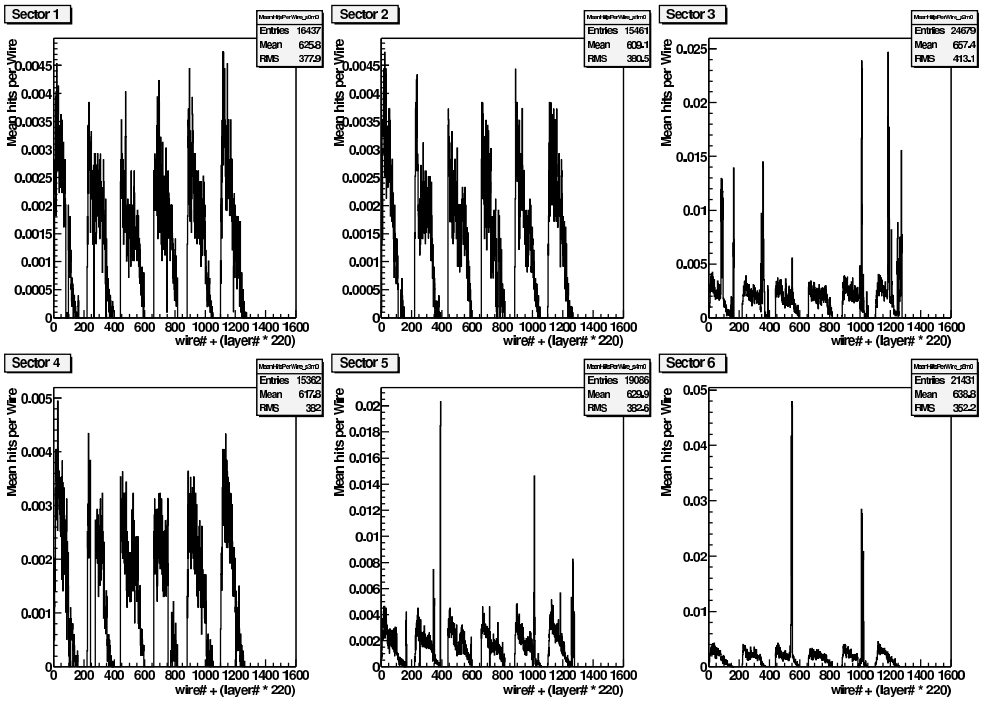

Abbildung 5.12: *Mittlere Multiplizität pro Driftzelle für alle sechs Sektoren der Driftkammern der ersten Ebene. Aufgetragen sind die Multiplizitäten als Funktion der Zellennummer, wobei sich die Zellennummer berechnet zu: Drahtnummer + (Ebene * 220). In den Sektoren 3, 5 und 6 zeigen sich einzelne Kanäle mit hohen Multiplizitäten. Daten vom September 2003 ($p + p$ @2,9 GeV).*

Eine kleine Änderung der Hochspannung hat bei den verwendeten Spannungen keinen Einfluß auf die Driftgeschwindigkeit. Ihr Effekt kann daher bei der Betrachtung der mittleren Driftzeit vernachläßigt werden. Nur wenn die Detektoren am Rand des Effizienzplateaus betrieben werden, muß die Änderung der Hochspannung berücksichtigt werden, da dann die Driftgeschwindigkeit sich signifikant ändert.

5.2.4 Hit - Multiplizitäten

Die Rekonstruktion der Spuren findet in der Analyse in zwei Schritten statt. Im ersten Schritt werden Kandidaten für Treffer gesucht, indem die Kreuzungspunkte aller getroffenen Signaldrähte in einer Kammer gesucht werden. Danach wird durch Projektion dieser Punkte von den beiden Kammern vor dem Magneten und der beiden hinter dem Magneten auf jeweils eine gemeinsame Ebene nach Kandidaten für Spuren gesucht. Im zweiten Schritt wird unter Hinzunahme der Driftzeiten die Positionsbestimmung dieser Spuren verbessert.

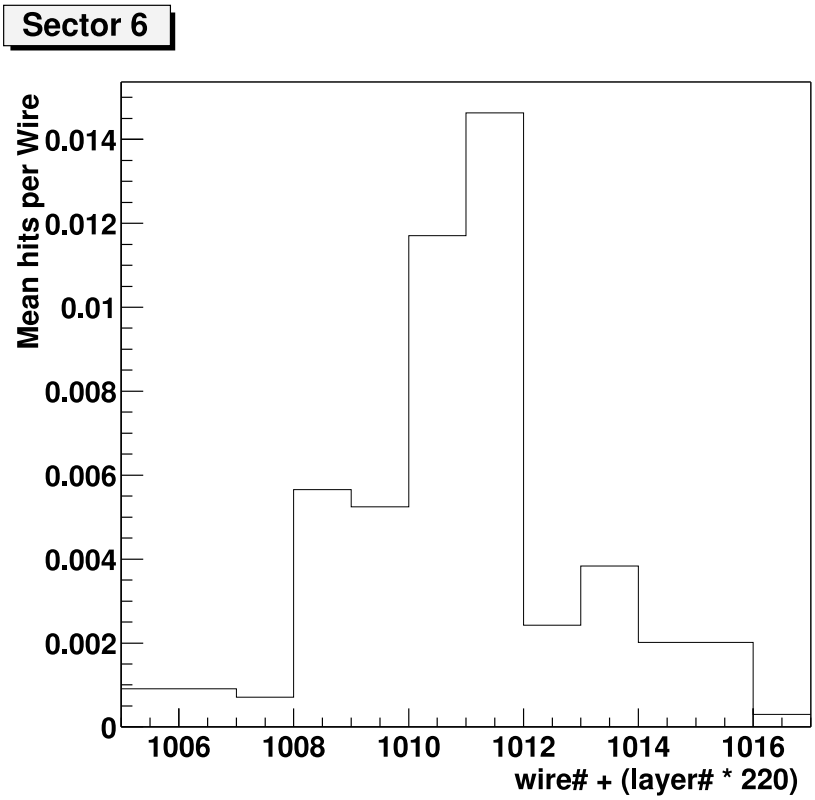

Abbildung 5.13: *Mittlere Multiplizität pro Driftzelle für Sektor 5 Ebene I. Detail aus Abbildung 5.12, mittlere Abbildung untere Reihe. Vier nebeneinanderliegende Kanäle zeigen eine deutlich höhere Multiplizität. Diese Kanäle liegen zusammen auf einem FPC-Kabel.*

Aufgrund von elektronischem Rauschen liefern auch Driftzellen ein Signal, durch die kein Teilchen hindurchgeflogen ist. Nimmt die Anzahl solcher Zellen einen zu großen Wert an, so steigt einmal die Ereignisgröße an, was zu einer Verlangsamung der Datenaufnahme führt, und gleichzeitig sinkt die Auflösung der Rekonstruktionssoftware. Die Zahl der Zellen, die ein Signal aufgrund des Rauschens des Vorverstärkers liefern, hängt direkt von den eingestellten Schwellen für die Diskriminatoren ab.

Zur Kontrolle der Qualität der eingestellten Schwellen eignet sich die mittlere Multiplizität pro Zelle. Übersteigt sie einen Grenzwert, so ist die Schwelle des betreffenden Kanals nicht optimal eingestellt. Da die Schwelle jedoch nur für sechzehn Kanäle parallel eingestellt werden kann, ist ein gewisser Anteil an rauschenden Kanälen nicht zu vermeiden.

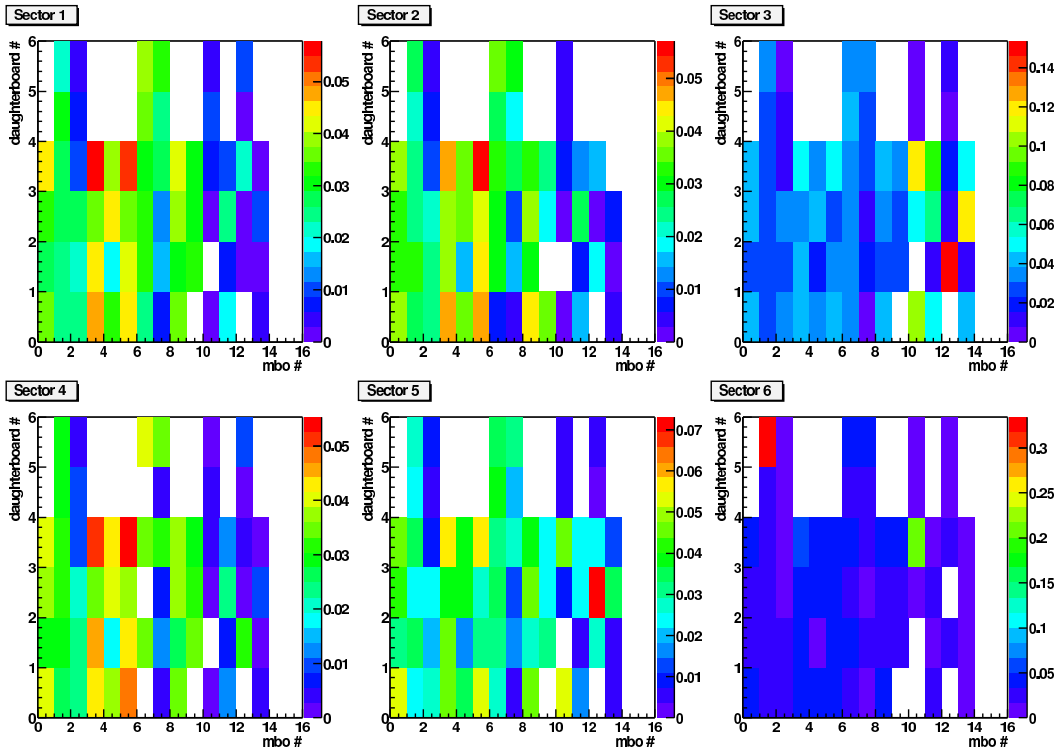

Abbildung 5.14: *Mittlere Multiplizität pro Daughterboard für alle sechs Sektoren der Driftkammern der ersten Ebene als Funktion des Motherboards. Je nach Typ besitzt ein Motherboard entwerder vier oder sechs Daughterboards. Dem Bild liegt der gleiche Datensatz wie Abbildung 5.12 zugrunde.*

In Abbildung 5.12 ist als Beispiel die mittlere Multiplizität für die Kammern der ersten Ebene gezeigt. Eine detailierte Analyse der scharfen Spitzen zeigt, daß dies immer vier Kanäle sind, die zusammen auf einem FPC (→ **Flexible Printed Circuit**) - Kabel liegen. Die Abbildung 5.13 zeigt eine Vergrößerung einer der Spitzen aus Sektor 6 in Abbildung 5.12. Da immer nur ein Kanal eine hohe Zählrate aufweist, ist dies ein Hinweis auf Übersprechen auf den FPC - Kabeln. Diese Information ist zum Beispiel nützlich, um durch Deaktivieren von einzelnen Kanälen die Datenrate im Level 1 - Bus zu reduzieren.

Die Darstellung der Multiplizitäten in Abbildung 5.12 erlaubt zwar eine Aussage darüber, ob Kanäle eine falsch eingestellte Schwelle haben, aber noch nicht, welche Daugtherboards davon betroffen sind. Dazu ist es erforderlich, die Multiplizität als Funktion der einzelnen Daughterboards darzustellen, wie es Abbildung 5.14 für denselben Datensatz wie in Abbildung 5.12 tut.

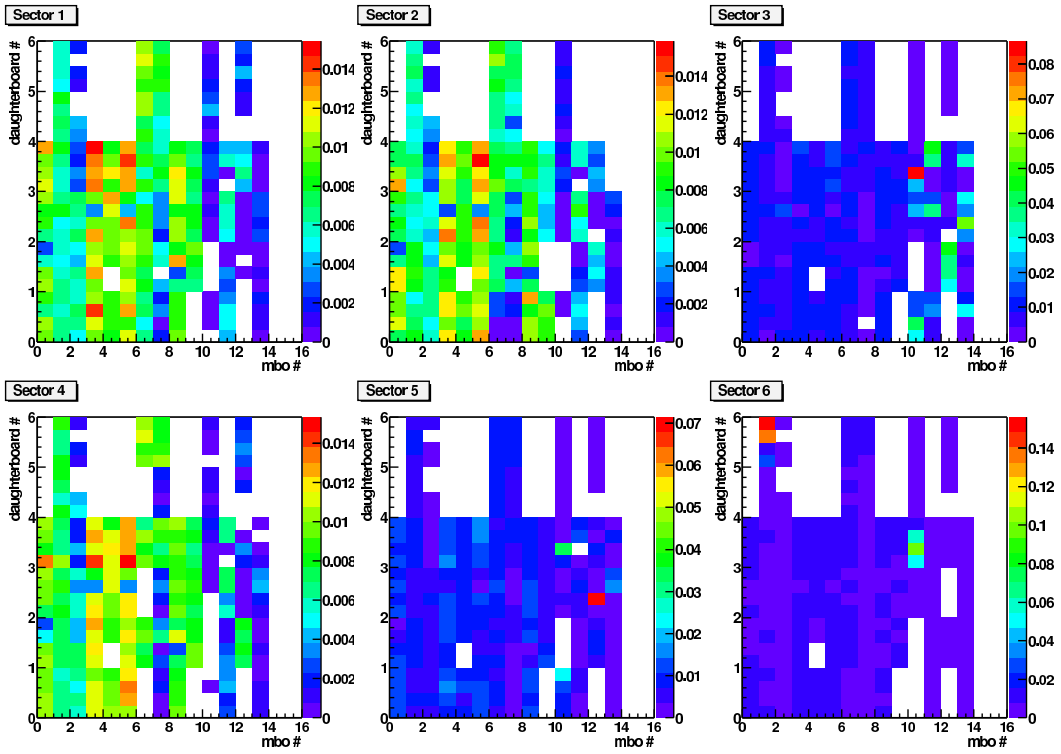

Abbildung 5.15: *Mittlere Multiplizität pro FPC - Kabel für alle sechs Sektoren der Driftkammern der ersten Ebene als Funktion des Motherboards. Jedes Daughterboard besitzt Anschlüsse für vier FPC Kabel. Dem Bild liegt der gleiche Datensatz wie Abbildung 5.12 zugrunde.*

Eine hohe Multiplizität in diesem Spektrum für ein Daughterboard zeigt direkt an, auf welchem Daughterboard die Schwelle möglicherweise angepaßt werden muß. Allerdings erlaubt diese Darstellung keine Aussage darüber, ob alle Kanäle auf dem Daughterboard gleichermaßen betroffen sind, oder nur einzelne, die zu einem FPC - Kabel gehören. Eine Anpassung der Schwelle ist nur dann empfelenswert, wenn alle Kanäle nahezu gleichmäßig betroffen sind. In Abbildung 5.14 in Sektor 6 wäre zum Beispiel für das Daughterboard 6 auf dem Motherboard 2 die Schwelle zu niedrig eingestellt. Im Gegensatz dazu ist sie im Sektor 1 für die Daughterboards 4,5 und 6 auf dem Motherboard 2 zu hoch einggestellt.

Wird die Schwelle zu hoch eingestellt, um alle Kanäle auf einen gleichen Pegel bei den Multiplizitäten zu bekommen, so kann dadurch jedoch die Effizienz eingeschränkt werden, da nun möglicherweise nicht mehr alle Signale einen Pegel erreichen, der oberhalb der Schwelle liegt. Die Wahl der Schwellen erfolgt daher aufgrund einer Abwägung zwischen einer maximalen Effizienz und minimalem Rauschen.

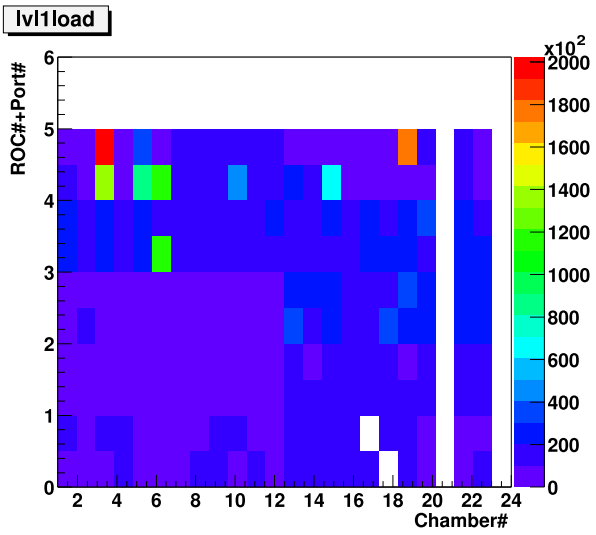

Abbildung 5.16: *Datenrate auf den einzelnen Level 1 - Bus - Systemen. Jeder Read -Out - Kontroller besitzt zwei Bus - Systeme. Totale Anzahl der Datenworte für 10.000 Ereignisse. Kammern 1 - 6: Ebene I; Kammern 7 - 12: Ebene II; Kammern 13 - 18: Ebene III; Kammern 19 - 24: Ebene IV.*

Für diese Entscheidung ist eine weitere Verfeinerung der Darstellung nötig, bei der die Multiplizität für jedes einzelne FPC - Kabel dargestellt wird. Da, wie in Abbildung 5.12 zu sehen, in der Regel alle vier Kanäle eines FPC - Kabels eine erhöhte Multiplizität zeigen, ist diese Darstellung am besten geeignet, zu entscheiden, ob die eingestellten Schwellen dem unter den gegebenen Bedingungen optimalen Zustand entsprechen. Diese Darstellung wird durch Abbildung 5.15 repräsentiert.

An Stellen, an denen keine Einträge auftauchen, sind keine FPC - Kabel mit den Eingängen des Daughterboards verbunden, oder die Schwelle ist so hoch eingestellt, daß der Diskriminator kein Signal mehr durchläßt. Im Rahmen der Echtzeitüberwachung sollten die Stellen markiert werden, an denen keine FPC - Kabel angeschlossen sind, um die Entscheidung zu vereinfachen, ob die Schwellen zu hoch eingestellt sind. Dabei müssen aber deaktivierte TDC - Kanäle berücksichtigt werden.

Wie in Kapitel 4 erläutert, ist die Verkabelung der Level 1 - Bus - Systeme so gewählt, daß auf allen Systemen im Mittel die gleiche Datenmenge pro Ereignis übertragen wird. Schlecht gewählte Schwellenwerte führen zu einer Vergrößerung der Datenmenge und damit zu einer Überlastung des Level 1 - Bus - Systems. Um

dies zu erkennen, ist eine Darstellung der Datenrate pro Level 1-Bus-System sinnvoll, wie sie in Abbildung 5.16 gezeigt ist. Dadurch ist auch eine Beurteilung möglich, auf welchen Motherboards bevorzugt nach Kanälen mit hohen Datenraten geschaut werden muss.

Ein Ausfall von Teilen der Ausleseelektronik kann im Gegenzug zu einem Absinken der mittleren Belastung der Level 1-Bus-Systeme führen. Nur wenn das erste, an einem Level 1-Bus angeschlossene Motherboard ausfällt, äußert sich dies in einem leeren Feld in der Abbildung, da in diesem Fall das Token nicht an den Read-Out-Kontroller zurückgeliefert wird. In dem Fall, daß eines der weiteren zwei Motherboards am Bus ausfallen sollte, ist die Datenrate auf dem betroffenen Bus lediglich reduziert.

Für die beiden inneren Ebenen (Kammern 1 - 12 in Abbildung 5.16) ist zu erkennen, daß die ersten drei Read-Out-Kontroller eine geringfügig kleinere Datenmenge zu bewältigen haben, als die letzten beiden. Das hat seine Ursache darin, daß diese Read-Out-Kontroller mit lediglich einem Motherboard je Level 1-Bus verbunden sind, während die anderen Read-Out-Kontroller mehrere Motherboards pro Level 1-Bus auslesen.

Für die beiden äußeren Ebenen (Kammern 13 - 24 in Abbildung 5.16) ist die Lastverteilung gleichmäßig. Ursache hierfür ist eine sehr hohe Rate an Sekundärteilchen, die von einem Detektor ausgehen, der während der Strahlzeit (September 2003) im Bereich hinter dem Target angebracht war. Diese Teilchen wurden nur in den äußeren Kammern als Treffer registriert.

5.3 Qualitätskontrolle auf Analyseebene

Die Qualitätskontrolle der Analyse teilt sich in zwei Teilschritte auf. Bei der sogenannten Low-Level-Qualitätskontrolle werden die Daten ausgewählt, die für die Produktion von DST-Dateien geeignet sind. Während der eigentlichen DST-Produktion werden Kontrollhistogramme erstellt, die dazu dienen, die Qualität der Daten in den DST-Dateien zu beurteilen. Für jeden dieser Schritte kommen ausgewählte Parameter zum Einsatz, die sich für die jeweils zu treffende Entscheidung am besten eignen.
Dabei werden diese Schritte für jede neue DST-Generation wiederholt. So werden für die erste Generation DST nur die besten Datensätze ausgewählt, für weitere Generationen können dann auch Datensätze mit geringerer Qualität verwendet werden, wenn für diese Datensätze optimierte Analyseparameter vorhanden sind. Die dadurch erzielte Vergröserung der Statistik verbessert durch kleinere statistische Fehler die Aussagekraft der Daten.

Da diese Schritte der Qualitätskontrolle “offline” stattfinden, kann hier eine detaillierte Analyse der Daten vorgenommen werden. In diesen Schritten ist daher auch eine komplette Rekonstruktion der Ereignisse mit Spurverfolgung und Teilchenidentifikation möglich. Dies erlaubt eine sehr viel detailliertere Analyse der Daten als es im “Online” - Teil der Qualitätskontrolle möglich ist. Auch systematische Studien, für die man hohe Statistik benötigt, sind erst in diesem Teil der Qualitätskontrolle möglich.

5.3.1 Low - Level - Qualitätskontrolle

Auf der Basis der Low - Level - Qualitätskontrolle sollen hauptsächlich zwei Entscheidungen getroffen werden. Zum einen welche Datensätze für die DST - Produktion verwendet werden, und zum anderen sollen diese Datensätze in Gruppen zusammengefaßt werden, die unter nahezu identischen Bedingungen aufgenommen wurden. Da die zeitliche Lage des Stopsignals für die TDC - Chips stark vom Zeitverhalten des Triggersystems für die erste Triggerstufe abhängt, muß dieser Effekt bei der Analyse korrigiert werden. Dies geschieht durch die Offsetkalibrierung die in [Mar04a] untersucht wird.

Für diese beiden Entscheidungen eignen sich Trenddarstellungen von Parametern besonders, da sie eine Information über eine zeitliche Variation in den Betriebsbedingungen der Driftkammern liefern.
Können diese Trends dann eindeutig mit dem zeitlichen Verlauf von Betriebsparametern der Driftkammern (Gasqualiät, Hochspannung usw.) korreliert werden, so ist eine Aussage über die Qualität eines Datensatzes möglich.

Der Trend der mittleren Driftzeit über jeweils einige hundert Ereignisse und mehrere Datensätze, wie er in Abbildung 5.17 dargestellt ist, hilft bei der Entscheidung, für welche Gruppen von Datensätzen jeweils eine eigene Offsetkalibrierung erforderlich ist. Durch einen Vergleich der Darstellungen vor und nach erfolgter Offsetkalibrierung kann auf die Güte der Kalibrierungsparameter geschlossen werden. Nach der Offsetkalibrierung sollten die mittleren Driftzeiten konstant sein. Sind nach der Offsetkalibrierung immer noch Abweichungen vom Mittelwert für einzelne Datensätze vorhanden, so ist dies ein Zeichen für ein Problem mit den Betriebsparametern des Detektors. Solche Datensätze werden dann nicht vorrangig für die DST - Produktion verwendet.

Abbildung 5.18 zeigt für die Strahlzeit im September 2003 den Verlauf der mittleren Driftzeit für den Sektor 2 Ebene I in einem Datensatz. Der Mittelwert dieser Verteilung wird für jeden Datensatz bestimmt. Es ergibt sich dann eine Verteilung wie in Abbildung 5.17 gezeigt. Hier ist der Mittelwert der ersten gemessenen Driftzeit als Funktion des Datensatzes in chronologischer Reihenfolge dargestellt. Die Analyse hat vor der Offsetkalibrierung stattgefunden

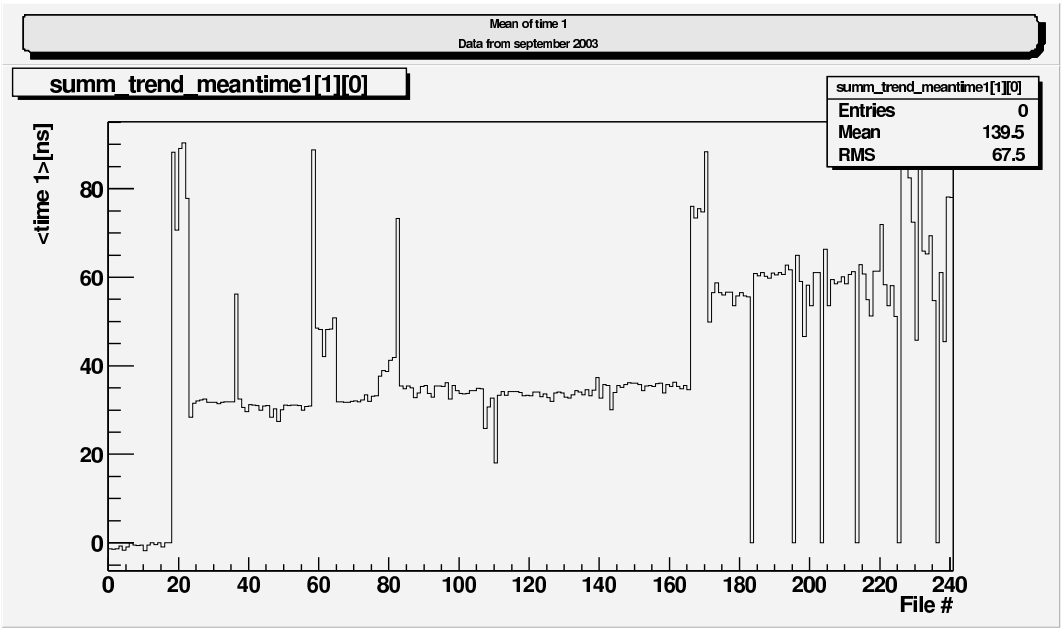

Abbildung 5.17: *Mittelwert der ersten gemessenen Driftzeit aller Datensätze der Strahlzeit vom September 2003 für Sektor 1 Modul 0. [Sad04] [Mar04b].*

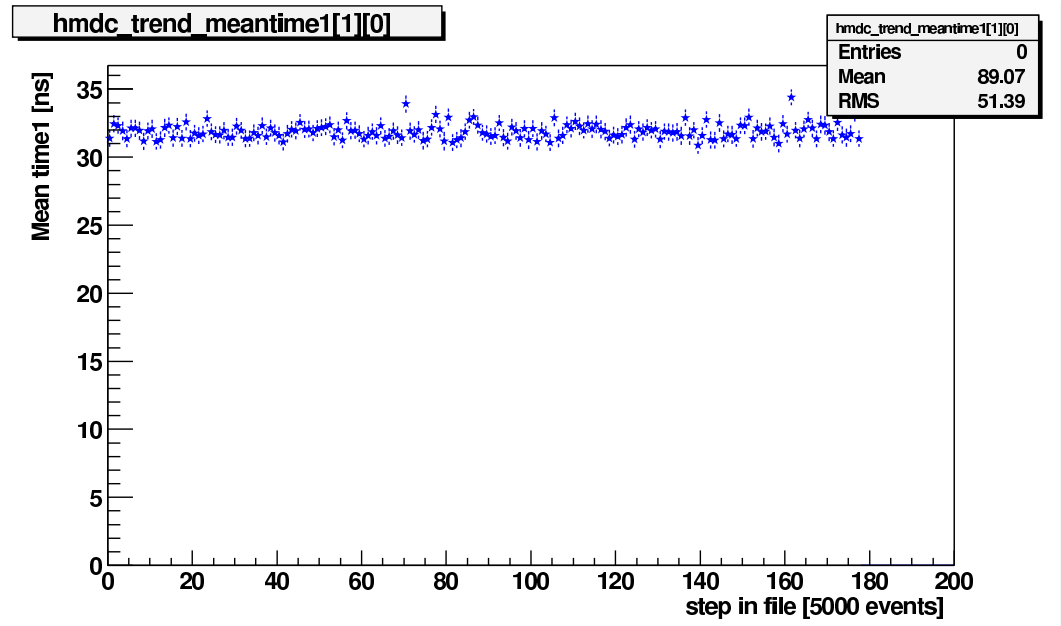

Abbildung 5.18: *Trend für die mittlere Driftzeit in Sektor 1 Modul 0. Daten vom September 2003 [Sad04] [Mar04b].*

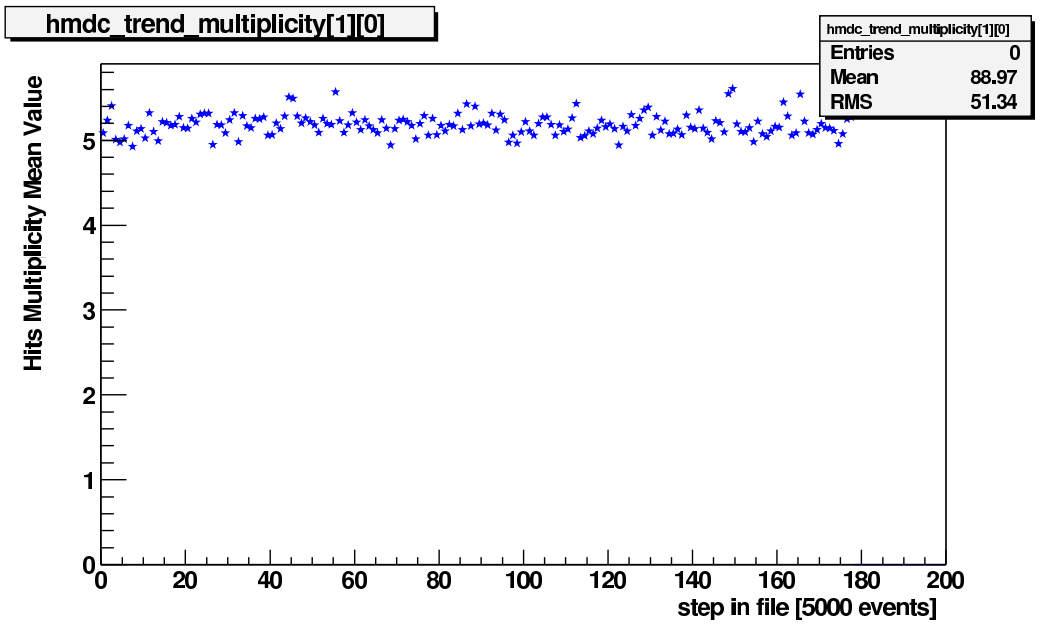

Abbildung 5.19: *Trend der Drahtmultiplizität pro Spur und Ereignis im Sektor 2 Ebene I. Daten vom September 2003 [Sad04] [Mar04b].*

und ermöglicht daher die Gruppierung der Datensätze, für die eine gemeinsame Kalibrierung des Offsets sinnvoll ist (Details siehe [Mar04a]). Die Datensätze lassen sich in zwei Gruppen zusammenfassen. Einmal die mit einem Mittelwert bei $\approx 35\,\mathrm{ns}$ und die bei $\approx 60\,\mathrm{ns}$.

Die mittlere Anzahl der gefeuerten Drähte pro Ereignis liefert eine Information über die Effizienz der Kammern. Für jedes geladene Teilchen, das die Kammer durchquert, sollte bei optimaler Effizienz der Kammer jede der sechs Drahtebenen ein Signal liefern. In Abbildung 5.19 ist der Verlauf der mittleren Anzahl an angesprochenen Drähten pro Treffer und Ereignis für einen Datensatz vom September 2003 gezeigt. Die Multiplizität liegt unterhalb des erwarteten Wertes von sechs Drähten. Ursache hierfür ist die Effizienz des Detektors, die nicht exakt 100 % beträgt, sodaß nicht immer alle Zellen, durch die ein Teilchen hindurchgeflogen ist, ein Signal liefern.
Im Rahmen des Spursuchalgorithmus (vgl. Kapitel 3.2) werden die Drähte, die einen Treffer in einer Kammer definieren zueinander gruppiert. Die maximale Anzahl an Drähten die zu einem Treffer beitragen beträgt sechs, die minimale variiert je nach verwendeter Suchmethode zwischen drei und fünf. Für Abbildung 5.19 wurde die Anzahl der Drähte pro gefundenem Treffer in einem Ereignis aufsummiert und durch die Anzahl der Treffer geteilt. Ereignisse ohne Treffer tauchen daher in dieser Abbildung nicht auf.

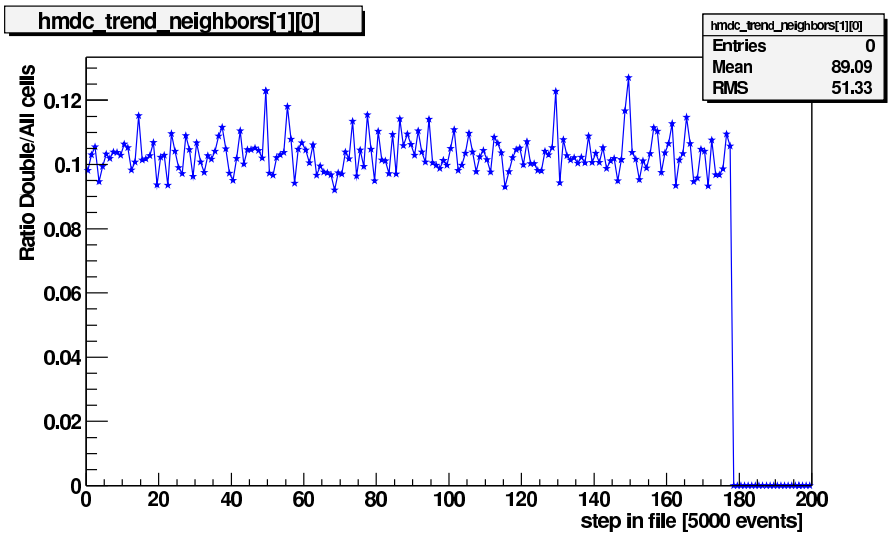

Abbildung 5.20: *Trend des Verhältnisses von einzelnen getroffenen Zellen zu Treffern, bei denen auch benachbarte Zellen in der Ebene getroffen wurden. Dargestellt ist Sektor 2, Ebene I. Daten vom September 2003 [Sad04] [Mar04b].*

Um zu vermeiden, daß der Spursuchalgorithmus viele falsche Spuren findet, werden Meßwerte, die auf Untergrundrauschen beruhen, und korrelierte Signale (z.B. CMS - Noise, Clock - Noise, siehe Abschnitt 4.8) durch Anwenden von Bedingungen auf die gemessenen Driftzeiten und die Größe der Differenz zwischen den beiden Driftzeiten eines Signaldrahtes unterdrückt.
Bei den korrelierten Signalen handelt es sich um ein Übersprechen des CMS - Signales auf die Meßeingänge, das zu kleinen Zeitwerten führt. Sehr große Zeitwerte werden durch unkorreliertes Rauschen der Analogelektronik oder durch Elektronen aus dem Randbereich der Driftzelle bei gleichzeitigem Signal in der Nachbarzelle verursacht.

In Abbildung 5.11 auf Seite 92 ist die Differenz zwischen den beiden gemessenen Driftzeiten gegen die erste Zeit aufgetragen. Die scharfen Grenzen entlang der Zeit 1 - Achse und der "Time - Above - Threshold" - Achse werden durch die Bedingungen veursacht, die auf die gemessenen Driftzeiten und die Differenz zwischen den beiden Driftzeiten eines Signaldrahtes gestellt werden. In einigen Kammern zeigen sich waagerechte Strukturen mit hoher Multiplizität bei kleinen Driftzeitdifferenzen. Dabei handelt es sich um Störsignale, die vom CMS - Signal durch Übersprechen verursacht werden. In diesem Fall wird das Signal nicht durch die Bedingungen weggeschnitten, da es in dem Bereich liegt, in dem auch die Driftzeiten von echten Signalen liegen.

Das Verhältnis der Anzahl der Zellen, bei denen auch die Nachbarzelle getroffen wurde, zur Anzahl aller getroffener Zellen liefert eine Information über das Übersprechen auf den FPC - Kabeln. Dieses Übersprechen wurde bereits bei den mittleren Multiplizitäten pro Signaldraht (Zelle) beschrieben (vgl. Abschnitt 5.2.4, insbesondere Abbildung 5.12.). In Abbildung 5.20 ist dies für einen Datensatz aus der Strahlzeit vom September 2003 für den Sektor 2 Ebene I dargestellt. Die Wahrscheinlichkeit, daß bei einem Treffer auch die benachbarte Zelle ein Signal sieht, beträgt für diesen Datensatz 10%.

Als weitere Quelle für das Ansprechen von benachbarten Signaldrähten kommen Teilchen in Betracht, die unter sehr kleinem oder sehr großem Winkel in die Kammer eintreten. Bei diesen Teilchen handelt es sich zum größten Teil um Sekundärteilchen aus der Kollision von Reaktionsprodukten mit Material des Detektoraufbaus. Ein zweiter Teil der Teilchen stammt von Reaktionen, die nicht im Target stattgefunden haben sondern mit Materialien auf der Strahlachse hinter dem Target. Dabei handelt es sich zum Beispiel um die Austrittsfolie des Strahlrohres, oder den Veto - Detektor. Spuren von diesen Teilchen können erst nach der Vertexrekonstruktion mit ausreichender Effizienz aus den Daten entfernt werden.

Um zu entscheiden, welche Datensätze für die Produktion der DST - Dateien verwendet werden können, wird in den Darstellungen von z.B. Abbildung 5.17 um den Mittelwert ein Fenster von 3 σ gesetzt. Alle Datensätze innerhalb des Fensters werden akzeptiert. Dies geschieht nicht nur für eine Variable sondern es werden je nach Erfordernis mehrere miteinander kombiniert. Die Wahl der Fensterbreite kann je nach Anforderung und betrachtetem Parameter verschieden sein. Eine allgemeingültige Aussage, bis zu welcher Grenze ein Datensatz in einem Parameter noch als akzeptabel angesehen werden kann, ist nicht möglich.

So kann eine Erhöhung des Anteils an Treffern, bei denen benachbarte Zellen getroffen wurden, zum einen durch eine erhöhte Teilchenmultiplizität im Ereignis hervorgerufen werden. Sie kann aber auch auf einem höheren Anteil an Störsignalen beruhen. Deshalb muß eine Korrelation mit anderen Variablen (z.B. Time - Above - Threshold) durchgeführt werden.

5.3.2 DST - Qualitätskontrolle

Um sicherzustellen, daß alle Fehler, die bei der DST - Produktion auftreten können erkennbar sind, werden während der DST - Produktion Kontrollhistogramme erstellt, die eine Information über die Qualität der Daten liefern. Die Kontrollhistogramme enthalten Parameter, die entscheidend von der Qualität der Analyseparameter bestimmt werden. Zu diesen Parametern gehören je nach

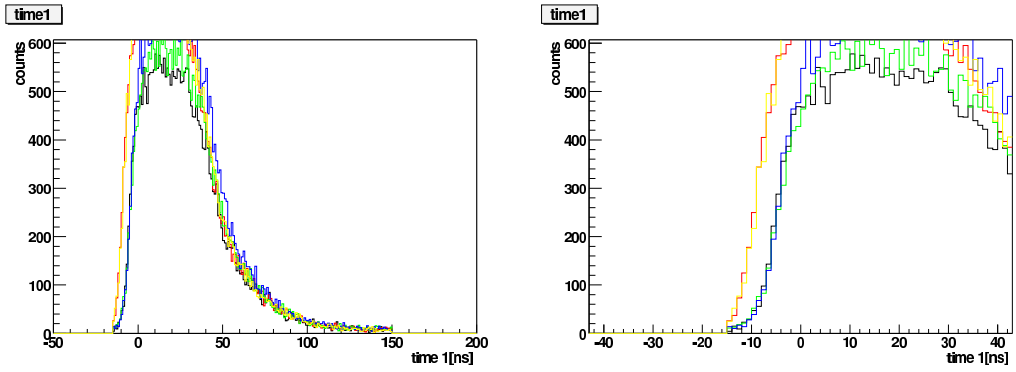

Abbildung 5.21: *Driftzeitverteilung für die Kammern der Ebene I für fünf verschiedene Datensätze vom November 2002. Es zeigen sich zwei Gruppen von Driftzeitverteilungen. Das rechte Bild zeigt einen Ausschnitt der steilen Flanke des linken Bildes.*

Detektor zum Beispiel Schwellenwerte, Kalibrierungsfaktoren und Offsetkorrekturen. Da sich diese von Datensatz zu Datensatz unterscheiden können, muß sichergestellt werden, daß die Analysesoftware jeweils den zugehörigen Parametersatz lädt.

Die Zuordnung der Parametersätze zu einem Rohdatensatz findet über eine eindeutige Referenzzahl statt, die von der Datenaufnahme jedem Datensatz zugeordnet wird. Für jede dieser Referenzzahlen muß ein Satz von Parametern definiert werden, mit denen in der Analyse gearbeitet wird. Eine unvollständige Bestimmung der Parameter kann zum Beispiel zu einem Effekt führen, wie er in Abbildung 5.21 gezeigt ist. Hier ist die Driftzeitverteilung von Ebene I für fünf verschiedene Datensätze vom November 2002 gezeigt. Alle diese Datensätze wurden mit demselben Satz Kalibrationsparameter kalibriert.

Die steigende Flanke dieser Verteilung sollte eigentlich bei Null liegen. Aus der Tatsache, daß dies für keinen der Datensätze der Fall ist ergibt sich, daß die Offsetbestimmung nicht optimal durchgeführt wurde. Im rechten Bild von Abbildung 5.21 zeigen sich zudem noch zwei Gruppen von Datensätzen, zwischen denen sich der Offset um $\approx 5\,\mathrm{ns}$ verschiebt. Eine Überprüfung ergab, daß zwischen diesen beiden Datensätzen das Timingverhalten des Triggersystems geändert wurde um die Messung der Flugzeit im TOF - Detektor zu optimieren. Daher wäre eine getrennte Bestimmung der Offsetparameter für die beiden Gruppen von Datensätzen nötig. Mangels Statistik ist dies jedoch nicht möglich. Um dies zu verhindern, muß die DST - Qualitätskontrolle Informationen liefern, die solche Probleme zu erkennen helfen.

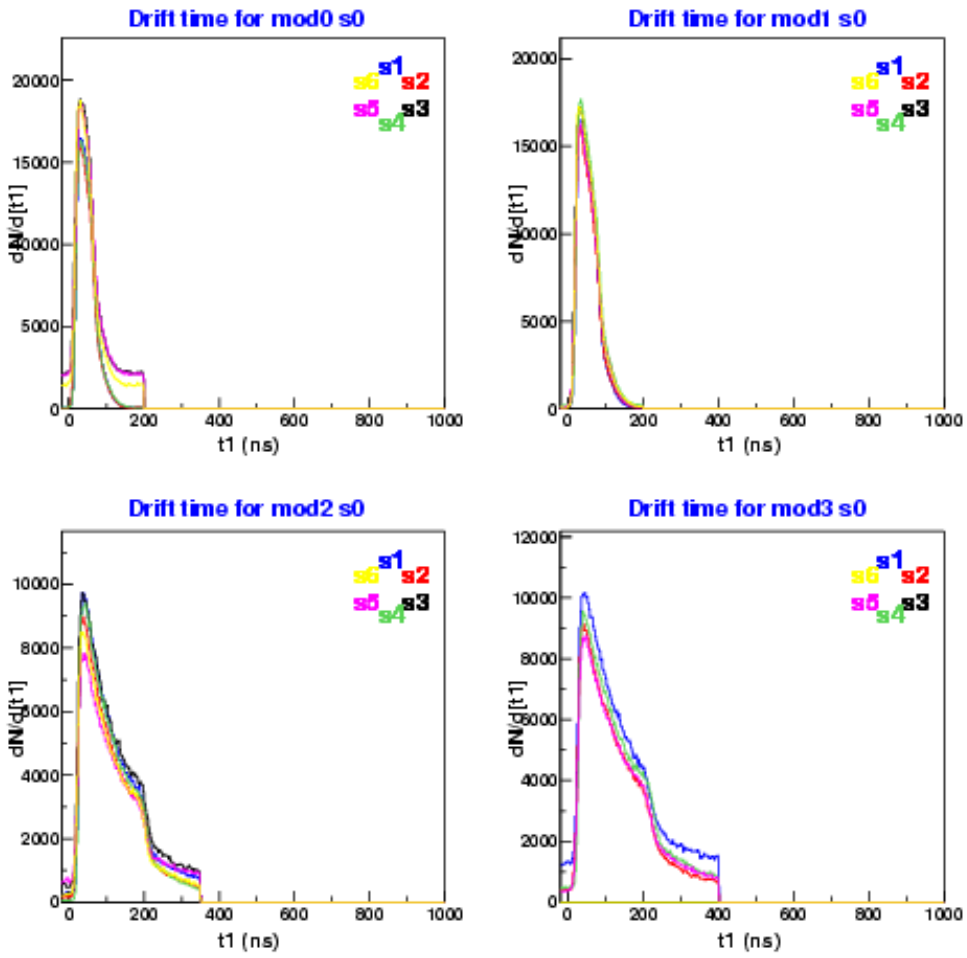

Abbildung 5.22: *Driftzeitverteilung für die vier Ebenen (mod) von Driftkammern.*

Für jeden Detektor ist ein spezieller Satz von Kontrollhistogrammen definiert, die im Rahmen der DST - Produktion für jeden Rohdatensatz einzeln gefüllt werden. Diese Kontrollhistogramme müssen anschließend durchgesehen werden, um zu entscheiden, welche Datensätze eventuell nochmal analysiert werden müssen. Die Kontrollhistogramme der Driftkammern werden im folgenden Abschnitt gezeigt.

5.3.3 Kontrollhistogramme der Driftkammern

Zur Kontrolle der Fenster, die auf die gemessenen Driftzeiten angewandt werden, wird die Verteilung der Driftzeiten und die Zeitspanne, in der das Signal über der Schwelle war (TAT), in Abhängigkeit von Sektor und Ebene dargestellt. Anhand dieser Abbildungen (vgl. Abbildung 5.22 und 5.23) kann entschieden werden, ob die Zeitfenster zu eng oder zu weit eingestellt sind.

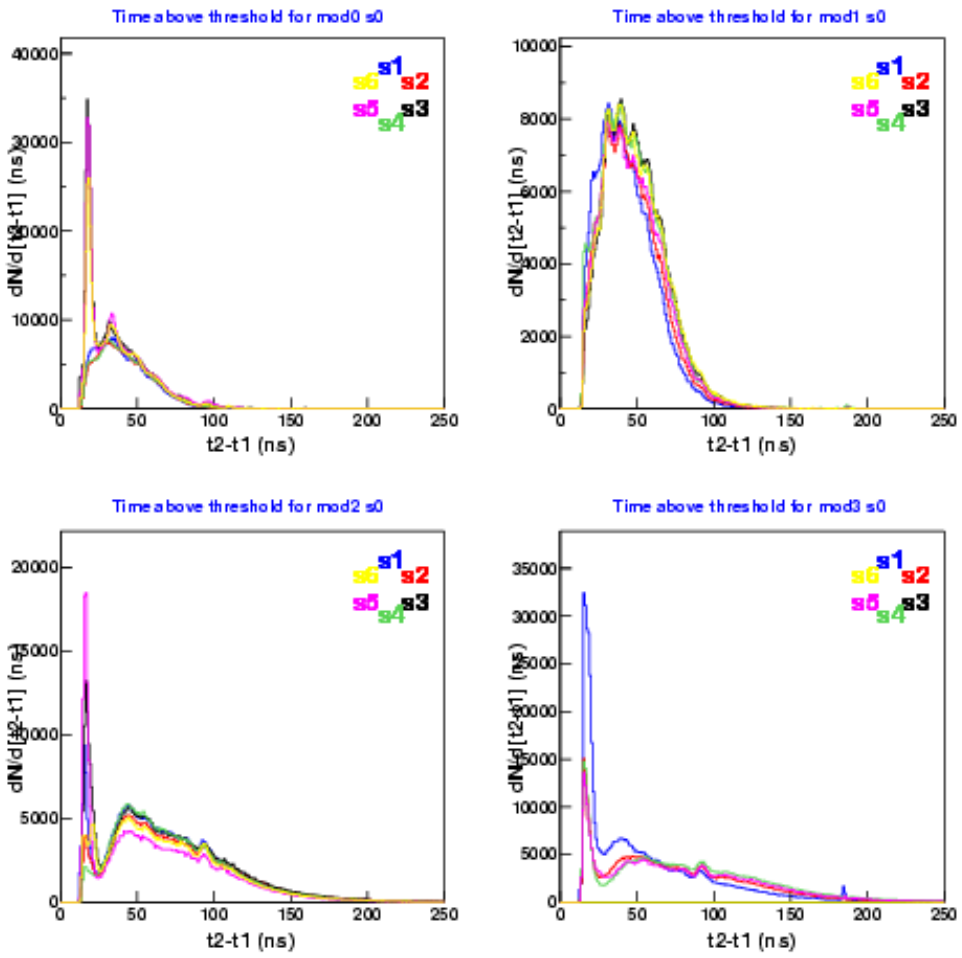

Abbildung 5.23: *Darstellung der Zeit, während der das Signal oberhalb der Schwelle war (time above threshold).*

In Abbildung 5.23 sind für Ebene I, III und IV in einigen Sektoren deutliche Spitzen bei kleinen Driftzeitdifferenzen zu sehen, die vom CMS - Signal verursacht werden. Dies weist darauf hin, daß die Bedingungen an die Driftzeiten für diesen Datensatz nicht optimal sind.

Anhand der Verteilung der Hits in den einzelnen Detektoren können Anomalien in der Effizienz erkannt werden. Diese treten zum Beispiel dann auf, wenn ein Teil der Kammer aufgrund ausgefallener Ausleseelektronik keine Informationen liefert. Ebenso können reduzierte Hochspannungen zu einer Verminderung der Hiteffizienz führen.

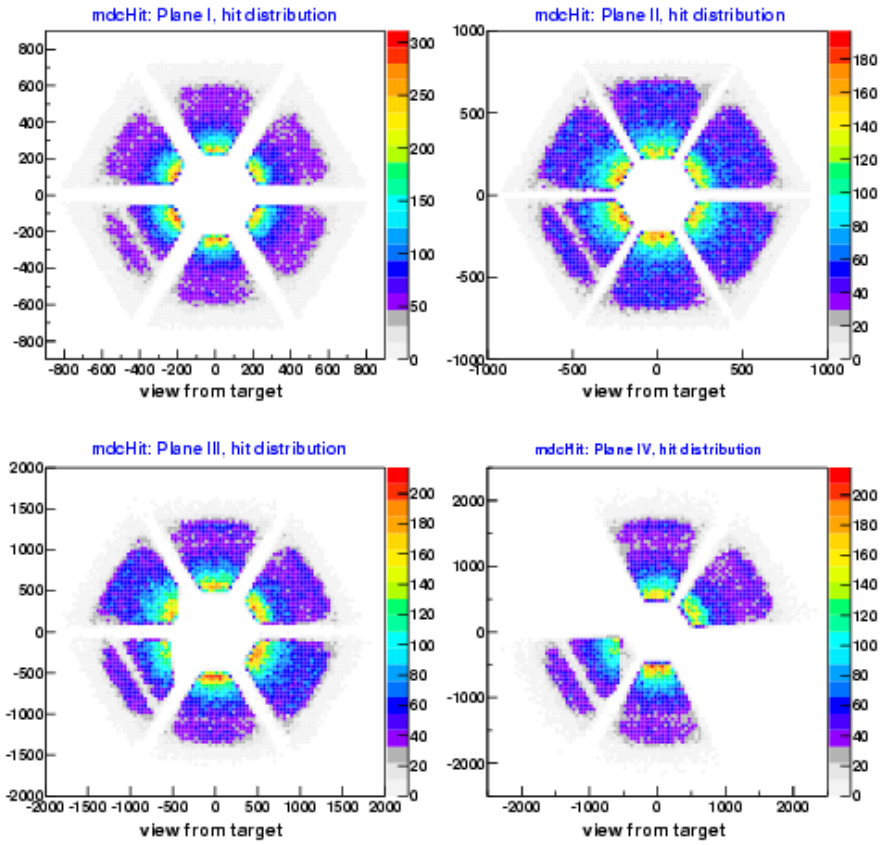

Abbildung 5.24: *Projektion der Hits in eine Ebene senkrecht zur Strahlachse. Im unteren linken Sektor ist eine deutliche Anomalie in der Multiplizität der Hitverteilung zu erkennen. Diese beruht auf einem Ausfall einer Komponente des Auslesesystems.*

Abbildung 5.24 zeigt für einen Datensatz vom September 2003 diese Darstellung. Dargestellt ist die Verteilung der Orte der Treffer auf den Kammern nach der Spurrekonstruktion für eine Messung bei voll eingeschaltetem Magnetfeld. Die Anomalie im Sektor unten links in Abbildung 5.24 hat ihren Ursprung im Ausfall von Ausleseelektronik in Sektor 5 Ebene 2. Hier ist ein Motherboard ausgefallen, das einen zusammenhängenden Bereich in einer der 0° Ebenen ausliest.

Kapitel 6

Auswertung der MDC - Daten

6.1 Einleitung

Im vorangegangenen Kapitel wurden nur Aspekte der Überwachung diskutiert, die sich allein auf die Funktionalitätsüberprüfung der Driftkammern bezogen. Daneben sind aber auch solche Parameter von Bedeutung, die eine Aussage über die physikalischen Eigenschaften der Driftkammern ermöglichen, insbesondere auch in der Korrelation mit anderen Detektoren. Zu diesen Eigenschaften gehören die Ortsauflösung und die Effizienz.

Dafür ist die Kenntnis der Position der Driftkammern relativ zu den anderen Detektoren, bzw. absolut im Raum, von großer Wichtigkeit. Detailliert wurde dieses Problem in [Alv03] untersucht. Eine Methode zur Bestimmung der relativen Position der Kammern in Bezug auf die Flugzeitwand wird in [Pac03] beschrieben.

Eine Möglichkeit, eine Information über die Position der Kammern relativ zum Target anhand weniger Ereignisse zu erhalten, stellt die Methode des sogenannten "selftracking". Sie kann schon während der laufenden Datenaufnahmephase eine grobe Information über die Position der Driftkammern relativ zum Target liefern. Dabei wird die Driftzelle bestimmt, durch die alle Spuren die unabgelenkt vom Target kommen unter exact 90° auftreffen. Diese Position wird "physikalisches Zentrum" genannt.

Anhand der Zeitinformationen aus den Driftzellen um das physikalische Zentrum herum kann die intrinsische Auflösung der Kammern bestimmt werden. Eine Änderung dieses Parameters weist, genauso wie die Driftzeitspektren, auf ein Problem mit den Betriebsparametern Gas oder Hochspannung hin. Die intrinsische Ortsauflösung wird in Abschnitt 6.3 diskutiert.
Für die im folgenden beschriebenen Methoden werden etwa 20.000 Spuren pro Sektor benötigt.

6.2 Positionsbestimmung

Um das Ziel einer Massenauflösung von $\approx 1\%$ zu erreichen, muß die Position der Kammern im Spektrometer relativ zum Target und zu den anderen Detektoren bekannt sein. Die dafür benutzten Methoden liefern diese Information erst nach umfangreicher Analyse der Daten (siehe [Alv03]). Eine Methode, die eine Information über die relative Position der Kammern zum Target anhand von vergleichsweise wenigen Ereignissen liefert, kann schon während der Datenaufnahme helfen, Probleme mit der Detektorpositionierung zu erkennen.

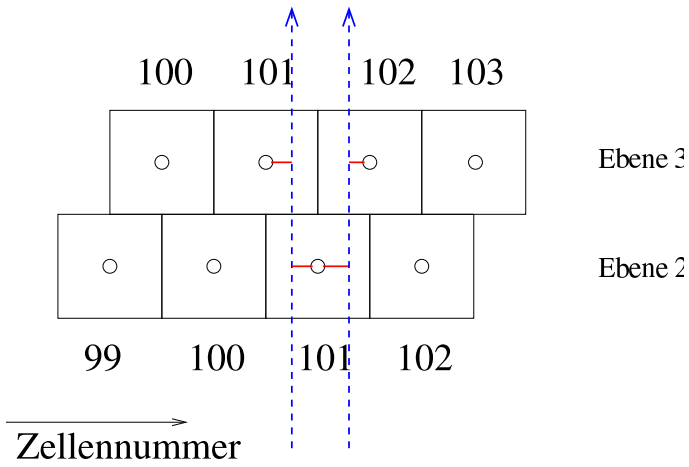

Abbildung 6.1: *Situation in den beiden 0° - Ebenen der Driftkammer für zwei senkrecht einfallende Teilchen. Die gestrichelten Linien sind die Wege der Teilchen. Die waagerechten Linien von der Teilchenspur zu den Meßdrähten (Kreise), stellen den Driftweg der schnellsten Elektronen dar.*

Für jede Kammer ist ein Punkt definiert, für den die gerade Verbindung zum Target senkrecht zum Detektor steht. Dieser Punkt wird "physikalisches Zentrum" genannt. Für eine senkrecht in die Kammer einfallende Teilchenspur und konstante Driftgeschwindigkeit ist die Summe der Driftzeiten der beiden getroffenen Drähte in den 0° Ebenen eine Konstante. In Abbildung 6.1 ist der senkrechte Einfall in eine Zelle dargestellt. Die Summe der beiden Driftzeiten ist für diesen Fall unabhängig vom Abstand der Teilchenbahn zu den Signaldrähten.

Für nicht senkrecht einfallende Teilchenspuren wird die Summe der Driftzeiten in der Kombination mit der Zelle bei größerem Polarwinkel kleiner, wenn die Zelle einen größeren Polarwinkel als das physikalische Zentrum hat. Bei den Zellen mit kleinerem Polarwinkel wird die Summe hingegen größer. Für die Kombination mit der rechten Zelle verhält es sich genau umgekehrt.

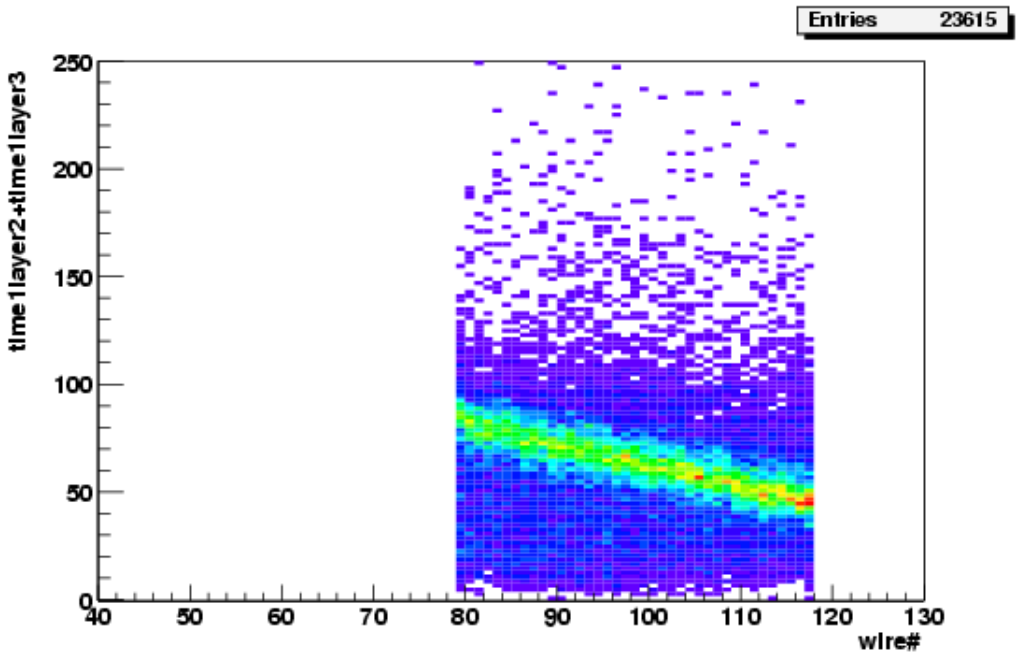

Abbildung 6.2: *Driftzeitsumme zweier benachbarter Zellen aus den beiden 0°-Ebenen. Dargestellt ist Sektor 1 Ebene II. Daten aus der Strahlzeit vom September 2003 (p + p @ 1,0 AGeV).*

Betrachtet man nun für die Zellen der Ebene II (innerhalb eines Bereiches um das physikalische Zentrum) die Summe der Driftzeiten in den beiden 0°-Ebenen getrennt für die beiden möglichen Zellen in der Ebene III und trägt diese in Abhängigkeit von der Zellnummer der Ebene II auf, so ergibt sich eine Abhängigkeit wie sie in Abbildung 6.2 für eine der beiden Kombinationen dargestellt ist.

Fügt man die beiden Korrelationen in einer Abbildung zusammen, so ergeben sich zwei kreuzende Korrelationen (Abbildung 6.3). An dem Kreuzungspunkt der beiden "Linien" befindet sich das physikalische Zentrum, da hier die Summen der Driftzeiten für die beiden zugehörigen Zellen in Ebene III gleich sind. Abbildung 6.4 zeigt die Korrelation für alle MDC-Detektoren.

6.2.1 Verwendete Methode

Die Aufgabe besteht also darin, eine Methode zu finden, diesen Punkt mit größtmöglicher Genauigkeit zu bestimmen. Aus Abbildung 6.2 wird deutlich, daß für jede Zelle die Summe der Driftzeiten einen Schwerpunkt hat. Projiziert man für jede Zelle die Driftzeitverteilung, so kann durch einen Fit das Maximum der Ver-

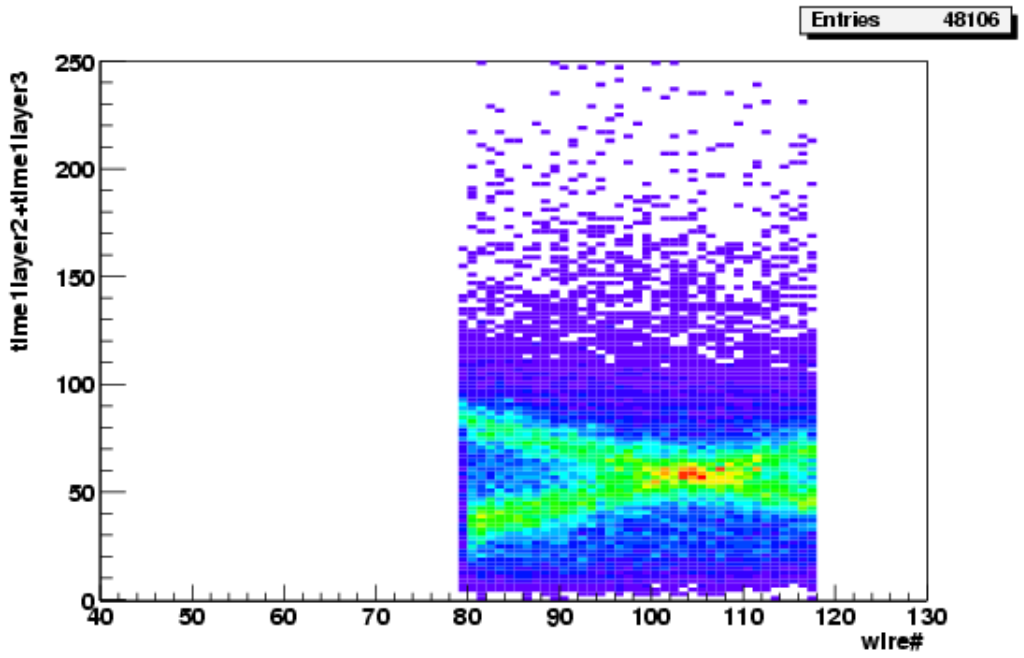

Abbildung 6.3: *Überlagerung der Korrelationen der Driftzeitsumme der beiden 0° - Ebenen für die Korrelation mit den beiden Zellen in Ebene III. Dargestellt ist Sektor 1 Ebene II. Daten aus der Strahlzeit vom September 2003 (p + p @ 1,0AGeV).*

teilung bestimmt werden. Als besonders geeignet hat sich dafür ein Fit mit einer Gaußfunktion zu der ein polynominalverteilter Untergrund addiert wird nach der Formel 6.1 erwiesen. Mit p_i sind hierin die insgesamt 5 freien Parameter bezeichnet.

$$bf(x) = p_0 * \exp\left(-0.5 * \left(\frac{x - p_1}{p_2}\right)^2\right) + p_3 + p_4 * x + p_5 * x^2 \qquad (6.1)$$

Aus dem Maximum der Gaußverteilung und der Breite als Fehler, geteilt durch die Wurzel der Anzahl der Einträge im Histogramm, ergibt sich die Lage der Hauptlinie in den Histogrammen von Abbildung 6.2. Durch Fitten dieser Histogramme mit einem Polynom ersten Grades erhält man eine Geradengleichung für jede der beiden zu einer Kammer gehörenden Korrelationen.

Der Schnittpunkt dieser beiden Geraden, berechnet nach Formel 6.2, definiert dann das physikalische Zentrum der Kammer.

$$x = \frac{b_2 - b_1}{m_1 - m_2} \qquad (6.2)$$

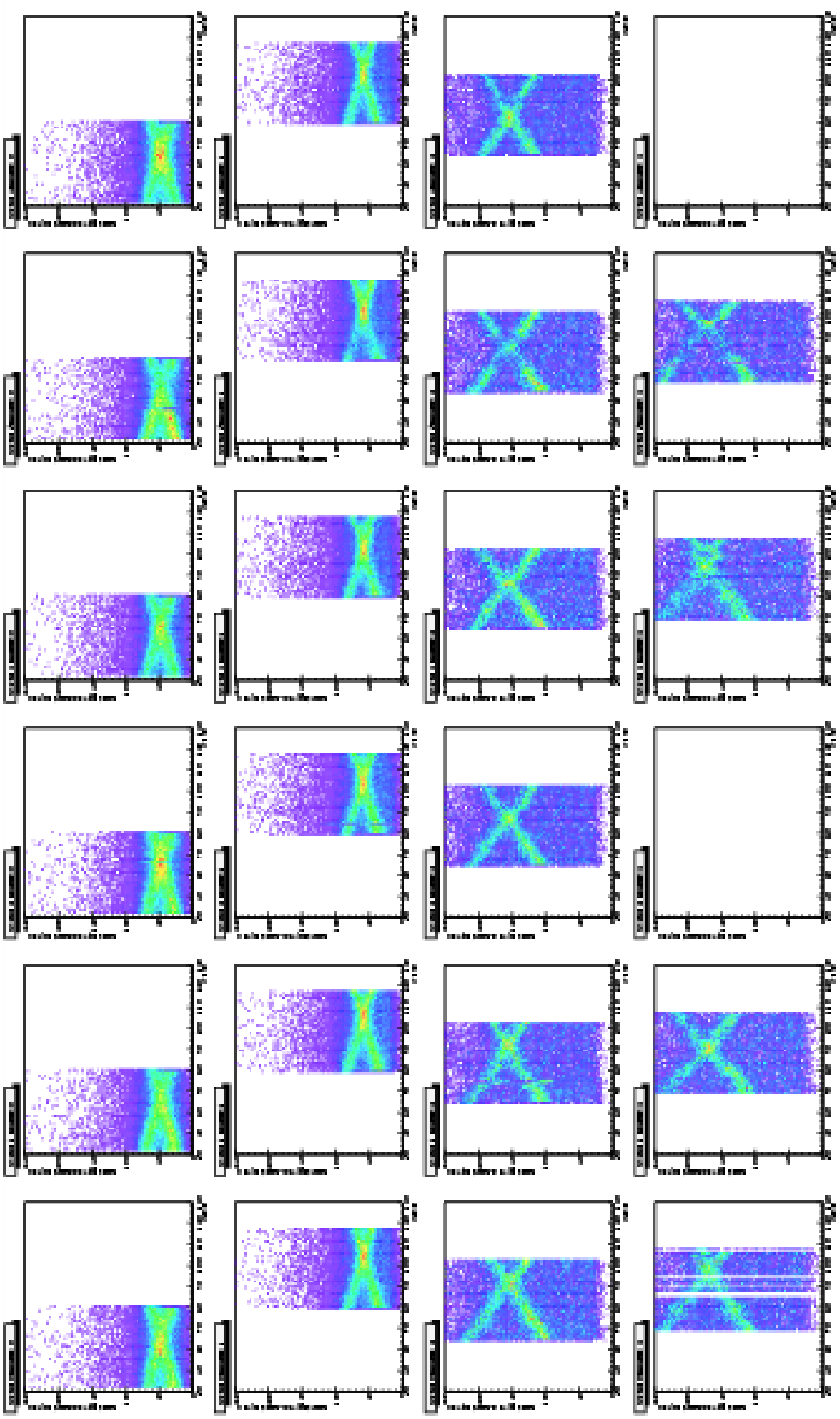

Abbildung 6.4: *Überlagerung der Driftzeitsumme für die Korrelation mit den beiden benachbarten Zellen in Ebene III relativ zur Zelle in Ebene II. In Sektor 1 Ebene III sind einige Zellen aufgrund ausgefallener Elektronik nicht sichtbar. Daten vom September 2003.*

Der Fehler dieser Rechnung ergibt sich nach Formel 6.3.

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{1}{m_1 - m_2} \cdot \left[\Delta b_1^2 + \Delta b_2^2 + \frac{(b_2 - b_1)^2}{(m_1 - m_2)^2} \cdot \left(\Delta m_1^2 + \Delta m_2^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \tag{6.3}$$

Die Differenz, der aus dieser Analyse erhaltenen Zellennummer und der Zelle des aus geometrischen Überlegungen bestimmten physikalischen Zentrums, liefert eine erste Information über die Position der Driftkammern.

Diese Methode macht allerdings nur eine Aussage über die Position des physikalischen Zentrums relativ zum Target. Sie liefert keine Information über die Orientierung der Kammer oder ihre Lage bezüglich der anderen Detektoren. Für die folgenden Überlegungen wird angenommen, daß das Target sich an der idealen Position befindet, und die Kammern wegen der Schienen an denen sie montiert sind, nur entlang der Strahlachse verschoben werden können.

Die Genauigkeit der Methode hängt entscheidend von der Qualität der Daten ab. Je besser die Kalibration ist, und damit die Bestimmung der Driftzeit, desto besser ist der Fit über die Driftzeitverteilung. Für die Verwendung als schnelle Methode zur Positionsbestimmung der Kammern ist es daher notwendig, für jeden einzelnen Datensatz eine gute Kalibrierung zur Verfügung zu haben. Die Methode benötigt etwa 2 Millionen Ereignisse, um hinreichend genau zu sein. Aus technischen Gründen sind in der Regel nur etwa 500.000 Ereignisse in jedem Datensatz enthalten. Es ist daher erforderlich, nur solche Datensätze auszuwählen, deren Kalibrations - und Offsetparameter nur gering vom Standardwert abweichen. Zur Problematik der Offset - und Kalibrationsparameterbestimmung siehe [Mar04a] und [Zum04].

Die Güte des Offsets kann anhand der Verteilungen der Driftzeiten bestimmt werden. Abbildung 5.21 zeigt ein Beispiel für fünf unterschiedliche Datensätze, für die dieselbe Offsetkorrektur verwendet wurden, obwohl eigentlich zwei Gruppen von Datensätzen zu erkennen sind. Zudem fängt die Driftzeit nicht bei Null an, sondern es treten sogar negative Driftzeiten auf. Dies beeinflußt die Bestimmung des physikalischen Zentrums, da der Offset für jede einzelne Zelle getrennt bestimmt wird und bei der Berechnung der Driftzeit mit eingeht.

Da bei der verwendeten Methode die Korrelation von jeweils zwei Zellen miteinander betrachtet wird, kann dies bei der Bestimmung der Hauptlinien der Verteilungen in Abbildung 6.3 zu einer deutlichen Streuung der Punkte um die erwartete gerade Linie herum führen. Dies verschlechtert letztlich die Auflösung der Methode.

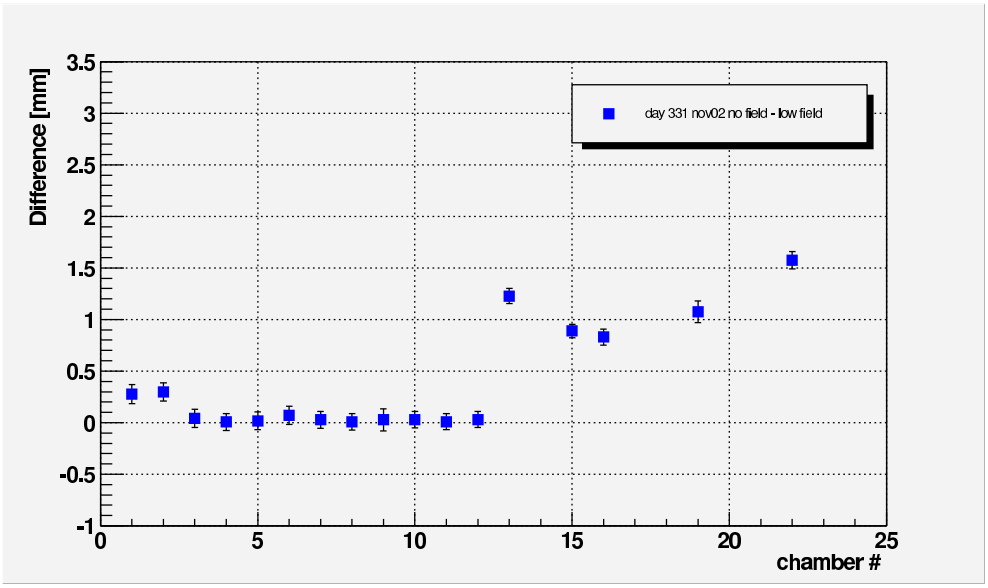

Abbildung 6.5: *Differenz zwischen den physikalischen Zentren bestimmt aus Daten, die ohne Magnetfeld, und Daten, die bei niedrigem Feld (500 A) gemessen wurden. Kammern 1 - 6: Ebene I; Kammern 7 - 12: Ebene II; Kammern 13 - 18: Ebene III; Kammern 19 - 24: Ebene IV. Daten vom November 2002*

6.2.2 Ergebnisse

Für die Analyse des physikalischen Zentrums können nur solche Daten verwendet werden, die ohne eingeschaltetes Magnetfeld aufgenommen wurden. Ansonsten werden die Driftkammern hinter dem Magneten nicht mehr von Spuren getroffen, die geradlinig vom Target bis zu den Kammern verlaufen. Dies wird anhand von Abbildung 6.5 deutlich. Hier ist die Differenz der Positionen für eine Messung mit und eine ohne Magnetfeld dargestellt. Für die Kammern der beiden äußeren Ebenen (Kammern 13 - 24) zeigt sich eine deutliche Abweichung von Null. Die Abweichungen für die inneren Kammern sind deutlich kleiner als eine halbe Zelle. Dies ist auf das Feld in den Kammern zurüchzuführen.

Die Feldstärke im Bereich der Ebenen III und IV reicht aus, um eine deutliche Krümmung der Spuren zu erzeugen. Im Bereich der Ebenen I und II ist das Feld jedoch so gering, daß hier keine Abweichung von einer Geraden zu erwarten ist. Dies wird durch die Feldverteilung des Magnetfeldes aus Abbildung 3.3 auf Seite 22 bewirkt.

In Abbildung 6.6 ist die Driftzeitkorrelation der beiden 0° - Ebenen in Sektor 1 Ebene I gezeigt für eine Messung bei niedrigem Magnetfeld. Einige Zellen im Bereich um die Zelle 70 und 80 zeigen ein deutlich abweichendes Driftzeitverhal-

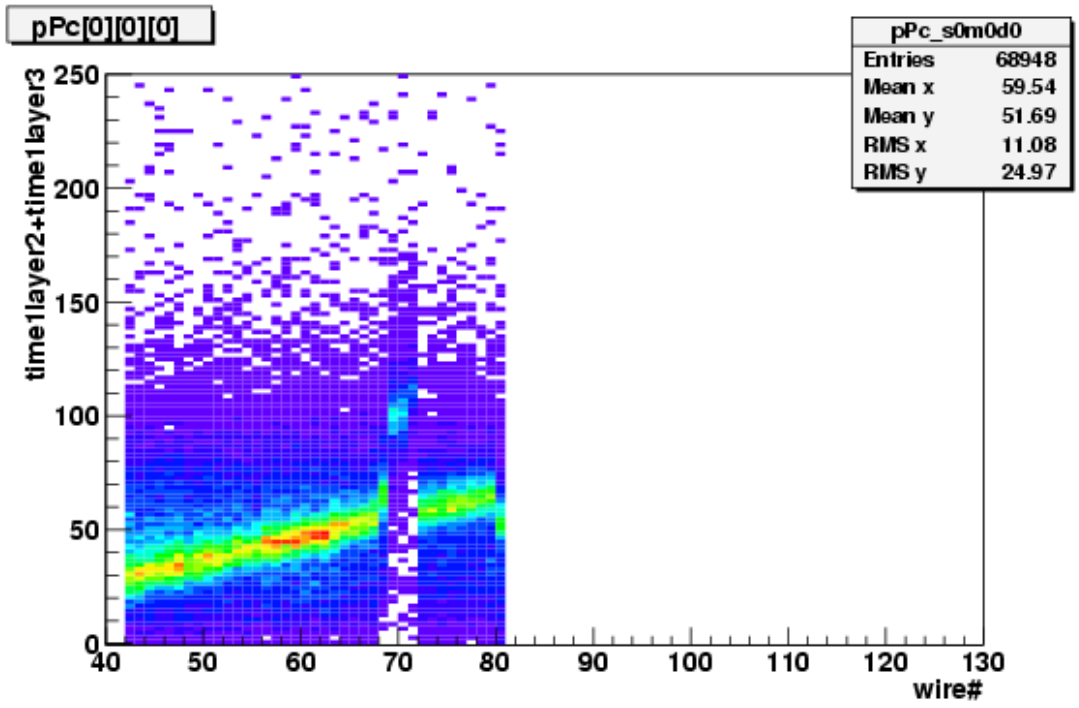

Abbildung 6.6: *Driftzeitkorrelation der beiden 0° - Ebenen in Sektor 1 Ebene I. Für die Drähte im Bereich um 70 und 80 herum ergibt sich eine deutliche Abweichung vom normalen Verlauf. Vergleiche hierzu Abbildung 6.2.*

ten als die übrigen Zellen. Die verwendete Methode ist nicht in der Lage, solche Zellen von der Analyse auszuschließen, was zu den beobachteten Abweichungen in Abbildung 6.5 führt. Unter Berücksichtigung dieses Effektes ergibt sich kein Unterschied für die Position des physikalischen Zentrums der Ebenen I und II zwischen den ohne Magnetfeld gemessenen Daten und denen mit niedrigem Feld.

Anders liegt der Fall aber beim Vergleich der Daten aus einer Strahlzeit, aber an zwei verschiedenen Tagen. Abbildung 6.7 zeigt die Differenz zwischen den bestimmten physikalischen Zentren für zwei Tage aus der Strahlzeit vom November 2002. Da die Detektoren in der Zeit zwischen den beiden Messungen nicht bewegt wurden, sollte die Differenz immer Null sein. Als Ursache für die Abweichungen kommen Einflüsse durch die Offsetkalibration in Frage, wie sie bereits für die Messungen mit niedrigem Magnetfeld diskutiert wurden.

Zusätzlich war zwischen diesen beiden Tagen der Magnet für Testmessungen mit voller Feldstärke aktiviert. Die Abweichungen können daher auch durch Bewegungen der Stahlkonstruktion aufgrund des Magnetfeldes verursacht sein. An dieser Stahlkonstruktion sind die Kammern der Ebenen III und IV befe-

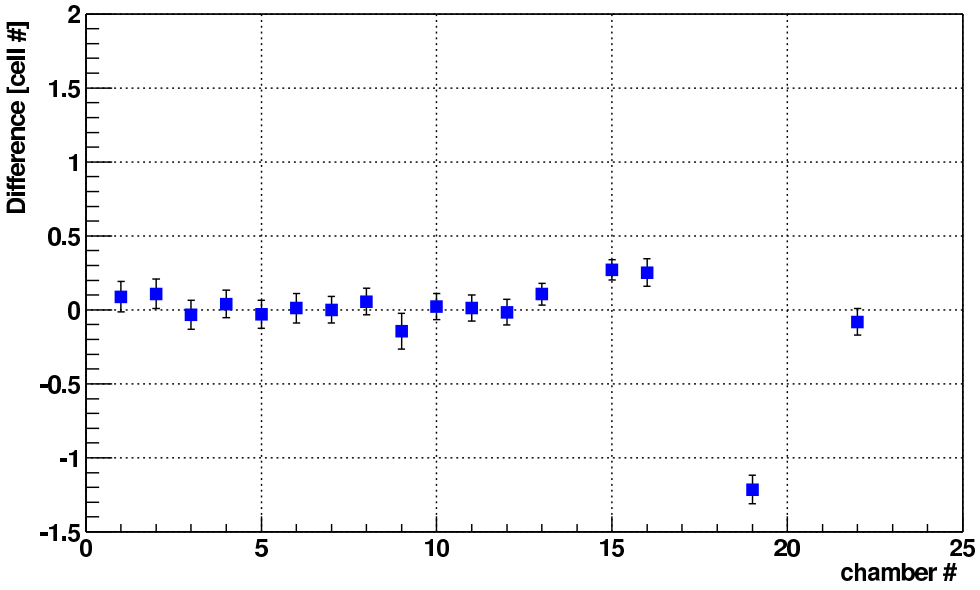

Abbildung 6.7: *Differenz des physikalischen Zentrums von zwei Tagen der Strahlzeit November 2002, gemessen ohne Magnetfeld. Kammern 1 - 6: Ebene I; Kammern 7 - 12: Ebene II; Kammern 13 - 18: Ebene III; Kammern 19 - 24: Ebene IV.*

stigt. Diese Bewegungen sind offentsichtlich nicht reversibel. Eine Bestätigung dieser Beobachtung durch die Alignment - Methode steht noch aus. Die Hypothese wird aber von Messungen mit dem Rasniksystem (siehe [Alv03]) erhärtet.

In Tabelle 6.1 sind die Ergebnisse für die Strahlzeiten vom November 2001 und November 2002 dargestellt. In der letzten Spalte ist zum Vergleich zusätzlich die Sollposition des geometrischen Zentrums der Kammer angegeben. Abbildung 6.8 zeigt diese Ergebnisse in Relation zu je einem Tag aus den Strahlzeiten vom November 2001 und September 2003. Für die beiden inneren Ebenen(Kammern 1-12) ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung für die beiden Strahlzeiten. Bei den äußeren Kammern ist zu beachten, daß einige in der Zeit zwischen den Strahlzeiten komplett ausgebaut wurden und daher nicht mehr exakt dieselbe Position einnehmen wie zuvor.

Für die äußeren Kammern sollte sich kein großer Unterschied in der Differenz ergeben, da die Kammern der Ebenen III und IV jeweils fest miteinander verbunden sind. Geringe Unterschiede hier sind dann nur auf eine fehlerhafte Einstellung der Neigung der Kammer der Ebene III relativ zu Ebene IV zurückzuführen, die von der beschriebenen Methode nicht ermittelt werden kann.

Kammer		Position physikalisches Zentrum			
		November 01	November 02		Soll
Modul	Sektor	Tag 340	Tag 327	Tag 331	
1	1		61,87	62,24	61
	2	64,38	64,96	63,35	
	3	63,54	64,11	63,48	
	4	63,08	63,61	63,28	
	5	61,70	62,29	62,09	
	6	61,85	62,51	62,25	
2	1	102,44	102,50	102,34	98
	2	102,51	103,33	103,04	
	3	102,40	102,22	101,90	
	4	100,41	100,59	99,97	
	5	100,64	100,79	100,59	
	6	101,15	101,19	100,97	
3	1	80,80	89,77	89,55	83
	2				
	3	84,60	85,32	85,10	
	4		83,39	83,17	
	5				
	6		81,48	81,90	
4	1	95,24	95,71	96,01	88
	2				
	3				
	4		90,04	89,74	
	5				
	6				

Tabelle 6.1: *Position in Einheiten von Zellennummern des physikalischen Zentrums für ausgewählte Tage der Strahlzeiten vom November 2001 und November 2002. Die Analyse beruht auf Daten die ohne Magnetfeld gemessen wurden.*

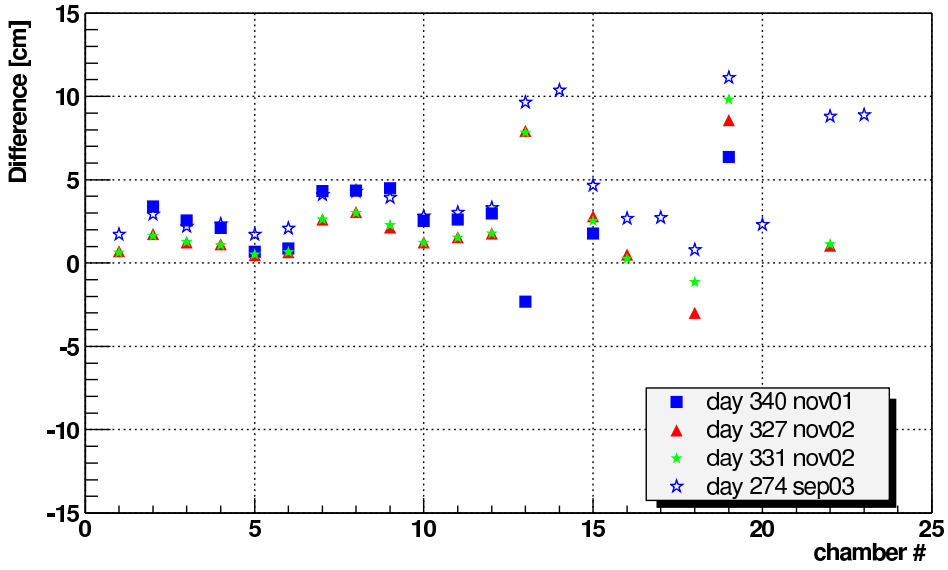

Abbildung 6.8: *Differenz zwischen tatsächlichem physikalischen Zentrum, wie es von der beschriebenen Methode geliefert wird, und dem physikalischen Zentrum der idealen Geometrie in Abhängigkeit von der Kammer. Alle Daten wurden ohne Magnetfeld gemessen. Gezeigt sind die Ergebnisse für vier verschiedene Datensätze aus drei Strahlzeiten. Kammern 1 - 6: Ebene I; Kammern 7 - 12: Ebene II; Kammern 13 - 18: Ebene III; Kammern 19 - 24: Ebene IV.*

Diese lassen sich nur durch die Alignment - Methode bestimmen. Dabei wird die Position der Kammern eines Sektors so geändert, daß alle Treffer, die zu einer Teilchenspur gehören, auf einer Geraden liegen. Die dazu nötigen Daten müssen bei abgeschaltetem Magnetfeld aufgenommen werden. Für die hier durchgeführte Analyse wurden die gleichen Datensätze verwendet wie für das Alignment der Detektoren, ausgenommen die Datensätze vom Tag 331 im November 2002.

In Tabelle 6.2 sind die Ergebnisse aus Abbildung 6.8 zusammengefaßt. Es sind jeweils die Abweichungen zwischen dem physikalischen Zentrum, wie es von der beschriebenen Methode geliefert wird, und dem geometrischen Zentrum in Einheiten von Zellennummern und umgerechnet in Millimetern angegeben. Die dazu verwendeten Zellgrößen sind in Tabelle 3.1 angegeben.

In Ebene II liegen die Ergebnisse von den Strahlzeiten November 2001 und September 2003 nahezu deckungsgleich. Die Punkte für November 2002 weichen hiervon ab, da in dieser Strahlzeit zwei Targets mit einem Abstand von 2 cm verwendet wurden. Die ermittelte Position ist daher ein Mittelwert für beide

Module	Sector	November 2001 Tag 340		November 2002 Tag 327		November 2002 Tag 331		September 2003 Tag 274	
		[cell #]	[mm]	[cell #]	[mm]	[cell #]	[mm]	[cell #]	[mm]
1	1			0.713313	3.56657	0.624507	3.12253	1.71055	8.55274
	2	3.3897	16.9485	1.75284	8.76418	1.64403	8.22013	2.92561	14.6281
	3	2.55967	12.7983	1.24382	6.21909	1.27686	6.38429	2.18855	10.9428
	4	2.0972	10.486	1.11863	5.59314	1.07863	5.39315	2.33658	11.6829
	5	0.670212	3.35106	0.482547	2.41274	0.510942	2.55471	1.7181	8.59051
	6	0.874226	4.37113	0.666521	3.33261	0.654874	3.27437	2.09171	10.4586
2	1	4.31366	25.8819	2.61047	15.6628	2.60987	15.6592	4.0977	24.5862
	2	4.34	26.04	3.06707	18.4024	3.01118	18.0671	4.30173	25.8104
	3	4.50005	27.0003	2.12552	12.7531	2.26958	13.6175	3.93497	23.6098
	4	2.54279	15.2567	1.23438	7.40628	1.2134	7.28037	2.79843	16.7906
	5	2.60294	15.6176	1.54625	9.27751	1.53478	9.20868	3.03431	18.2059
	6	2.97381	17.8428	1.76715	10.6029	1.78255	10.6953	3.30806	19.8483
3	1	-2.32352	-27.8822	7.93976	95.2771	7.83316	93.9979	9.64408	115.729
	2							10.3814	124.577
	3	1.76388	21.1665	2.80727	33.6873	2.53771	30.4525	4.66747	56.0096
	4			0.505567	6.06681	0.253667	3.044	2.66531	31.9837
	5							2.73219	32.7863
	6			-2.98307	-35.7969	-1.1337	-13.6044	0.805891	9.6707
4	1	6.37316	89.2243	8.58722	120.221	9.80159	137.222	11.1343	155.88
	2							2.31718	32.4405
	3								
	4			1.05397	14.7556	1.1355	15.8969	8.80688	123.296
	5							8.89487	124.528
	6								

Tabelle 6.2: *Abweichung des Physikalischen Zentrums von der Sollposition.*
Angegeben in Einheiten von Driftzellen und Umgerechnet in Milimeter.
Die Daten wurden Abbildung 6.8 entnommen.

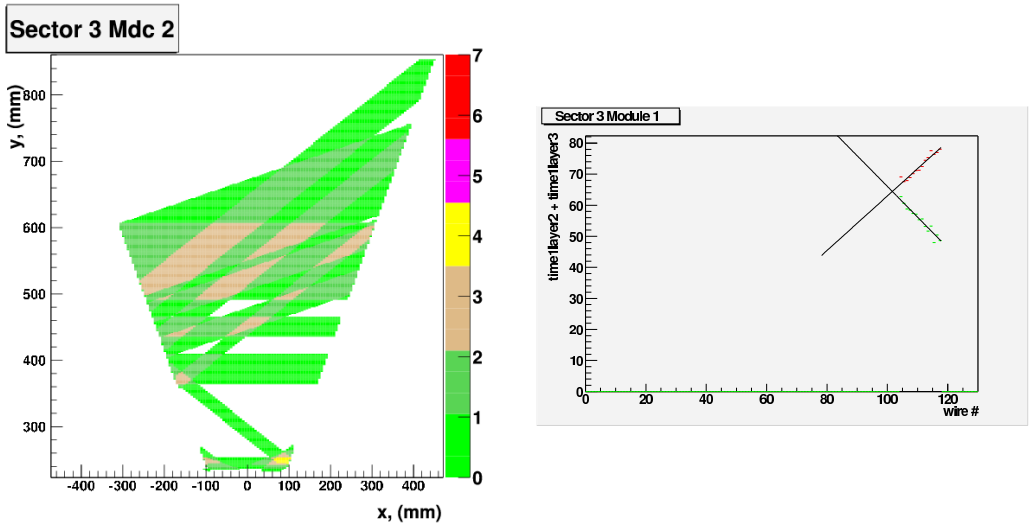

Abbildung 6.9: *In Sektor 3, Ebene II kann auf Grund ausgefallener Ausleseelektronik ein Teil einer der beiden 0° - Ebenen nicht ausgelesen werden. Dies ist im linken Teilbild deutlich zu sehen ([Pec04]). Im rechten Teilbild wird die dadurch entstehende Problematik beim Versuch, das physikalische Zentrum zu finden verdeutlicht. Es wird nicht von Messpunkten abgedeckt.*

Targets. Die Abweichung in Sektor 3 beruht auf der Tatsache, daß aufgrund ausgefallener Motherboards nur von einem Teil der Signaldrähte in der einen 0° - Ebene Meßwerte vorhanden sind. Dies ist im linken Teilbild von Abbildung 6.9 dargestellt. Das rechte Teilbild zeigt die daraus resultierende Schwierigkeit bei der Bestimmung des physikalischen Zentrums. Der von rechts oben nach links unten verlaufende Fit könnte ebenfalls durch die oberhalb liegenden Punkte laufen, was eine größere Verschiebung des physikalischen Zentrums ergeben würde.

Daraus resultiert für das physikalische Zentrum ein systematischer Fehler von $\approx 2\,\mathrm{cm}$. In Sektor 1 und 2 gibt es ebenfalls systematische Fehler, die dazuführen, daß alle Punkte der Strahlzeit November 2002 dem selben Trend wie im November 2001 / September 2003 folgen. Dies erklärt aber nicht die Gruppierung der Sektoren der Ebene 2 in zwei Gruppen, die bei allen drei betrachteten Strahlzeiten identisch sind. Besonders auffällig ist dabei die Symmetrie des Verhaltens der Sektoren.

In Abbildung 6.10 ist rechts das Ergebnis einer Bestimmung des physikalischen Zentrums mit der beschriebenen Methode aus Simulationsdaten gezeigt. Simuliert wurden C + C - Stöße bei 2 GeV und zwei Targets mit einem Abstand von 2 cm.

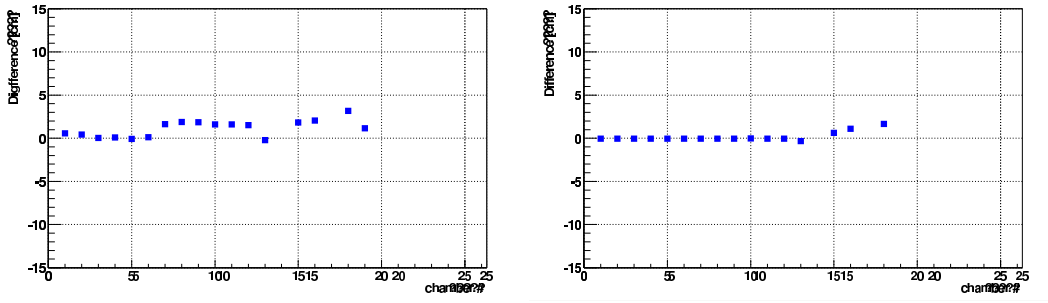

Abbildung 6.10: *Im linken Bild ist das Ergebnis einer Bestimmung des physikalischen Zentrums aus Simulationsdaten gezeigt. Diese Daten wurden erzeugt mit Berücksichtigung der Verschiebung der Detektoren wie sie durch das Alignment für die Strahlzeit November 2002 ermittelt wurden. Rechts ist die gleiche Analyse für die ideale Geometrie gezeigt. Das Target befand sich in beiden Fällen an der idealen Position.*

Für die ersten beiden Ebenen ergibt sich kein Unterschied zwischen dem ermittelten und dem geometrischen physikalischen Zentrum. Für die äußeren Kammern reicht die Statistik nicht aus, um eine eindeutige Aussage zu treffen. Dieses Ergebnis zeigt, daß die Methode keinen systematischen Fehler hat. Alle systematischen Fehler können daher nur von den Daten selbst kommen.

Das linke Bild in Abbildung 6.10 zeigt das Ergebnis einer Simulation, bei der die Detektoren so positioniert waren, wie es anhand der Daten für die Strahlzeit vom November 2002 durch das Alignment ermittelt wurde. Auch hier ist die Statistik für die außeren Ebenen nicht ausreichend. Die inneren Ebenen zeigen ein ähnliches Verhalten wie in Abbildung 6.8. Die in Ebene II beobachteten Verschiebungen des physikalischen Zentrums lassen sich daher durch eine stark von der idealen Geometrie abweichende Montierung erklären.

In Abbildung 6.8 kann die Abweichung der Position des physikalischen Zentrums in Ebene I durch eine Kippung der gesamten Kammerkonstruktion aus der Strahlachse heraus zusammen mit einer Verschiebung entlang der Strahlachse erklärt werden. Eine quantitative Angabe der benötigten Kippung und / oder Verschiebung ist nicht möglich, da diese beiden Parameter miteinander korreliert sind.
Auch hier kann der Unterschied zwischen den Daten vom November 2001 / September 2003 und November 2002 durch die Tatsache, daß zwei seperate Targets verwendet wurden, erklärt werden.

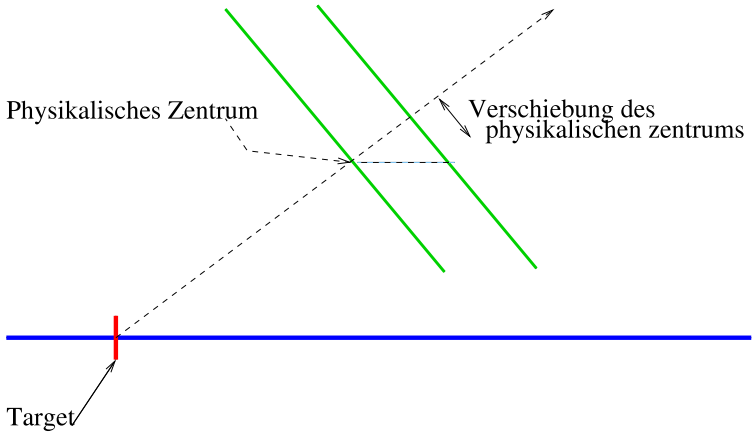

Abbildung 6.11: *Verschiebung der Driftkammern entlang der Strahlachse relativ zur nominalen Position. Dies führt zu einer Änderung der Position des physikalischen Zentrums. (Blau: Strahlachse, Grün: Driftkammern, Rot: Targetpunkt)*

Für die Kammern der Ebenen III und IV ist keine Bewertung der Position des physikalischen Zentrums möglich, da alle Kammern in der Zeit zwischen den Strahlzeiten entweder ausgebaut wurden oder zumindestens bewegt wurden. Jeweils die beiden Kammern eines Sektors sind fest miteinander verbunden. Daher sollte für beide Kammern eines Sektors das physikalische Zentrum um den gleichen Betrag verschoben sein. Ein Unterschied in dieser Verschiebung weist auf einen Fehler bei der Positionierung der Kammern relativ zueinander hin. Eine quantitative Aussage ist auch hier nicht möglich.

6.2.3 Target - Position

Aus der Information über die Position des physikalischen Zentrums läßt sich eine Information über die Position der Kammern relativ zum Target gewinnen. Dabei wird angenommen, daß die Kammern jeweils unter dem im Design vorgesehenen Winkel relativ zur Strahlachse stehen. Dann kann, unter der Annahme daß die Kammern nur in Richtung der Strahlachse verschoben sind, aus der Verschiebung des physikalischen Zentrums die Verschiebung der Kammern entlang der Strahlachse nach Formel 6.4 berechnet werden.

$$z = \frac{sin(\alpha)}{\Delta x} \tag{6.4}$$

Das Prinzip ist in Abbildung 6.11 dargestellt. Die Verschiebung der Driftkammer entlang der Strahlachse führt dazu, daß die Teilchen nun an einer anderen Stelle senkrecht auf die Kammer treffen.

Sektor	Module	x [mm]	y [mm]	z [mm]
1	I	-0.0310498	1.782	25.359
	II	-1.642	0.883	1.035
	III	-1.27701	-16.433	-15.977
	IV	-0.163	-15.984	-16.5
2	I	-0.669	2.542	25.347
	II	-2.067	2.22	1.974
	III	15.344	1.456	-14.416
	IV	16.859	5.163	-15.009
3	I	3.333	5.093	20.009
	II	-3.514	2.564	2.3
	III	-8.198	-5.891	-0.089
	IV	0	0	0
4	I	-2.08216	5.241	18.218
	II	-5.004	1.37	2.212
	III	-3.3443	-6.877	-5.706
	IV	-3.533	-4.899	-3.409
5	I	-2.487	2.616	20.384
	II	-3.753	-0.336	1.156
	III	-3.851	-0.678	-15.442
	IV	-5.493	-0.812	-13.874
6	I	0.495	0.758	23.411
	II	-2.375	-0.072	0.663
	III	-14.939	-5.485	-20.896
	IV	0	0	0

Tabelle 6.3: *Differenz zwischen der Position der Driftkammern nach dem Alignment und der idealen Position. Die z-Achse verläuft entlang der Strahlrichtung. Die Daten basieren auf den im September 2003 aufgenommenen Datensätzen ohne eingeschaltetes Magnetfeld [Pac04].*

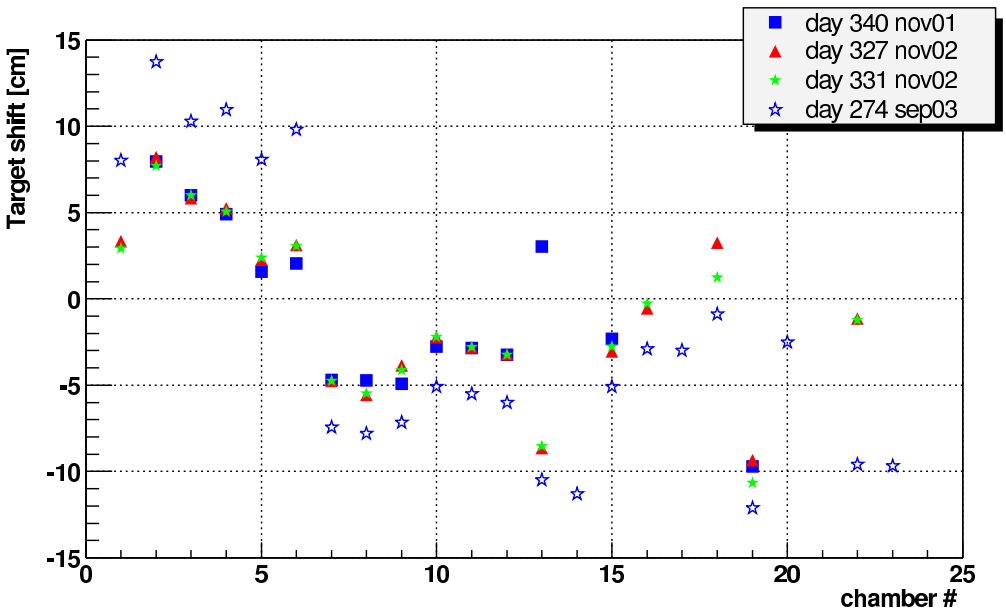

Abbildung 6.12: *Verschiebung des Targets entlang der Strahlachse relativ zur nominalen Position. Bestimmt aus den physikalischen Zentren der einzelnen Kammern. Kammern 1 - 6: Ebene I; Kammern 7 - 12: Ebene II; Kammern 13 - 18: Ebene III; Kammern 19 - 24: Ebene IV.*

In Abbildung 6.12 sind die Ergebnisse zusammengestellt. Diese stellen allerdings keine eindeutige Positionsbestimmung dar, da die Methode zwei Raumrichtungen nicht berücksichtigt, in die aber ebenfalls eine Verschiebung möglich ist, die zu einer Änderung der Position des physikalischen Zentrums führen kann. Für die folgenden Betrachtungen wird die laterale Psition als exakt angenommen.

Aus Abbildung 6.12 ergibt sich für die Ebenen II und III die Verschiebung des Targets aus den Sektoren 4 bis 6 für die Daten aus den Strahlzeiten November 2001 und November 2002 zu $\approx 2{,}8$ cm. Dies entspricht dem Wert, der sich aus dem Alignment der Kammern für die Verschiebung des Targets ergibt (November 2001: 3,1 cm; November 2002: 2,7 cm, siehe Tabelle 6.3)). Die restliche Abweichung entspricht der, durch eine Drehung der Kammern um die x - Achse verursachten Verschiebung. In Ebene I gilt das Gesagte für die Sektoren 5 und 6 und für die Strahlzeit vom November 2002 auch für Sektor 1. Dieser war im November 2001 ncht in Betrieb.
Für die anderen Sektoren (2 - 4 in Ebene 1 und 1 - 3 in Ebene II und III) ergibt sich eine um 2 bis 6 cm größere Verschiebung des Targetsauf.

6.3 Ortsauflösung

Die Ortsauflösung der Driftkammern ist eine wichtige Größe, da sie die Massenauflösung stark beeinflußt [Gar03]. Daher ist es erforderlich, eine Methode zur Überwachung der Auflösung zu haben, die anhand weniger Ereignisse in der Lage ist, eine Abschätzung der zuerwartenden Massenauflösung zu haben.
Die im folgenden vorgestellte Methode bestimmt im wesentlichen die Zeitauflösung der Driftzellen, die über die Driftgeschwindigkeit mit der Ortsauflösung verbunden ist. Für die Abschätzung der Ortsauflösung wird im Rahmen der Methode die aus Simulationen ermittelte Driftgeschwindigkeit verwendet. Diese stimmt nicht notwendigerweise mit der tatsächlichen Driftgeschwindigkeit überein, ist aber die beste verfügbare Information während der Onlineüberwachung (vgl. [Mar04a]).

6.3.1 Verwendete Methode

Betrachtet man wieder, wie bei der Methode zur Bestimmung des physikalischen Zentrums, die Korrelation der Driftzellen in den beiden 0°-Ebenen und trägt die Differenz der Driftzeiten einer Zelle in der vorderen 0°-Ebene und eine der korrespondierenden Zelle in der hinteren 0°-Ebene gegen die Summe dieser Zeiten auf, so erhält man eine Verteilung wie sie in Abbildung 6.13 gezeigt ist. Diese spezielle Form der Korrelation ergibt sich allerdings nur für Zellen in der Umgebung des physikalischen Zentrums.

Die Breite der Summenverteilung im Bereich kleiner Zeitdifferenzen (-5 bis 5 ns) liefert eine Information über die Zeitauflösung der Driftzelle. Dazu wird für jede Zelle der in Abbildung 6.13 durch die beiden Linien begrenzte Bereich auf die Zeitsummenachse projiziert. Aus der Breite der Verteilung, gemittelt über einige Zellen rund um das physikalische Zentrum, ergibt sich die Zeitauflösung der Kammer. Die Ortsauflösung berechnet sich dann nach Formel 6.5.

$$\Delta x = v_D \cdot \frac{\sigma_t}{\sqrt{2}} \tag{6.5}$$

Dabei ist: Δx die Ortsauflösung, v_D die Driftgeschwindigkeit und σ_t die Zeitauflösung. Die Driftgeschwindigkeit kann durch unterschiedliche Methoden ermittelt werden. Für den Einsatz dieser Methode zur schnellen Bestimmung der Auflösung ist die Driftzeit als eine Konstante anzunehmen. Sie wird durch Simulation der Zellen mit GARFIELD (→ **GARFIELD**) [Ver77] bestimmt. Abbildungen 6.14 und 6.15 zeigen den Verlauf der Linien gleicher Driftgeschwindigkeit in einer Zelle. Die Driftgeschwindigkeit wurde jeweils für eine Spannung gerechnet, die zu einer Effizienz der Zelle größer als 90 % führt.

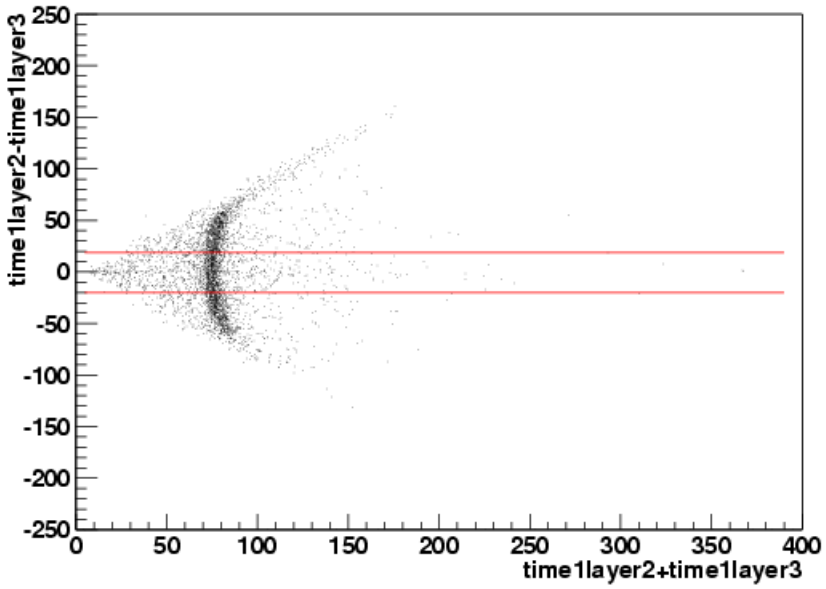

Abbildung 6.13: *Driftzeitkorrelation zwischen den beiden Zeiten einer Driftzelle. Aufgetragen ist die Differenz gegen die Summe der Driftzeiten der miteinander korrelierten Zellen in den beiden 0° - Ebenen. Die Linien markieren den Bereich, der für die weitere Analysen projiziert wird. Daten vom November 2001*

Sie kann aber auch aus den Daten selbst ermittelt werden. Dazu betrachtet man die vom Trackfitting ermittelten Entfernungen der Spur zu dem Signaldraht und setzt diese in Relation zur gemessenen Zeit. Die so ermittelte Driftgeschwindigkeit spiegelt alle maßgeblichen Einflüsse wie Gaszusammensetzung und angelegte Hochspannung wieder (vgl. Kapitel 5.).

Die Driftgeschwindigkeit kann aber auch näherungsweise anhand der folgenden Überlegungen ermittelt werden. Für eine Spur, die senkrecht durch die Kammer geht, ist die Länge der Strecke bekannt, welche die Elektronencluster in den Zellen der beiden 0° - Ebenen zurücklegen. Da diese beiden Ebenen um exakt eine halbe Zellgröße gegeneinander verschoben sind, ist diese Strecke gleich der Zellgröße. Die Zeit, die die Elektronen brauchen, um diese Strecke zurückzulegen, ist die Summe der Zeiten in den beiden getroffenen Zellen der 0° - Ebenen. Senkrecht einfallende Spuren gibt es in der Zelle, die das physikalische Zentrum bildet. Nimmt man den Mittelwert der Summe der Driftzeiten für die Zelle am physikalischen Zentrum und die Zellgröße, so erhält man nach Formel 6.6 die Driftgeschwindigkeit.

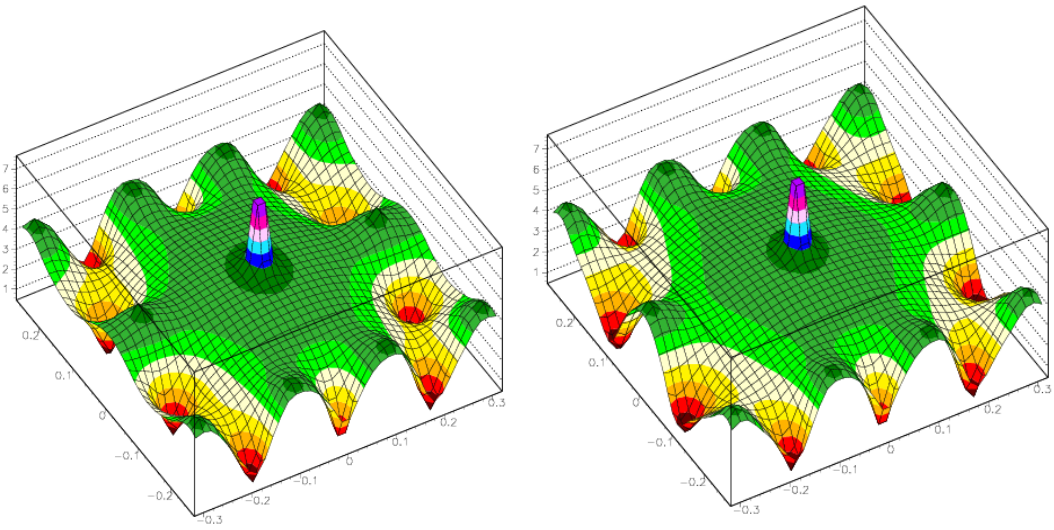

Abbildung 6.14: *Driftgeschwindigkeitsverteilung in einer Zelle für Ebene I (links, Feldspannung 1750 V) und Ebene II (rechts, Feldspannung 1800 V). [Mar04b]*

$$Driftgeschwindigkeit = \frac{Zellgröße}{Summe\ der\ Driftzeiten} \tag{6.6}$$

Diese Methode liefert kein sehr genaues Ergebnis, weil die Bestimmung der Driftzeitsumme einen großen Fehler hat, da nicht alle Spuren durch die Zelle am physikalischen Zentrum genau senkrecht einfallen. Dies gilt nur für Spuren aus einem Target geringer Ausdehnung. Ausgedehnte Targets wie zum Beispiel das in der Strahlzeit vom September 2003 eingesetzte Flüssigwasserstofftarget, dessen Länge 5 cm beträgt, ergeben eine deutliche Verbreiterung der Driftzeitsumme in der Korrelation (vgl. Abbildung 6.17.).

6.3.2 Ergebnisse

Aus Testmessungen mit einer Prototypdriftkammer, die in [Ste97] beschrieben sind, ist die Auflösung der Driftkammern zu $\approx 70\,\mu$m bestimmt worden. Die geforderte Auflösung für die Kammern liegt bei $\approx 120\,\mu$m. Die beschriebene Methode erreicht nicht die Genauigkeit der in [Ste97] verwendeten mit externem Tracking. Sie wurde auf die Datensätze aus den Strahlzeiten vom November 2001 und November 2002 sowie September 2003 angewandt.

Für die Daten vom November 2001 konnte dabei ein Ergebnis einer früheren Analyse reproduziert werden. Bei den Daten der beiden anderen Strahlzeiten

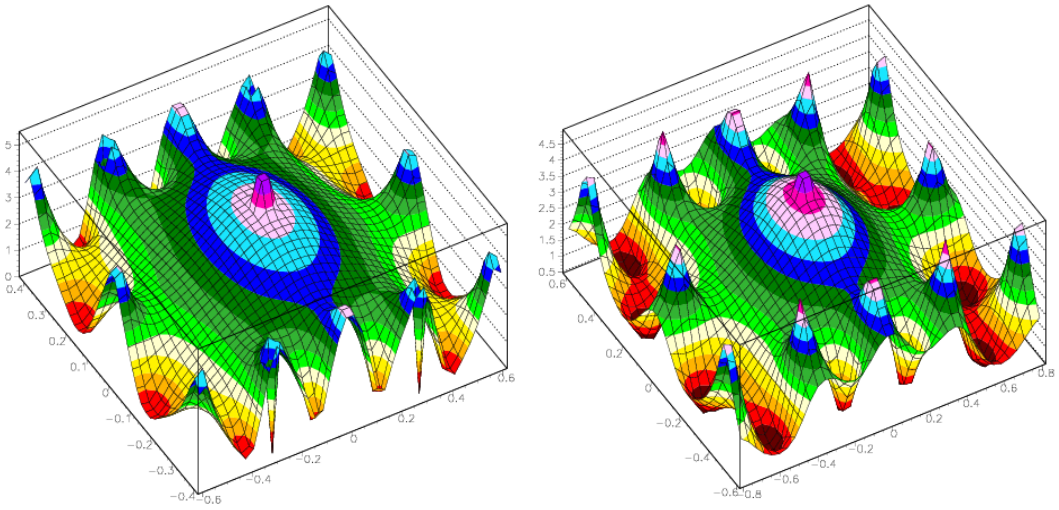

Abbildung 6.15: *Driftgeschwindigkeitsverteilung in einer Zelle für Ebene III (links, Feldspannung 2000 V) und Ebene IV (rechts, Feldspannung 2200 V). [Mar04b]*

ergaben sich nicht unerhebliche Abweichungen vom erwarteten Wert. In Abbildung 6.16 sind die Ergebnisse zusammengestellt.

Die Auflösung von 120 μm in den Kammern der Ebene I und 100 μm für Ebene II vom November 2001 entspricht dem Wert, den man auch für die nachfolgenden Strahlzeiten erwarten würde, da weder die Hochspannungen noch die Zusammensetzung des Driftgases signifikant verändert wurden..

Die deutlich schlechtere intrinsische Auflösung für die Strahlzeiten November 2002 und September 2003 kann mehrere Ursachen haben. Für die Strahlzeit September 2003 ist die Statistik in der Verteilungen in Abbildung 6.13 deutlich geringer. Dadurch wird die Zeitauflösung und damit die Ortsauflösung schlechter. Abbildung 6.17 zeigt die Driftzeitkorrelationen für eine Zellkombination für alle drei Strahlzeiten im Vergleich (obere Reihe).

Die Projektionen (untere Reihe in Abbildung 6.17) zeigen eine deutliche Verbreiterung und Verschiebung des Mittelwertes hin zu größeren Zeiten. Der Mittelwert des Fits definiert die Zeitauflösung der Zelle. In Abbildung 6.18 ist die Verteilung der Zeitauflösung der Kammer gezeigt, deren Zelle in den Abbildungen 6.13 und 6.17 dargestellt ist. Die Zeitauflösung verschlechtert sich systematisch vom November 2001 zum September 2003 hin.

Im November 2001 betrug die Zeitauflösung für die Kammern der Ebenen I und

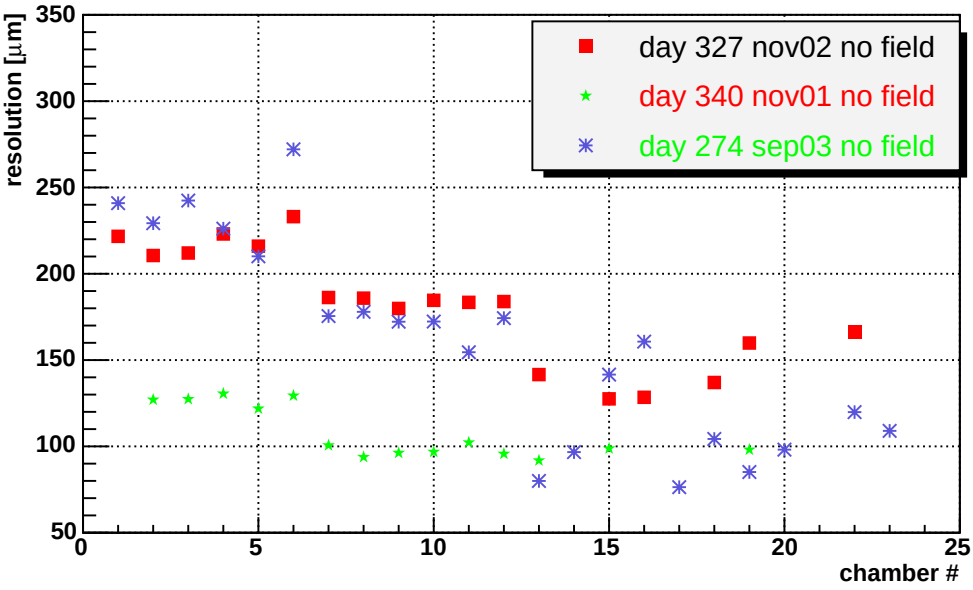

Abbildung 6.16: *Intrinsische Auflösung der Driftkammern im Vergleich. Kammern 1 - 6: Ebene I; Kammern 7 - 12: Ebene II; Kammern 13 - 18: Ebene III; Kammern 19 - 24: Ebene IV. Als Driftgeschwindigkeit wurde die aus Simulationen für die unterschiedlichen Zellgeometrien ermittelte verwendet.*

II zwischen 2,5 und 3 ns. Da dieser Wert auch durch die "Spurfitting - Methode" bestätigt wurde, kann er als Referenz genommen werden. Für November 2002 liegt die durch die beschriebene Methode ermittelte Zeitauflösung im Bereich zwischen 4 und 5 ns. Dieser Wert wird durch die Spurfitting - Methode nicht bestätigt. Sie liefert denselben Wert wie für die Datensätze vom November 2001.

Abbildung 6.19 zeigt die Zeitauflösung für die Datensätze der Strahlzeiten November 2001 und 2002. Die Analyse der Daten vom September 2003 ist sehr viel aufwendiger, da hier zum ersten Mal mehrere verschiedene Trigger verwendet wurden. Da die Signallaufzeiten im Triggersystem für die unterschiedlichen Triggersignale nicht identisch sind, dürfen bei der Analyse nur Daten des selben Triggertyps verwendet werden, da andernfalls die Korrelation der beiden Driftzeiten der 0∘ - Ebenen verschlechtert wird.

Bei der Umrechnung der TDC - Meßwerte in Zeiten wird eine Korrektur der Signallaufzeiten des Triggersignals vorgenommen. Dieses variiert je nachdem welcher Kanal des im Trigger verwendeten Detektors die Zeitlage des Triggersignals definiert. Daher muß für die Ermittlung der Driftzeitkorrelation eine

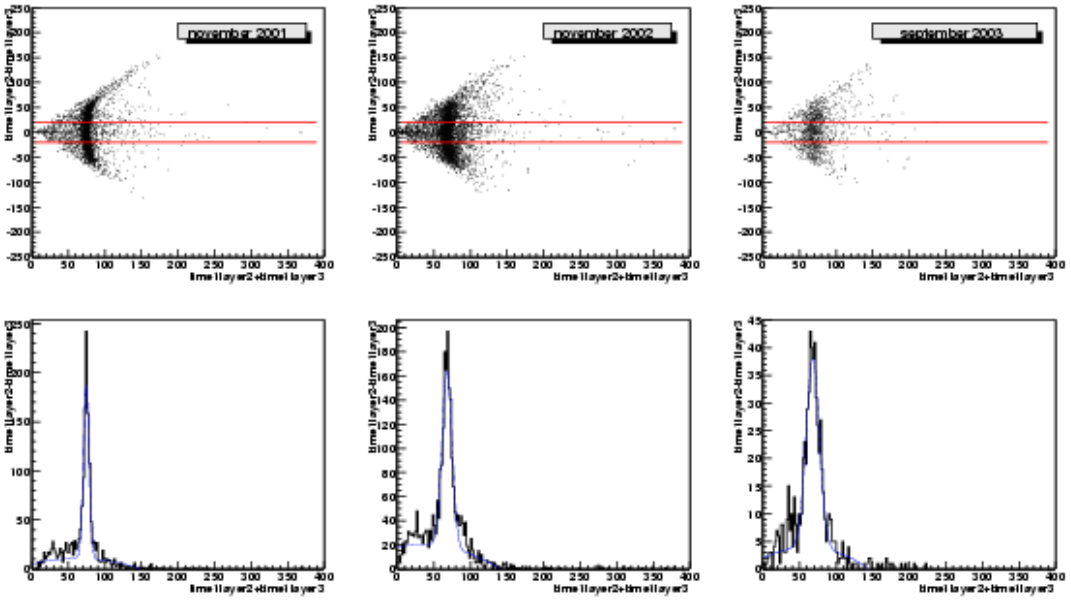

Abbildung 6.17: *Korrelation der Driftzeiten in den beiden 0° - Ebenen vom September 2003. Dargestellt ist in der oberen Reihe die Korrelation für eine Zellkombination. Die untere Reihe ist die dazugehörige Projektion des durch die Linien begrenzten Bereiches. Diese Verteilungen wurden mit einem Fit nach Formel 6.1 bewertet. Dargestellt ist Sektor 1, Ebene II, erste 0° - Ebene Signaldraht 94. Das physikalische Zentrum liegt bei Draht 98.*

Beschränkung auf einen Detektorkanal durchgeführt werden. Dies ist für die Datensätze vom November 2001 und 2002 dadurch realisiert, daß nur solche Ereignisse berücksichtigt werden, die durch denselben Kanal des Startdetektors (Diamant Streifenzähler, 8 Kanäle [Ber99]) getriggert wurden. Für die p + p - Reaktionen im September 2003 konnte dieser Detektor aber nicht eingesetzt werden, da zum einen Protonen in Diamant kein Signal liefern, und er zudem als Quelle zusätzlichen Untergrundes fungieren würde. Als Startdetektor kam daher ein Detektor bestehend aus 16 Plastikszintilatoren von 1 cm Dicke zum Einsatz. Während die Zeitauflösung des Diamantdetektors ≈ 60 ps beträgt, liegt sie für diesen Plastikszintilator bei ≈ 300ps. Diese liegt im Bereich der Zeitauflösung des TOF - Detektors, was die Korrektur der gemessenen Flugzeiten erschwert.

Die Triggerentscheidung wird durch die Multiplizität im TOF/TOFINO - System gebildet. Dieses besteht aus 384 Kanälen TOF und 24 Kanälen TOFINO. Der Trigger war so aufgesetzt, daß entweder 4 Kanäle TOF oder 2 Kanäle TOFINO ein Signal liefern mußten, um als Trigger erkannt zu werden. Da jeder einzelne Kanal ein eigenes Signalzeitverhalten hat, müßte die Bedingung für

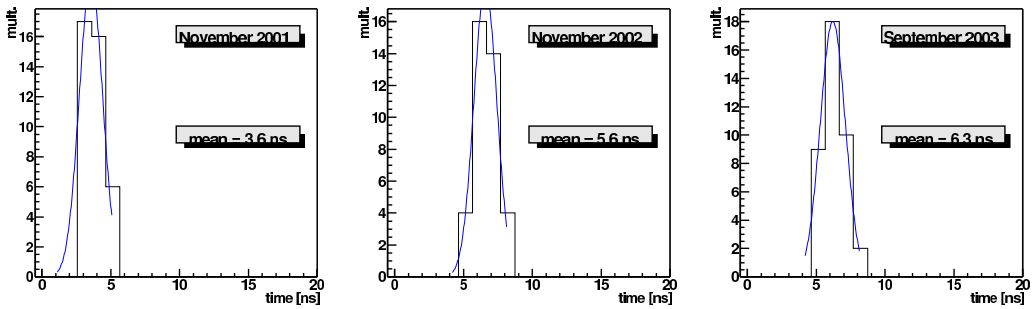

Abbildung 6.18: *Zeitauflösung einer Driftkammer im Vergleich dreier Strahlzeiten. Vom November 2001 zum September 2003 wird die Zeitauflösung um nahezu einen Faktor 2 schlechter.*

die Ereignisse, die für die Driftzeitkorrelation Verwendung finden, so gewählt werden, daß immer dieselbe Kombination von TOF - oder TOFINO - Kanälen ein Signal im Trigger liefert. Dies reduziert die Statistik deutlich und macht die Analyse der Zeitauflösung nahezu unmöglich, da die Menge der Daten, die ohne Magnetfeld gemessen wurden, dafür zu klein ist ($\approx$ 3.7 Millionen Ereignisse insgesamt).

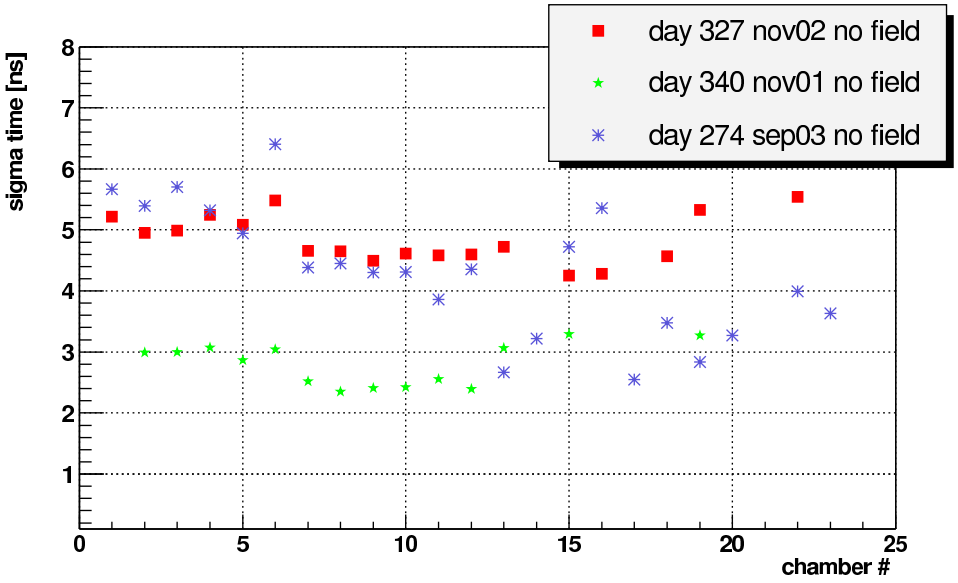

Abbildung 6.19: *Zeitauflösung der Driftkammern im Vergleich. Kammern 1 - 6: Ebene I; Kammern 7 - 12: Ebene II; Kammern 13 - 18: Ebene III; Kammern 19 - 24: Ebene IV.*

Abbildung 6.20 zeigt für die Daten vom September 2003 die Driftzeitkorrelationen für die verschiedenen diskutierten Bedingungen. In der linken Spalte wurden alle Ereignisse berücksichtigt, die einen Treffer in einem einzelnen Streifen des Startdetektors hatten. Die mittlere Spalte berücksichtigt alle Ereignisse, bei denen dieselbe Triggerbedingung erfüllt war. In der rechten Spalte wurden beide Bedingungen berücksichtigt. Man sieht deutlich die Abnahme der Statistik von links nach rechts. Zugleich scheitert der Fit der Projektion in der rechten Abbildung, was die Analyse der Zeitauflösung mit der beschriebenen Methode unmöglich macht.

Bei der Bestimmung des Offsets der Driftzeiten, wird seit den Daten vom November 2002 die Laufzeit der Signale auf den Drähten in der Kammer berücksichtigt. Dies führt dazu, daß die Driftzeitkorrelation zweier Zellen, die auf unterschiedlichen Seiten der Kammer ausgelesen werden, verloren geht, sofern der Treffer nicht in der Nähe der Mittelachse der Kammer liegt. Dadurch wird die Statistik der verwendbaren Treffer ebenfalls stark beschränkt.

Dies bedeutet, daß die beschriebene Methode sehr empfindlich auf die Offsetkalibration ist. Aufgrund von mangelnder Statistik kann die benötigte Anzahl an Spuren pro Kammer unter den beschriebenen Einschränkungen nicht erreicht werden. In einer zukünftigen Strahlzeit sollte daher eine deutlich größere Statistik

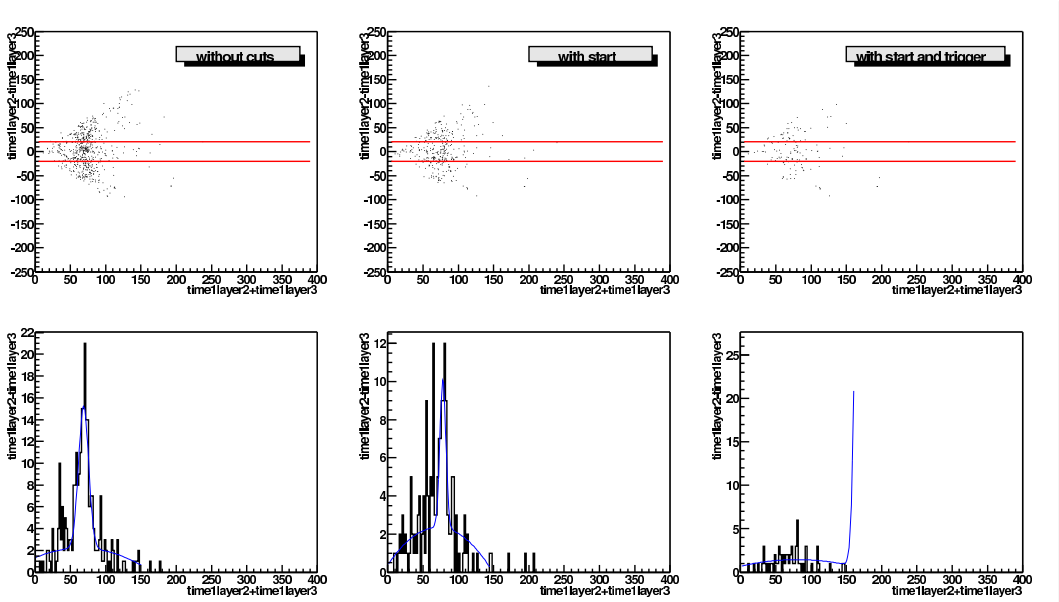

Abbildung 6.20: *Korrelation der Driftzeiten in den beiden 0° - Ebenen vom September 2003. Gleiche Darstellung wie in Abbildung 6.13 aber für drei unterschiedliche Bedingungen bezüglich Start und Trigger.*

an Ereignissen ohne Magnetfeld aufgenommen werden.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Im ersten Teil dieser Arbeit (Kapitel 4) wurde das Konzept einer flexiblen Ausleseelektronik für die Vieldraht - Driftkammern im HADES - Experiment vorgestellt. Die besonders hohen Anforderungen bezüglich Geschwindigkeit, die sich aus den zuuntersuchenden physikalischen Fragestellungen (siehe Kapitel 2.4) ergeben, und dem kompakten Aufbau, der durch den auf dem Detektor zur Verfügung stehenden Platz gegeben ist, wurde dabei berücksichtigt.

Daneben wurde bei der Auslegung der elektrischen Komponenten besonderer Wert gelegt auf geringen Stromverbrauch, um die Erwärmung der empfindlichen Komponenten (TDC - Chips) zu minimieren, da dies die Zeitauflösung (siehe Kapitel 6.3.2) und damit die erreichbare Ortsauflösung beeinflußt.

Der zweite Teil (Kapitel 5 und 6) diskutiert die wichtigsten Komponenten der Datenanalyse zur Überwachung der Effizienz des Detektors und der Ausleseelektronik. Dabei wurde zwischen Online - und Offlineanalyse unterschieden. Ausführlich diskutiert wurden die Anforderungen an die Parameter, die durch die Onlineanalyse kontrolliert werden sollen. Insbesondere der erforderliche Zeitaufwand für die Ermittlung der Parameter wurde bei der Auswahl berücksichtigt.

Dabei zeigte sich, daß im wesentlichen nur Parameter, die auf der Ebene der Rohdaten oder der kalibrierten Daten basieren, dafür geeignet sind, im Rahmen der Echtzeitanalyse eingesetzt zu werden, da alle höheren Datenebenen einen zu großen Analyseaufwand haben, der zu einer großen zeitlichen Verzögerung führen würde. Dies ist insbesonder in der geringen Menge von Ereignissen begründet die durch die Datenaufnahme für die Echtzeitüberwachung zur Verfügung gestellt werden.

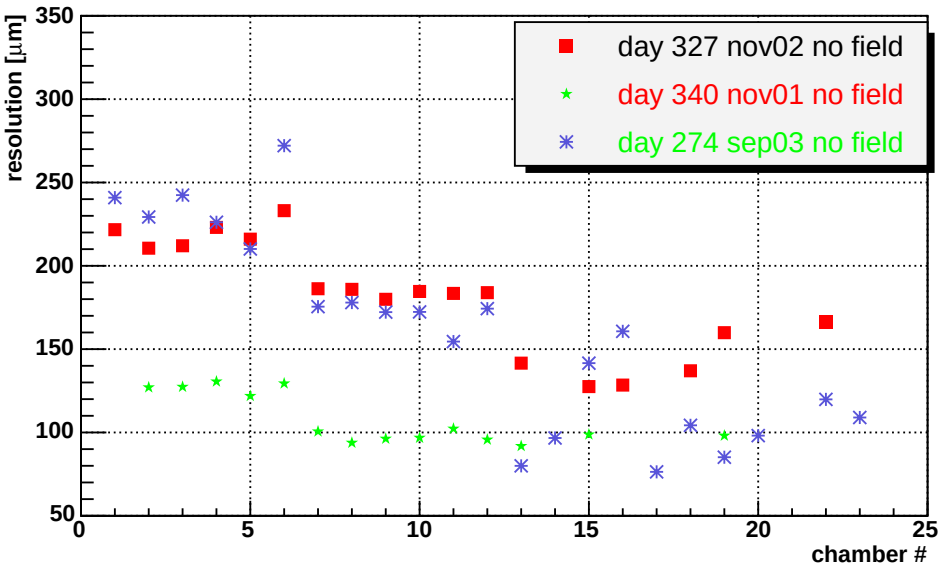

Abbildung 7.1: *Zusammenstellung der intrinsischen Auflösung der Driftkammern im Vergleich der Strahlzeiten November 2001, November 2002 und September 2003.*

Detailliert untersucht wurden zwei Eigenschaften der Driftkammern. Zum einen die Position des physikalischen Zentrums der Kammern, und zum anderen die intrinsische Auflösung der 0°-Ebenen. Beide Parameter wurden für Datensätze aus drei verschiedenen Strahlzeiten (November 2001 und November 2002; C + C bei 2 GeV pro Nukleon und September 2003: p + p bei 2 GeV) verglichen. Beide Parameter lassen sich nur aus Daten, die ohne Magnetfeld gemessen wurden, bestimmen. Die zur Verfügung stehende Statistik war dadurch begrenzt.

Dabei ergaben sich Abweichungen für die intrinsische Auflösung von bis zu einem Faktor 2, für die verschiedene Ursachen diskutiert wurden. Für die Strahlzeit vom November 2001 wurde das Ergebnis einer früheren Analyse reproduziert. Die intrinsische Auflösung ergab sich hier zu $\approx 130\,\mu$m für die Kammern der Ebene I und $\approx 100\,\mu$m für alle anderen Kammern. Im November 2002 lag die Auflösung bei $\approx 180\,\mu$m für Ebene I und $\approx 150\,\mu$m für die anderen Ebenen. Im September 2003 lag die Auflösung erneut höher als in der vorangegangenen Strahlzeit. Sie beträgt nun $\approx 230\,\mu$m für Ebene I, $\approx 170\,\mu$m für Ebene II und $\approx 100\,\mu$m für Ebene III und IV. Damit beträgt sie für die Kammern der Ebene III und IV denselben Wert wie im November 2001. In Abbildung 7.1 sind die Ergebnisse zusammengestellt.

Als mögliche Ursachen für diese Beobachtung wurden verschiedene Effekte untersucht, die letztendlich alle darauf hinauslaufen, daß die Kalibration der Daten nicht genau genug ist, um die Auflösung mit der erforderlichen Genauigkeit zu bestimmen. Durch die Kalibration sollen Effekte von Driftgeschwindigkeitsänderungen, Signallaufzeiten und Änderungen der Zeitauflösung der TDC - Chips korrigiert werden. Die Driftgeschwindigkeit hängt von der Gaszusammensetzung und der angelegten Hochspannung ab. Diese werden durch das SCS - System überwacht. Die Korrektur der Signallaufzeiten geschieht durch die Bestimmung eines globalen Offsets (siehe [Mar04a]), in den alle Signallaufzeiten der Elektronik eingehen. Die Korrektur der Zeitauflösung geschieht durch die sogenannte "Online Kalibration", bei der der TDC - Chip sechs Zeiten mit festen Abständen mißt. Die erhaltenen Slope - Parameter dienen zur Umrechnung der Meßwerte in Zeiten.

Die Änderung des physikalischen Zentrums der Kammern im Vergleich der drei untersuchten Strahlzeiten kann durch die zwischenzeitlich durchgeführten Montagearbeiten erklärt werden, bei denen die Kammern bewegt wurden. Im Rahmen des Alignments wird die Positionierung der Detektoren untereinander und relativ zum Target ermittelt. Die Lage des Magnetfeldes wird im Moment als bekannt angenommen. Die Positionierung der Detektoren relativ zum Magnetfeld wird zur Zeit untersucht.

Die Abweichungen des physikalischen Zentrums von seiner Sollposition beträgt für die Kammern der Ebene I 0,5 bis 3,5 cm, für die Ebene II 3 bis 4,5 cm, für die Ebene III -2 bis 2 cm und für die Ebene IV 7 cm für die Strahlzeit November 2001. Für die Strahlzeit vom September 2003 weichen die Werte nur geringfügig davon ab. Die Daten vom November 2002 zeigen eine deutliche Abweichung von diesen Werten.

Abbildung 7.2 stellt diese Informationen zusammen. Wie Abbildung 6.10 (rechts) zeigt, kann mit der beschriebenen Methode das physikalische Zentrum exakt bestimmt werden. Diese Methode kann daher verwendet werden, um die Qualität der Alignmentparameter zu beurteilen.

Aus den Daten des physikalischen Zentrums kann eine Verschiebung entlang der Strahlachse berechnet werden. Die Richtung dieser Verschiebung wird durch die unabhängige Bestimmung der Targetposition bestätigt. Der Betrag der Verschiebung ist hingegen nicht genau genug, da bei seiner Bestimmung zwei mögliche Raumrichtungen nicht berücksichtigt werden.

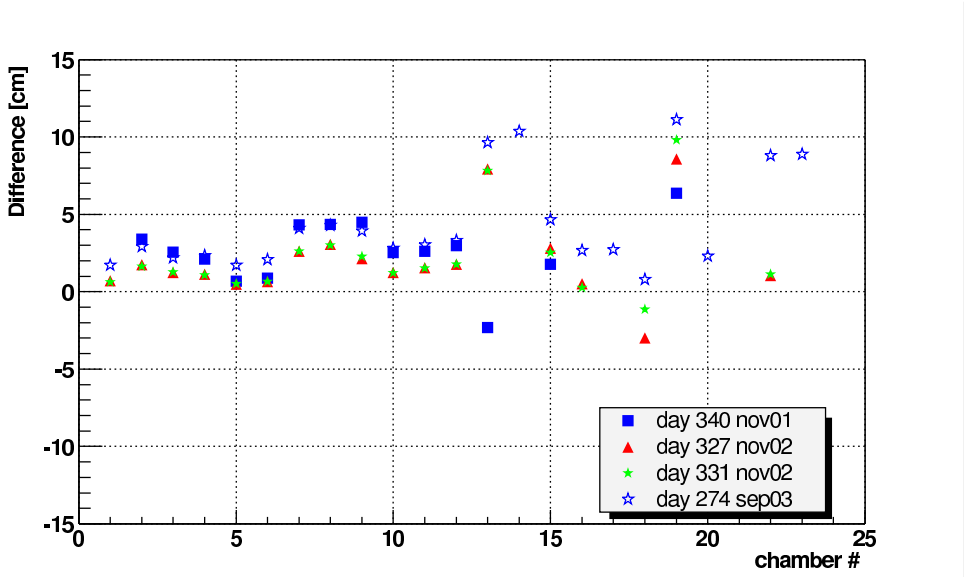

Abbildung 7.2: *Abweichung der Position des physikalischen Zentrums der Driftkammern relativ zur geometrischen Position des physikalischen Zentrums. Es sind die Ergebnisse für Datensätze aus den Strahlzeiten vom November 2001, November 2002 und September 2003 zusammengestellt.*

7.2 Ausblick

7.2.1 Hardware

Bisher wurden mit dem HADES-Spektrometer nur leichte Stoßsysteme wie p + p und C + C untersucht. Die dabei auftretenden Teilchenmultiplizitäten stellen aber nur einen Bruchteil dessen dar, was bei dem schwersten zu untersuchenden System Au + Au bei 1,5 AGeV zu erwarten ist. Die höhere Multiplizität führt zu einer größeren zu übertragenden Datenmenge auf dem Level 1-Bus und vergrößert den Zeitabstand zwischen dem LVL 1- und dem LVL 2-Trigger, da das Triggersystem länger braucht, um die Di-Elektronenkandidaten zu finden. Die Triggerrate wird durch die primäre Wechselwirkungsrate und die Geschwindigkeit des Auslesesystems bestimmt.

Es hat sich bereits bei den ersten Experimenten mit leichten Stoßsystemen gezeigt, daß das vorgestellte Auslesesystem in der gegenwärtigen Konfiguration nicht in der Lage ist, diese Daten- und Triggerraten zu verarbeiten, obwohl es vom Design her dafür ausgelegt ist. Die Verarbeitung der Daten in den Read-Out-Kontrollern und den SAM-Modulen stellt keine Beschränkung für die Auslesegeschwindigkeit dar. Die Übertragung der Daten zwischen den Modulen hingegen limitiert die erreichbare Geschwindigkeit.

Dies beruht zum einen darauf, daß das System im Moment vollkommen synchron betrieben wird. Das bedeutet, daß immer ein LVL 1 - und ein LVL 2 - Trigger zusammen abgehandelt werden. Ursprünglich war vorgesehen, die beiden Trigger asynchron laufen zu lassen. Das ist nicht möglich, da die Datenübertragung auf dem Level 2 - Bus Störungen im Verstärker der Daughterboards verursacht. Diese beruhen auf Schwankungen der Versorgungsspannung, verursacht durch die Belastung beim Übertragen der Daten. Zusätzlich limitiert die Implementation der DTU die Datenrate.

Eine verbesserte Spannungsstabilisierung für die Versorgungsspannungen der Front - End - Elektronik wird zu einer deutlichen Reduktion der Störungen führen. Zudem wird zur Zeit das Protokoll auf dem Level 2 - Bus überarbeitet. Dadurch wird eine Steigerung der Übertragungsgeschwindigkeit und eine Verringerung der elektrischen Belastung der Spannungsversorgung erreicht. Außerdem kann durch Anpassen der Grundzustände der Signale auf dem Level 1 - Bus der Stromverbrauch der Treiber deutlich reduziert werden. Dazu sollen zunächst Abschlußwiderstände optimiert werden, an denen momentan noch Leistung unnötig verbraucht wird.

Eine weitere Steigerung der Triggerraten ist auch möglich, indem man die zu übertragende Datenmenge reduziert. Dies kann zum Beispiel durch Komprimieren der Daten geschehen oder durch verbesserte Triggersoftware. Diese ist dafür verantwortlich, die Daten nach Ereignissen mit Di - Elektronen zu durchsuchen. Eine hohe Effizienz dieser Erkennung führt zu einer Verringerung der Anzahl der zu übertragenden Ereignisse im Level 2 - Bus vom Read - Out - Kontroller zum SAM - Modul.

Eine zusätzliche Möglichkeit ist die Implementation des ursprünglich vorgesehenen LVL 3 - Triggers, der dann die Informationen aller Detektorsysteme untersucht und zum Beispiel ein Fenster auf die invariante Masse des Di - Elektronen - Paares setzen kann. Dadurch sollte die Datenrate um einen zusätzlichen Faktor 10 reduziert werden. Diese wirkt aber auf die Menge der auf dem VME - Bus zwischen SAM und CPU übertragenen Daten, und führt nur zu einer Reduktion der wegzuschreibenden Daten.

7.2.2 Qualitätskontrolle

Im Rahmen der DST - Produktion wird für jeden Datensatz ein Dokument erzeugt, das einige charakteristische Spektren jedes Detektors enthält. Im Anschluß an die DST - Produktion wird anhand dieser Spektren entschieden, welche Datensätze für die weitere Analyse verwendet werden können.

Diese Prozedur ist sehr zeitaufwendig, da in der Regel mehrere hundert Dokumente mit ≈ 30 Seiten durchgesehen werden müssen. Es ist deshalb erforderlich, für diese Kontrollhistogramme Referenzhistogramme zu haben, mit denen ein automatischer Vergleich während der DST - Produktion möglich ist. Nur für all die Datensätze, bei denen dieser Vergleich eine starke Abweichung in einem Histogramm ergibt, ist es nötig, daß die resultierenden Dokumente von einem Experten begutachtet werden. Dieser Mechanismus ist aber bisher mangels Referenzhistogrammen noch nicht implementiert worden.

Aus den bisherigen DST - Produktionen hat man gelernt, daß es den perfekten Referenzplot nicht gibt. Da die Kontrollhistogramme stark von den Detektoreigenschaften abhängen, ist die Erstellung von Referenzhistogrammen für jede Strahlzeit getrennt vorzunehmen. Bei den Driftkammern wurden zwischen den einzelnen Strahlzeiten zudem zusätzliche Detektoren eingebaut und andere nach erfolgter Reparatur an anderen Positionen eingebaut, sodaß neue Referenzhistogramme nötig sind, bzw. nun für andere Positionen gelten.
Außerdem gibt es keine mathematische Methode, die in der Lage ist, zu beurteilen, ob eventuelle Unterschiede zwischen zwei Histogrammen relevant sind oder nicht. So kann zum Beispiel eine Änderung des Mittelwertes der Driftzeitverteilung nicht relevant sein, weil sie nur auf kleine Ungenauigkeiten in der Kalibrierung hinweist. Im anderen Fall kann sie aber relevant sein, wenn nämlich die Flanke durch die Zeitfenster teilweise weggeschnitten wird, was zu einer Verschlechterung der Auflösung führt. Dadurch wird das Problem sehr komplex, da die Entscheidung nur auf der Grundlage von mindestens zwei Informationen getroffen werden kann.

In Kapitel 5 wurde beschrieben, wie im Rahmen der Low - Level - Qualitätskontrolle anhand von Mittelwerten einiger Variablen der Driftkammern entschieden wird, welche Datensätze für die DST - Produktion verwendet werden. Dabei wird durch ein Programm für jede Variable unabhängig entschieden, ob der Datensatz den Anforderungen genügt oder nicht. Die Weiterentwicklung dieses Programmes dahingehend, daß es in der Lage ist, Variablen miteinander zu korrelieren, wäre der nächste Schritt hin zu einer vollständig automatisierten Entscheidung über die Qualität der Datensätze.

7.2.3 Physikalische Ergebnisse

Eine der Hauptfragestellungen, die mit dem HADES - Spektrometer untersucht werden sollen, ist die nach dem Überschuß an Di - Elektronenpaaren bis zum Massenbereich des ω Mesons in schweren Kern - Kern Stößen relativ zu leichten Stoßsystemen oder Proton - Kern - Stößen, der vom DLS - Spektrometer beobachtet wurde (vgl. Kapitel 2.2 und 2.4).

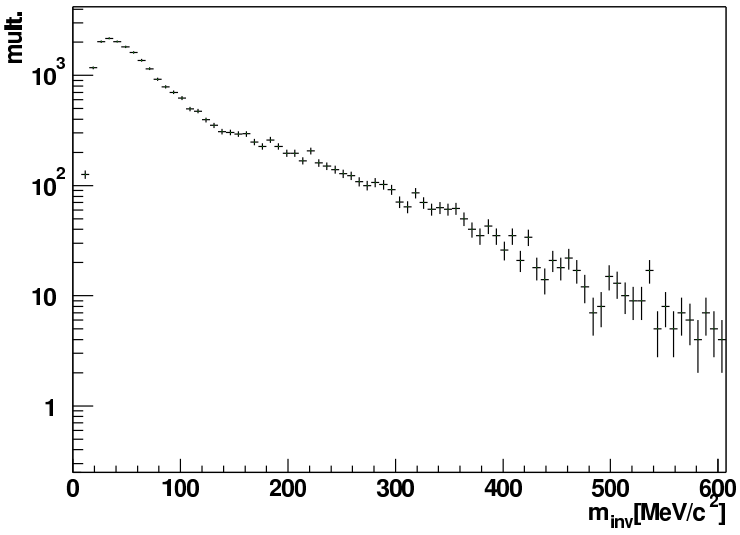

Abbildung 7.3: *Vorläufiges Ergebnis der invarianten Massenverteilung von Di-Elektronenpaaren aus dem System C + C bei 2 GeV pro Nukleon (Nach [Sud04], [Otw04]).*

Zu diesem Zweck wurden im November 2002 Daten im Stoßsystem C + C bei 2AGeV aufgenommen und die invariante Masse der entstehenden Di-Elektronenpaare untersucht. Zur Bestimmung der invarianten Masse werden Spuren in den Driftkammern mit Ringen im Rich und Treffern im META - System korreliert. Nur von Leptonen werden in diesen Detektoren eindeutige Spuren hinterlassen. Danach wird für alle Spuren mit diesen Korrelationen anhand der Ablenkung im Magnetfeld der Impuls der Teilchen bestimmt. Anhand verschiedener charakteristischer Signaturen in den Detektoren wird die Teilchensorte identifiziert. Alle Teilchen, die dadurch als Leptonen identifiziert sind, werden in der weiteren Analyse verwendet.

In Abbildung 7.3 ist das Ergebnis der ersten Analyse dieser Daten gezeigt. Dargestellt ist die invariante Masse aller $e^+ e^-$ - Paare. Nicht abgezogen sind der kombinatorische Untergrund und $e^+ e^-$ - Paare aus Paarkonversion. Dominiert wird dieses Spektrum durch den Zerfall der π^0 - Mesonen, da in der Analyse bisher noch keine Reduktion von $e^+ e^-$ - Paaren mit kleinem Öffnungswinkel stattfindet. Bei invarianten Massen oberhalb von $\approx 200\,\mathrm{MeV}$ ist im Moment (Stand May 2004) die Statistik noch zu klein, um ein deutliches Signal oberhalb des Untergrunds zu erhalten.

Anhang A

Dokumentation der Logik

A.1 CPLD - Programme

Um die Hardware so flexibel wie möglich zu halten, wurden alle Logikfunktionen mit programmierbaren Bausteinen realisiert. Dadurch lassen sich Änderungen in den Funktionen ohne Änderung der Hardware realisieren. Es werden zwei unterschiedliche Arten von CPLD - Chips eingesetzt. Solche, die ihr Programm auch über einen Abschaltzyklus behalten, und solche, die danach wieder neu programmiert werden müssen. Letztere werden auf den Read - Out - Kontrollern eingesetzt.

A.1.1 Motherboard

Da der Datenbus zwischen Motherboard und Read - Out - Kontroller (LVL1 - Bus) differentiell ausgeführt ist und aus Platzgründen für die 34 zu übertragenden Signale nur 25 Signalleitungen zur Verfügung stehen, ist die Hauptaufgabe des CPLD auf dem Motherboard, die Komunikation zwischen Read - Out - Kontroller und TDC - Chips zu steuern. Dieser CPLD besitzt einen nichtflüchtigen Speicher und kann über das Level 1 - Buskabel neu programmiert werden. Dazu sind vier Leitungen für einen JTAG - Bus reserviert.

Von den 19 Datenbits des TDC - Chips werden 18 über 9 Leitungen im Multiplexverfahren[1] übertragen. Das 19. Signal wird über eine eigene Leitung übertragen. Vier Leitungen des Bus - Systems enthalten Steuersignale, mit denen die einzelnen Modi der TDC - Chips vom Read - Out - Kontroller gesteuert werden. Des weiteren werden drei Leitungen für die Adresse der Motherboards im Bus benötigt, sowie je einer für das CMS -und das COR - Signal.

[1] Effektiv zwei Bits pro Clockzyklus des TDC

Außerdem enthält der Baustein noch die Logik zum Ansteuern des DAC (siehe Kapitel 4.2.2). Dieser wird über ein serielles Protokoll angesteuert, anstatt einem paralellen wie auf dem Level 1 - Bus. Der CPLD - Chip empfängt das CMS - Signal und sperrt $\approx 100\,\text{ns}$ nach dem Eintreffen der fallenden Flanke die Messkreise der TDC - Chips, damit während der Auslese keine weitere Messung stattfindet. Der Baustein versorgt die TDC - Chips mit dem 5 MHz - Takt zur Synchronisation der Auslese. Dieser wird aus dem externen 50 MHz - Takt erzeugt, der auch zur Taktung der Logik verwendet wird.

A.1.2 Read - Out - Kontroller

Auf dem Read - Out - Kontroller befinden sich zwei CPLD - Bausteine. Der eine Baustein ist notwendig, um das Programmieren des eigentlichen Logikbausteins zu ermöglichen. Er hat einen nichtflüchtigen Speicher und kann nur im ausgebauten Zustand über eine JTAG - Schnittstelle umprogrammiert werden. Der eigentliche Logikbaustein hingegen muß nach jedem Einschalten des Systems neu programmiert werden. Dadurch ist es möglich, die Logik geänderten Anforderungen anzupassen ohne alle Read - Out - Kontroller ausbauen zu müßen, um sie im Labor neu zu programmieren.

Programmier - Baustein

Da die Programmierung des Hauptbausteines des Read - Out - Kontrollers über eine serielle JTAG - Schnittstelle geschieht, muß die Information von der Backplane des VME - Crates serialisiert und zusammen mit einem Clocksignal an den Hauptbaustein geschickt werden. Dabei ist das Timing des JTAG - Busses sehr genau einzuhalten, da sonst die Programmierung fehlschlägt. Ein Zurücklesen der Informationen zum Zwecke der Überprüfung ist aus Kapazitätsgründen nicht implementiert.

Haupt - Baustein

Aufgabe dieses Bausteines ist es, die internen Resourcen des Read - Out - Kontrollers zu verwalten und den Zugriff auf sie zu regeln. Zu diesen Resourcen gehört der Speicher für die TDC - Daten, der Level 1 - Bus, sowie der Zugriff auf die Backplane des VME - Crates. Der Baustein steuert die Auslese der Motherboards und stellt sicher, daß der DSP nicht in demselben Moment auf den Speicher zugreift, in dem ein Motherboard Daten in diesen schreibt. Er verwaltet mittels diverser Register (vgl. Tabelle B.2) die Speicher, sowie Informationen über anstehende Trigger.

A.1.3 Konzentrator

Der Konzentrator ist lediglich ein Busumsetzer, der die Daten vom VME - Bus auf den GTB - Bus umsetzt. Seine Logik dient dazu, alle einkommenden Signale auf beiden Bus - Systemen mit einem Flip - Flop auf die interne Clockfrequenz zu synchronisieren, um Störungen auf den Bussystemen zu reduzieren. Danach werden die Signale an das andere Bus - System witergereicht.

A.1.4 Triggermodul

Auch das Triggermodul ist nur ein Protokollumsetzer. Um die auf den insgesamt 16 Leitungen des Detektor - Triggerbus ankommenden Signale, die nach LVL1 - und LVL 2 - Trigger getrennt sind, über die Backplane des VME - Crates an die Read - Out - Kontroller zu übertragen, müssen sie serialisiert werden. Dabei werden die Datenbits von Triggertyp und Triggertag über 4 Leitungen paralell übertragen. Lediglich die Triggerinformation wird über getrennte Leitungen übertragen. Anhand der Signale auf diesen Leitungen entscheidet der Read - Out - Kontroller, um welchen Trigger es sich handelt, um die Daten in das richtige Register schreiben zu können.

Anhang B

Hardware - Adressen

In den folgenden Abschnitten werden die Adressen aufgeführt, mit denen auf die Front - End - Hardware zugegriffen werden kann. Dabei tauchen einige Ziele mehrfach auf mit unterschiedlichen Adressen, je nachdem von wo aus der Zugriff erfolgt. Diese Information ist für den normalen Betrieb unwichtig, während der Debuggingphase aber von elementarer Bedeutung.

B.1 Motherboard

Auf den Motherboards kann auf alle Mode - Register der TDC - Chips, auf die Register des DAC - Chips und auf das Board Configuration - Register[1] zugegriffen werden. Der Zugriff kann entweder vom DSP des Read - Out - Kontrollers erfolgen, vom SAM - DSP oder direkt von der CPU aus (vgl. Abbildung 4.2). Die zu verwendenden Adressen sind jeweils in den folgenden Abschnitten angegeben.

B.2 Read - Out - Kontroller

In Tabelle B.1 sind die Adressen der Resourcen auf den Motherboards aufgeführt. Mit diesen Adressen kann vom DSP auf die Resourcen des Motherboards zugegriffen werden. Sie werden in der Regel aber nur während der Initialisierungsphase benötigt, und sind deshalb nur in den Initialisierungsinformationen von Interesse. In Tabelle B.2 sind die internen Resourcen des Read - Out - Kontrollers aufgeführt. Nicht alle der aufgeführten Adressen können auf dem Read - Out - Kontroller - Version 3 angesprochen werden.

[1] Bord Konfigurations Register

Resourcen Name	Adresse Bus 1	Adresse Bus 2
Erstes Motherboard		
DAC	18C0 - 18C5	1AC0 - 1AC5
TDC's	1884 - 18BF	1A84 - 1ABF
MBCR	18E1	1AE1
Zweites Motherboard		
DAC	1940 - 1945	1B40 -1B45
TDC's	1904 - 193F	1B04 - 1B3F
MBCR	1961	1B61
Drittes Motherboard		
DAC	19C0 - 19C5	1BC0 - 1BC5
TDC's	1984 - 19BF	1B84 - 1BBF
MBCR	19E1	1BE1

Tabelle B.1: *Resourcen auf den Motherboards. Adressen wie sie vom DSP des Read - Out - Kontrollers verwendet werden. Nach [Hof98a]*

Resourcen Name	Adresse	Bedeutung
DMCR	1C01	Modul Status Register
DBSR	1C02	Board Status Register
ERS	1C03	Fehler Register
COMR	1C04	Komunikations Register
TSR1	1C05	LVL1 Trigger Status Register
TNR1	1C06	LVL1 Trigger Nummer Register
TSR2	1C07	LVL2 Trigger Status Register
TNR2	1C08	LVL2 Trigger Nummer Register
TREG	1C09	
SRAM	1000 - 17FF	
MNRAM	2000 - 27FF	
PRAM	2800 - 2FFF	
RMCR	1A01	Mode Kontroll Register
RPCR	1A02	Adresszähler für Dual - Ported RAM
RBSR	1A03	Board Status Register

Tabelle B.2: *Resourcen auf dem Read - Out - Kontroller für den Zugriff durch den DSP des SAM - Modules. Nach [Hof98b]*

Name	Adresse	Bedeutung
GRAM	80000000 - 8007FFFF	Programm Speicher DSP
VRAM	81000000 - 813FFFFF	Hauptspeicher DSP
DMSR	81400002	Modul Register
GSR	814000001	GTB Bus Register
CRAM	81800000 - 818007FF	Komunikations Speicher
GTBX	00300000 - 0030FFFF	GTB Bus 1
GTBY	00310000 - 0031FFFF	GTB Bus 2
X-RAM	00420000 - 004207FF	Speicher für GTB 1
Y-RAM	00430000 - 004307FF	Speicher für GTB 2
DSR	00440000	DSP Status Register
FSR	00440001	Triggerbus Register
CFSR	00440002	Triggerbus Reset Register
DIS1	00450001	Oberstes Display
DIS2	00450004	Mittleres Display
DIS3	00450010	Unterstes Display

Tabelle B.3: *Interne Resourcen des SAM - Modules. Adressen gelten für den Zugriff mit dem DSP. Nach [Hof97]*

B.3 SAM - Modul

Die internen Resourcen des SAM - Moduls sind in Tabelle B.3 aufgeführt. Über den GTB - Bus kann auf alle Resourcen der Front - End - Hardware zugegriffen werden.

B.4 Kontroll - und Auslese - CPU

Von der CPU aus können die Resourcen auf dem SAM mit den in Tabelle B.4 angegebenen Adressen angesprochen werden.

Name	AM	Adresse	Bedeutung
VRAM1	09	XX000000 - XX01FFFC	DPRAM1 wahlfreier Zugriff
VRAM2	09	XX100000 - XX11FFFC	DPRAM2 wahlfreier Zugriff
VRAM1	0B	XX000000 - XX01FFFC	DPRAM1 32 Bit Blockmode Transfer
VRAM2	0B	XX100000 - XX11FFFC	DPRAM2 32 Bit Blockmode Transfer
VRAM1	08	XX000000 - XX01FFFC	DPRAM1 64 Bit Blockmode Transfer
VRAM2	08	XX010000 - XX11FFFC	DPRAM1 64 Bit Blockmode Transfer
HPI1	09	XX200000 - XX020001C	HPI Port DSP 1
HPI2	09	XX300000 - XX300001C	HPI Port DSP 2
CSR0	09	XX400000	DSP FPGA Kontroll und Status Register
CSR1	09	XX400004	FLASH Speicher Kontroll Register
FLASH	09	XX500000 - XX50FFFC	Konfiguration des FLASH EPROM

Tabelle B.4: Resourcen des SAM - Modules. XX Steht für die Moduladresse. Die Spalte AM steht für den zu verwendenden Adress Modifier. Nach [Hof02]

Anhang C

Motherboard - Initialisierung

C.1 Beteiligte Register

An der Initialisierung der Motherboards sind neben den vier Registern jedes TDC - Chips, den Registern des DAC - Chips und dem Register des Motherboard - CPLD auch das Mode - Kontroll - Register des Read - Out - Kontrollers beteiligt. Der Aufbau dieser Register ist in den folgenden Tabellen(C.1, C.2, C.3, C.4 und C.5) erklärt.

Das Bit 6 des Mode - Kontroll - Registers des Read - Out - Kontrollers muß vor jeder Änderung der Modusbits (Bit 2 -5) gesetzt werden. Mit diesem Bit wird der Meßkreis sämtlicher TDC - Chips gesperrt. Damit wird verhindert, daß durch die Datenübertragung entstehende Störungen durch Einkoppeln auf der Analogseite Auswirkungen auf den Meßkreis haben können. Da der Stromverbrauch des TDC - Chips von der Aktivität des Meßkreises abhängt und sich der Chip mit steigendem Stromverbrauch erwärmt, was zu einem Wegdriften der Kalibration führt, dient diese Maßnahme der Erhöhung der Datenqualität.

C.2 Initialisierungssequenz

In Listing C.1 ist die Initialisierungssequenz für die Motherboards aufgeführt. Diese muß beim Starten der Datenaufnahme einmal ausgeführt werden. Mit ihr werden den TDC - Chips die Adressen zugewiesen.

Alle Aktionen werden mit dem Mode - Kontroll - Register auf dem Read - Out - Kontroller durchgeführt. Dieses Register befindet sich, wie in Tabelle B.2 aufgeführt, an der Adresse 0x1A01.

Steuerregister 0		Steuerregister 1	
Bit	Funktion	Bit	Funktion
9	Token Auswahl 0 : Ausgang Token 1 1 : Ausgang Token 2	11 - 9	Hit Anzahl 000 : 1 Hit 001 : 2 Hits 010 : 3 Hits 011 : 4 Hits 100 : 5 Hits 101 : 6 Hits 110 : 7 Hits 111 : 8 Hits
8 - 6	Schnittstellengeschwindigkeit 000 : 240 ns 001 : 200 ns 010 : 160 ns 011 : 120 ns 100 : 100 ns 101 : 80 ns 110 : 60 ns 111 : 40 ns	8	Auswahl Common Modus 0 : Common stop Modus 1 : Common Start Modus
5	Null - Unterdrückung 0 : Aus 1 : An	7	Auswahl der Flanke Common Puls 0 : erste Flanke 1 : zweite Flanke
4 - 2	Spitzenunterdrückung 000 : Aus 100 : 8 ns (typisch) 101 : 13 ns 110 : 18 ns 111 : 23 ns	6 - 5	Flanken Auswahl für Start Puls 00 : kein Trigger 01 : zweite Flanke 10 : erste Flanke 11 : beide Flanken
		4	Kallibration 0 : keine Kallibration 1 : Start der Kallibration
		3 - 2	Auswahl des Meßbereiches 00 : 11 Bit (500 ns - 600 ns) 01 : 12 Bit (1,0 /*mus* - 1,1 μs) 01 : 13 Bit (2,0 /*mus* - 2,1 μs) 01 : 14 Bit (3,0 /*mus* - 8,2 μs max)

Tabelle C.1: *Steuerregister der Rechnerschnittstelle des TDC - Chips. Nach [Wü97]*

Steuerregister 2		Steuerregister 3	
Bit	Funktion	Bit	Funktion
9 - 2	Auswahl der Kanäle für Kalibration 0 : keine Kalibration des Kanals 1 : Kalibration des Kanals	9 - 2	Auswahl der Kanäle für Meßung 0 : Kanal ausgeschaltet 1 : Kanal angeschaltet

Tabelle C.2: *Kanalregister des TDC - Chips. Nach [Wü97]*

Register	Bedeutung	Wertebereich
1 - 6	Spannung im Kanal 1..6	0x00 bis 0xff

Tabelle C.3: *Register des DAC - Chips*

Bit	Bedeutung
0	RDM Auslese Start
1	RDO Auslese erfolgreich (Token zurück)
2	Mode bit RES
3	Mode bit TOK
4	Mode bit MOD
5	Mode bit WRM
6	Sperren
7	Common stop Signal

Tabelle C.4: *Mode - Kontroll - Register des Read - Out - Kontrollers. Nach[Hof98b]*

Modus Name	RES	TOK	MOD	WRM	Bedeutung
RESET	0	0	0	0	Reset der Motherboards
INIT	0	0	1	0	Initialisiere die TDC Adressen
SETR	1	1	0	1	Lese TDC Setup Daten im Token Modus
ACQ	1	1	1	1	Daten Auslese im Token Modus
TRD	1	0	0	1	Token Auslese Modus
TSTW	0	1	0	0	Test Modus Schreiben, Chip Selekt Modus
TSTR	0	1	0	1	Test Modus Lesen, Chip Selekt Modus
JTAG	0	0	1	1	JTAG Test und Programmierung
SKIP	0	1	1	0	Überspringe den defekten TDC

Tabelle C.5: *Bedeutung der Mode - Bits im Modus - Kontroll - Register des Read - Out - Kontrollers. Nach[Hof98b]*

```
1a01 00
1a01 70
1a01 50
1a01 51
1a01 48

1a01 6c
1a01 6d
1a01 70
1a01 48
```

Listing C.1: Initialisierungs Sequenz der Motherboards

Für die Initialisierung sind im einzelnen folgende Schritte notwendig:

- Zurücksetzen der TDC - Chips durch Schreiben des Wertes 0x0.
- Setzen des INHIBIT - Bits, um den Modus ändern zu können.
- Setzen des Initialisierungs Modus durch Schreiben des Wertes 0x50
- Ausführen der Initialisierung durch Senden des Tokens im Initialisierungs - Modus durch Schreiben des Wertes 0x51.
- Setzen des Modus für adressiertes Schreiben durch 0x48.
- Setzen der Auslese der Steuerregister im Token - Modus durch Schreiben des Wertes 0x6c.
- Ausführen der Auslese der Steuerregister im Token - Modus durch Senden des Tokens indem der Wert 0x6d geschrieben wird.
- Setzen des JTAG - Test - und Programmier - Modus.
- Setzen des Modus für adressiertes Schreiben durch 0x48.

Nach Beendigung dieser Sequenz sind die TDC - Chips bereit für die Aufnahme der Initialisierungs - Informationen, mit denen die Schnittstelle, die Meßkreise sowie die Kanäle konfiguriert werden.

C.3 Setupsequenz

Jeder TDC besitzt 4 Konfigurationsregister, deren Bedeutung in C.1 und C.2 aufgeführt ist.
Die Register des DAC - Chips werden zweimal nacheinander gesetzt. Zunächst auf den höchstmöglichen Wert (0xFF), damit die bei der Initialisierung der TDC - Chips entstandenen Oszillationen in den Eingangsverstärkern unterdrückt werden. Danach werden die tatsächlich gewünschten Werte geschrieben.
Die Umschaltung in den Token - Auslese - Modus erfolgt danach, da dies der Normalzustand des Systems ist, in dem es am wenigsten Strom verbraucht.

```
1884 17     1885 99     1886 1      1887 ff
1888 17     1889 99     188a 0      188b ff
188c 17     188d 99     188e 1      188f ff
1890 17     1891 99     1892 0      1893 ff
1894 17     1895 99     1896 11     1897 ff     18c0 ff     18c0 46
1898 17     1899 99     189a 0      189b ff     18c1 ff     18c1 46
189c 17     189d 99     189e 0      189f ff     18c2 ff     18c2 46     18e1 10
18a0 17     18a1 99     18a2 0      18a3 ff     18c3 ff     18c3 46
                                                                        1ae1 10
1a84 17     1a85 99     1a86 1      1a87 ff     1ac0 ff     1ac0 46
1a88 17     1a89 99     1a8a 0      1a8b ff     1ac1 ff     1ac1 46     1a01 64
1a8c 17     1a8d 99     1a8e 1      1a8f ff     1ac2 ff     1ac2 46
1a90 17     1a91 99     1a92 0      1a93 ff     1ac3 ff     1ac3 46
1a94 17     1a95 99     1a96 11     1a97 ff
1a98 17     1a99 99     1a9a 0      1a9b ff
1a9c 17     1a9d 99     1a9e 0      1a9f ff
1aa0 17     1aa1 99     1aa2 0      1aa3 ff
```

Listing C.2: *Konfigurationsinformationen für die Motherboards. Die vier linken Spalten sind die Konfigurationsinformationen für die TDC - Register. Die zwei nächsten Spalten enthalten die Einstellungen für den DAC - Chip. Die rechte Spalte enthält die Steuerkommandos für den Level 1 - Bus zum Umschalten in den Token - Auslese - Modus.*

Anhang D

TDC - Meßprinzip

D.1 Aufbau des Meßkreises

Abbildung D.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Meßkreises des TDC - Chips. Acht dieser Meßkreise bilden zusammen den Meßkern eines Chips, wobei die Steuerungs - und Ausleselogik nur einmal vorhanden ist. Das Startsignal wird über die Eingangslogik (RS - Flip - Flop) in den Meßkreis eingespeist. Dabei wird gleichzeitig die Spitzenunterdrückung auf das Signal angewandt, wodurch sichergestellt werden soll, daß elektrische Störungen auf der Eingangsseite nicht zu Meßwerten führen.
Das so aufbereitete Signal wird mit dem intern umlaufenden Signal NAND verknüpft. Dadurch wird sichergestellt, daß das Signal der zweiten Flanke nicht im selben Moment in den Meßkreis eintritt, wenn das Signal der ersten Flanke wieder am Eingang angekommen ist.
Danach durchläuft das Signal eine Kette von 14 Invertern, wobei jeder eine Schaltzeit τ besitzt. Am Ende der Kette wird das Signal zum Weiterschalten eines Zählers benutzt und gleichzeitig wieder zum Eingang zurückgeführt. Dadurch ist es möglich, Zeiten größer als $16 \cdot \tau$ zu messen. Paralell zu jedem Eingang eines Inverters wird das Signal auch einem Flip - Flop zugeführt, dessen Status sich bei jedem Durchlauf ändert, da das Signal jeweils mit entgegengesetzter Polarität durch den Meßkreis läuft. Bei Eintreffen des Stop - Signales wird der Status des Zählers ausgelesen und die Position des Signals in der Flip - Flop - Kette ausgewertet.

Die Anordnung der Meßkreise auf dem Substrat des Chips ist unbekannt. Aus der Tatsache, daß die Meßwerte der internen Kalibration für alle Kanäle eines Chips einen konstanten Offset besitzen, der nicht von Temperatur und Versorgungspannung abhängt, kann man aber schließen, daß die Meßkreise auf dem Substrat in einem gleichmäßigen Raster angeordnet sind.

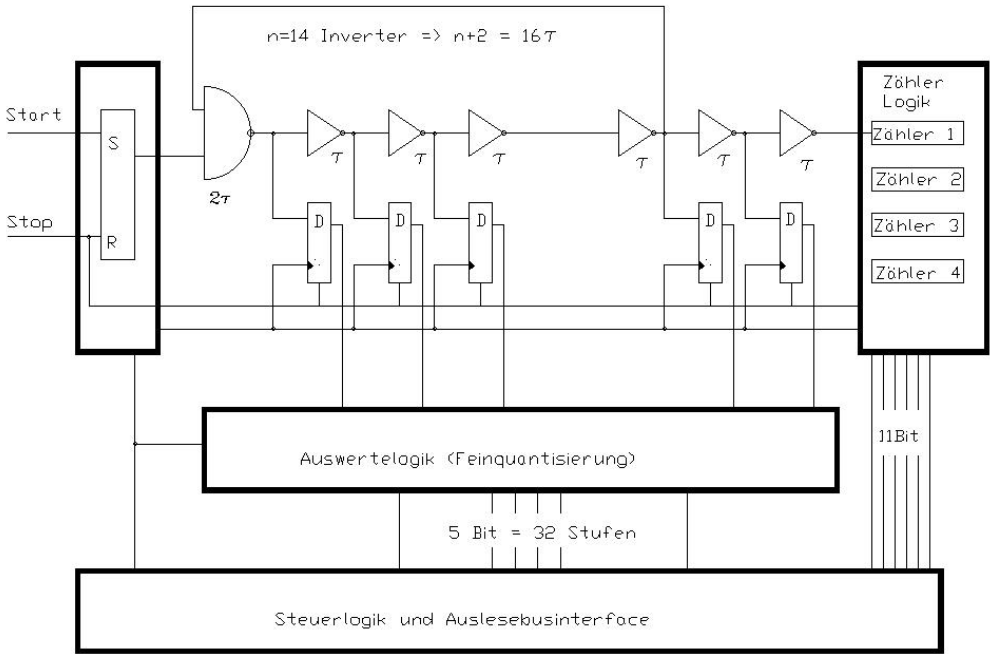

Abbildung D.1: *Aufbau des Meßkreises des TDC - Chips (nach [Git94]).*

D.2 Temperatureinfluß

Die Schaltzeit τ der Inverter ist abhängig von der Temperatur des Substrats. Die Beweglichkeit der Elektronen im Halbleiter erhöht sich mit der Temperatur. Dadurch werden die ladungsträgerfreien Zonen an den Grenzschichten der Transistoren, welche die Inverter bilden, breiter. Infolgedessen ist eine höhere Spannung zum Schalten des Inverters nötig, was zu einer Verlängerung der Schaltzeit τ führt.

Die Temperatur des Subtrats wird bei Aktivität des Chips aufgrund der in jeder Schaltung auftretenden Verlustleistung erhöht. Systematische Studien des Verhaltens der Kalibrierung (siehe [Zum04]) haben gezeigt, daß alle Kanäle auf die Erwärmung gleich reagieren. Dies ist auch dann der Fall, wenn nur ein einziger Kanal aktiv ist. Daraus kann der Schluß gezogen werden, daß nicht die Aktivität des Meßkreises die Hauptursache der Erwärmung des Chips ist, sondern die Schnittstelle zur Auslese. Da diese nach jedem Ereignis aktiviert wird, sollte die Erwärmung nur von der Triggerrate abhängen.

Glossar

A

Akzeptanz (Akzeptanz) Als **geometrische** A. bezeichnet man den von einem Detektor abgedeckten Raumwinkel in polarer und azimuthaler Richtung in Bruchteilen von 4 π.

Asynchronouse Transfer Mode (ATM) Eine Methode zur dynamischen Belegung von Bandbreite auf einem Übertragungsmedium, bei der Pakete einer festen Größe verwendet werden.

B

Busy (Busy) Signal, das anzeigt, daß das System mit der Abarbeitung eines Triggers beschäftigt ist. Für jeden der beiden Triggerlevel gibt es ein eigenes B. Signal.

C

Central Trigger Unit (CTU) Zentrale Triggereinheit. VME - Modul, daß die Trigger im HADES - System verwaltet.

Čherenkov - Licht (Čherenkov - Licht) Čherenkov - Licht entsteht beim Durchflug eines Teilchens durch Materie, wenn die Geschwindigkeit des Teilchens größer ist als die Lichtgeschwindigkeit in der Materie.

Chip - Select Mode (CS - Mode) Modus, in dem durch Adressierung jeder Chip am Bus direkt angesprochen werden kann; wird während der Initialisierung und während der Kalibrierung verwendet. Ansonsten befindet sich der Level 1 -Bus im → "Token - Modus".

clock noise (clock noise) Störsignale, die durch den 5 MHz - Taktgenerator erzeugt werden, der zum Betrieb der Logik des CPLD - Chips und der Datenübertragung der TDC - Chips benötigt wird. Der hochfrequente Anteil des Rechtecksignales wird von der Leitung auf dem Motherboard wie durch eine Sendeantenne abgestrahlt und von den FPC - Kabeln eingefangen.

Common Or (COR) Signal, das anzeigt, daß mindestens ein Kanal einer Kammer ein Signal sieht. Es wird durch eine ODER - Verküpfung aller digitalen Ausgangssignale erzeugt. Dies geschieht mehrstufig: im ersten Schritt für die 16 Kanäle eines Daughterboards, danach für die bis zu 6 Daughterboards auf einem Motherboard. Das Signal wird über die Level 1 - Busse zu den ROC's geleitet, wo die Signale der beiden Busse verknüpft werden; auf dem Konzentrator - Modul findet letztendlich die Verknüpfung der Signale der ROC's statt. Das Signal kann z.B. verwendet werden, um die Ausleseelektronik zu triggern (sog. Selftriggering).

common stop noise (common stop noise) Störsignale die durch die Übertragung des Common Stop Signales auf dem Motherboard entstehen. Sie werden von der Leitung wie von einer Sendeantenne abgestrahlt und koppeln über die FPC - Kabel in die Analoglektronik ein.

Common - Stop - Signal (CMS) Signal, das relativ zum Globalen Hades Startsignal verzögert ist und zum Anhalten der Zeitmessung in den TDC - Chips verwendet wird.

Complex Programable Logic Device (CPLD) Komplexer programmierbarer Logik - Chip. Moderne Form von programmierbaren Logikbausteinen, die immer wieder neu programmiert werden können. Es gibt Bausteine, die ihre Programmierung auch über eine Abschaltung der Versorgungsspannung hinaus behalten, und solche, die jedesmal neu programmiert werden müssen.

Concentrator (HACON) Modul zur Umsetzung des lokalen Auslesebusses der Read - Out - Kontroller auf den GTB - Bus.

D

Data Summary Tape (DST) Data Summary Tapes werden aus den Rohdaten erstellt und sind in der Regel eine komprimierte Form der Daten, in denen nur Ereignisse mit einer bestimmten Charakteristik enthalten sind.

Daughterboard (DBO) Tochterplatine: Analogelektronik zur Aufbereitung der Driftkammersignale zur Verarbeitung mit den TDC - Chips.

Detector Trigger Unit (DTU) VME - Modul, das die Signale des globalen Triggerbusses auf den lokalen Triggerbus umsetzt.

Digital - Signal - Processor (DSP) Digitaler Signal Prozessor. Prozessor, der für die Bearbeitung digitaler Signale optimiert ist.

Digital to Analog Converter (DAC) Erzeugt eine Ausgangsspannung proportional zu einem Zahlenwert in einem Register.

Direct Memory Access (DMA) Datenübertragungsmodus, bei dem das Modul die Daten aus seinem Speicher ohne CPU - Belastung selbständig in den Speicher der CPU überträgt.

Drell - Yann - Prozess (Drell - Yann - Prozess) Elektromagnetischer Prozess, in dem ein Quark - Antiquark - Paar von einem Paar wechselwirkender Hadronen vernichtet wird um ein Leptonenpaar zu bilden.

Dual - Ported - Ram (DPRAM) Speicher mit zwei unabhängigen Daten - und Adressbussen. Dadurch ist der gleichzeitige Zugriff auf zwei unterschiedliche Adressen möglich.

F

First in, First out (FIFO) Speicher, der beim lesenden Zugriff das älteste Element zurückliefert.

Flexible Printed Circuit (FPC) Gedruckte Schaltung auf flexiblem Material. Meistens als Verbindung zwischen Teilen einer Schaltung verwendet, die auf unterschiedlichen Platinen untergebracht sind.

Front - End - Elektronik (FEE) Elektronik, welche die erste Stufe der Signalverarbeitung innerhalb eines Systems enthält.

G

GARFIELD (GARFIELD) Simulationsprogram für Gasdetektoren. Siehe http://consult.cern.ch/writeup/garfield.

Geräte Treiber Bus (GTB) Bus - System für die Komunikation über größere Entfernungen.

Gunning Transceiver Logic (GTL) Ein Standart für Signale in CMOS - Logik der eine höher Datenübertragungsgeschwindigkeit erlaubt. Das GTL - Signal wechselt zwischen 0,4 und 1,2 Volt. Aufgrund des geringen Spannungswechsels(0,4 Volt), der nötig ist, um zwischen den Zuständen An und Aus umzuschalten, wird GTL auch als Niederspannungs - Logik - Signal bezeichnet. Aufgrund der Signalspannung von maximal 1,2 Volt fallen am Abschlußwiderstand der Signalleitung nur geringe Verlustströme an. Daraus resultieren hohe Schaltfrequenzen und geringe elektromagnetische Störfelder.

I

Invariante Masse (invariante Masse) Masse, die aus der Rekonstruktion der Zerfallsprodukte eines Teilchens anhand von Masse und Impuls dieser Produkte bestimmt wird. Sie wird nach folgender Formel berechnet:

$$m_{inv}^2 = \sum E_i^2 + \sum \vec{p}_i^2 \tag{D.1}$$

Dabei ist E_i die Energie des Teilchens i und $\vec{p}_i$ der Impuls des Teilchens i.

J

Joint Test Action Group (JTAG) IEEE Standard 1149.1, definiert, wie die Signale eines Chips auf einem Board über ein serielles Protokoll gesteuert werden können. Dient zum Test von Logikbausteinen und zum Test von Verbindungen zwischen Bausteinen. Alle Eingänge und Ausgänge eines JTAG - fähigen Chips sind mit Puffern versehen, deren Status in der Art eines Schieberegisters geschrieben, respektive gelesen werden kann.

L

Level 1 - Bus (LVL1) Bus für die Übertragung der Daten, die durch den Level 1 - Trigger digitalisiert wurden.

Low voltage differential signal (LVDS) Methode zur differentiellen Signalübertragung bei niedrigen Spannungen.

M

Motherboard (MBO) Mutterplatine : enthält die TDC - Chips, die die Zeitmessung vornehmen.

Multiwire Driftchamber (MDC) Vieldraht - Driftkammer; Ortsauflösender Gasdetektor.

P

PRE - SHOWER (PRE - SHOWER) Im SHOWER - Detektor erfolgt der Nachweis von Leptonen über die charakteristische Schauerbildung beim Durchqueren von Bleiplatten mit 1,4 cm Dicke.

Q

Qualitätskontrolle (QC) Laufende Überprüfung von Produktions- und Fertigungsprozessen im Hinblick auf die einheitliche Qualität der Erzeugnisse und die Verringerung von Ausschuß.

Quanten - Chromo - Dynamik (QCD) Theorie zur Beschreibung der starken Kraft, die für die Vorgänge im Nukleon zuständig ist.

Quark - Confinement (Quark - Confinement) Quark - Einschluß : in der Natur lassen sich keine freien Quarks beobachten. Sie sind immer zu mehreren (mindestens 2) zusammengebunden. Dieser Effekt wird als Quark - Einschluß bezeichnet.

Quark - Gluonen - Plasma (QGP) Zustand hoher Dichte und Temperatur, in dem Quarks als frei angesehen werden.

Quarks (Quarks) Das Quark ist im Standardmodell der Elementarteilchenphysik das kleinste, nicht mehr teilbare Teilchen.

R

Read - Out - Controller (ROC) Auslese - Modul für die Motherboards der Driftkammern.

Ring Imaging Čherenkov (RICH) Ring - Abbildender - Čherenkov - Detektor; liefert aufgrund seiner Geometrie eine Winkelinformation über die Teilchenbahn.

ROOT (ROOT) Softwareframework zur grafischen Darstellung von Daten. (Siehe http://root.cern.ch).

S

Sekundärelektronenvervielfacher (Sekundärelektronenvervielfacher) Detektor zum Nachweis von Photonen. Sie bestehen aus einer Primärelektrode, aus der beim Auftreffen eines Photons Elektronen herausgelöst werden. Diese Elektronen werden durch ein elektrisches Feld auf eine weitere Elektrode hin beschleunigt, aus der sie wiederum Elektronen auslösen. Da ihre Energie beim Auftreffen auf die Elektrode größer ist als die Energie, die nötig ist, ein einzelnes Elektron freizusetzen, werden in der Regel mehrere Elektronen pro auftreffendem Elektron freigesetzt. Durch Kaskadierung mehrerer Elektroden wird die Anzahl an Elektronen sukzessive bis zur Nachweiselektrode erhöht.

Self - Quenching - Streamer - Mode (Self - Quenching - Streamer - Mode) Betriebsmode für Gasdetektoren, bei dem die erzeugte Ladungsmenge unabhängig vom Energieverlust des auslösenden Teilchens ist.

Slow - Control - System (Slow - Control - System) System zur Steuerung und Überwachung von Parametern, die sich nur langsam verändern. Im Rahmen von HADES wird hierfür das EPICS - System eingesetzt.

Statemaschine (Statemaschine) Code der zur Abarbeitung von verschiedenen Zuständen dient.

Statischer Speicher (SRAM) Statischer Speicher mit wahlfreiem Zugriff.

Steuerungs - und Auslese - Modul (SAM) Interfacemodul zwischen VME - und GTB - Bus. Formatiert die Daten der Driftkammern im HADES - Subeventformat und stellt sie zur Auslese bereit.

Strahlungslänge (Strahlungslänge) Die Strahlungslänge ist die Weglänge, die ein Elektron in Materie zurücklegt bis seine Energie auf $\frac{1}{e}$ abgesunken ist.

Sub - Event - Builder (Sub - Event - Builder) Einheit, die die Daten eines Teilsystems zu einem Datenblock zusammenfügt, der dann eingesammelt und mit denen der anderen Teilsysteme zusammengefügt wird.

Surface mounted device (SMD) Oberflächenmontiertes Bauteil. Elektronisches Bauteil, dessen Bauform eine sehr geringe Höhe der Schaltung ermöglicht.

T

Time above threshold (TAT) Zeit oberhalb der Schwelle. Aus der Differenz der beiden gemessenen Driftzeiten einer Driftzelle bestimmte Zeitspanne, für die das Signal die am Schwellendiskriminator eingestellte Schwelle überschritten hat. Aus dieser Information läßt sich eine Aussage darüber treffen, ob es sich möglicherweise um einen Doppeltreffer gehandelt hat.

Time of flight (TOF) Flugzeit Detektor. Detektor zur Bestimmung der Flugzeit eines Teilchens. Die Flugzeit wird gemessen durch Bestimmung der Zeit die nach einer Reaktion im Target vergeht bis ein Teilchen im Detektor eintrifft. wegen der notwendigen hohen Zeitauflösung kommen meistens Plastikszintilatoren zum Einsatz.

Time - projection - chamber (TPC) Zeit - Projektions - Kammer : Detektor, der die Spuren von Teilchen aufzeichnet, und eine zusätzliche Information über die dritte Dimension durch die Driftzeit liefert.

Time to Digital Converter (TDC) Digitaler Schaltkreis zur Zeitmessung. Es wird der Zeitabstand zwischen zwei Signalen gemessen.

Token - Modus (Token - Modus) Auslese Modus, der durch ein Signal, das von Modul zu Modul weitergereicht wird, gesteuert ist. Jedes Modul schickt erst dann das Token weiter, wenn es mit seiner Aufgabe fertig ist. Dieser Mode wird zur Auslese der TDC - Chips und der ROC - Module verwendet.

Totzeit (Totzeit) Zeit während der das Triggersystem nicht in der Lage ist einen weiteren Trigger zu akzeptieren.

Transistor - Transistor Logik (TTL) Halbleitertechnologie zum Bau von diskreten, digitalen integrierten Schaltkeisen. Diese Bauteile verwenden einen Signalhub von ≤ 2 Volt, um den Unterschied zwischen wahr und falsch zu kennzeichnen. Der Pegel für falsch liegt uner 2,5 Volt, und der für den Zustand wahr oberhalb von 4,5 Volt.

Trigger - Receiver (DTR) Trigger - Empfänger. Der Trigger - Empfänger leitet die Triggerinformation vom lokalen MDC - Triggerbus an die Read - Out - Kontroller weiter.

V

Versa Module Europ (VME) Verbreiteter Standard (IEEE 1014) zur Verbindung von Elektronikmodulen.

Literaturverzeichnis

[Alv03] Alvarez Pol, Hector. *On the Multiwire Drift Chambers alignment of the HADES dilepton spectrometer*. Dissertation, Universidade de Santiago de Compostela, 2003. 6.1, 6.2, 6.2.2

[Ber99] Berdermann, E. et al. CVD - Diamond Detectors - Status Report. *GSI - Sientific Report*, page 172, May 1999. 6.3.2

[Bie04] Bielcik, Jaroslav. *Dilepton Spektroskopie with HADES*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2004. 3.2

[Bö99] Böhmer, M., Münch, M. *A summary of the HADES trigger codes*, Juni 1999. http://www-hades.gsi.de/daq/triggercodesMB.html. 4.4

[Bra96] Bratkovskaya, E.L., Cassing, W., Mosel, U. Dilepton anisotropy from p + be and ca + ca collisions at bevalac energies. *Phys. Lett.*, B(376):12ff, 1996. 2.3, 2.2.1

[Bra98] Bratkovskaya, E.L., Cassing, W., Rapp, R., Wambach, J. Dilepton Production and m_T - scaling at BEVALAC/SIS energies. *Nucl. Phys.*, A(643):168ff, 1998. 2.2.2

[Bra99] Bratkovskaya, E.L., Ko, C. M. Low-mass dileptons and dropping rho meson mass. *Phys. Lett.*, B(445):265ff, 1999. 2.2.2

[Bro91] Rho, Mannque Brown, G. E. Scalling effective lagrangians in a dense medium. *Phys. Rev. Lett.*, 66(21):2720ff, 1991. 2.2.2

[Cas99] Cassing,W. Bratkovsaya,E.L. Hadronic and electromagnetic probes of hot and dense nuclear matter. *Phys. Rep. 308*, page 65ff, 1999. 2.1

[Dam02] Damjanovič, Sanja. *Electron - Pair Production in Pb + Au Collisions at 40 AGeV*. Dissertation, Rupprecht - Karls - Universität Heidelberg, 2002. 2.6

[ea02] M. Aguilar Benitz et al. *Particle Physics Booklet*. AIP, 2002. 2.1, 2.1

[Ebe04] Eberl, T. *Untersuchung π^0 Mesonen induzierter e^+ e^- - Paare in $C+C$ Stößen.* Dissertation, Technische Universität München, 2004. 3.1.2

[epi] Experimental Physics and Industrial Control System. http://www.aps.anl.gov/epics. 4.6.1

[Ern98] Ernst, C., Bass S.A., Belkacem, M., Stöcker, H., Greiner, W. Intermediate mass excess of dilepton production in heavy ion collisions at relativistic energies. *Phys. Rev.*, C(58):447ff, 1998. 2.2.2

[Fab03] Fabietti,L. *Study of the e^+ e^- pair acceptance in the dilepton spectrometer HADES.* Dissertation, Technische Universität München, 2003. 3.1.2

[Gar03] Garcia, Manuel Sanchez. *Momentum Reconstruction and Pion Produktion Analysis in the HADES Spectrometer at GSI.* Dissertation, Universidade de Santiago de Compostela, 2003. 6.3

[Git94] Gitzel, P. Entwicklung und Erprobung von Software zur Auslese und Steuerung des TDC2001 Systems. Diplomarbeit, Institut für Kernphysik Johannes Gutenberg - Universität Mainz, 1994. 5.2.2, D.1

[Gle96] Gleichmann, Fa. *Funktionsbeschreibung für den HADES Drift Chamber TDC*, September 1996. 4.5, 4.2.2, 5.2.2

[Her01] Hering, G. *Dielectron Production in Heavy Ion Collisions at 158 GeV/c per Nucleon.* Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2001. 2.5

[Hof97] Hoffmann, J. *Steuerungs und Auslese Modul.* GSI, November 1997. B.3

[Hof98a] Hoffmann, J. *HAMOT1 Users Manual.* GSI, July 1998. 4.1, B.1

[Hof98b] Hoffmann, J. *HAROC2 Manual.* GSI, July 1998. B.2, C.4, C.5

[Hof02] Hoffmann, J. *Steuerungs und Auslese Modul.* GSI, Juli 2002. 4.8, B.4

[Hof03] J. Hoffman, 2003. 4.6, 4.7

[Kol] Kolb, B. Münch, M. Koenig, W. *HADES DAQ basic prinziples.* 4.7.2, 4.7

[Lin] Erik Lins. DTU. 2.4, 3.6

[Lin01] Lins, E. *Entwicklung eines Auslese- und Triggersystems zur Leptonenidentifizierung mit dem HADES-Flugzeitdetektor.* Dissertation, Justus Liebig Universität, Giessen, 2001. 3.4, 4.2.7, 4.9, 4.4

[Lip00] Lippmann, Christian. Aufbau und Inbetriebnahme eines Gasqualitätsmonitors für die HADES Driftkammern. Diplomarbeit, Johann Wolfgang Goethe - Universität, 2000. 3.9

[Mar04a] Markert, J. Dissertation, Institut für Kernphysik der Johann Wolfgang Goethe - Universität in Frankfurt am Main, 2004. 3.2, 5.2, 5.3.1, 5.3.1, 6.2.1, 6.3, 7.1

[Mar04b] Markert, Jochen, 2004. 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 6.14, 6.15

[Mü03] Müntz, Christian, 2003. 4.3

[Mue02] Muench, Mathias. *Das Datenaufnahmesystem für das Elektronenpaar-Spektrometer HADES*. Dissertation, Technische Universität München, 2002. 4.5.3

[Nau88] Naudet,C. et al. Threshold behavior of electron pair production in p-be collisions. *Phys. Rev. Lett.*, 62(23):2652ff, 1988. 2.2, 2.2

[New93] Newcomer, F.M. A Fast Low Power, Amplifier - Shaper - Discriminator for High Rate Straw Tracking Systems. *IEEE Transactions on Nuclear Sience*, 40(4), August 1993. 4.2.1

[Otw04] Otwinowski, Jacek, 2004. 7.3

[Pac03] Pachmayer, Yvonne C. Eichung der HADES Driftkammern mittels Myonen aus der kosmischen Höhenstrahlung. Diplomarbeit, Johann Wolfgang Goethe - Universität, 2003. 3.2, 4.2, 6.1

[Pac04] Pachmayer, Yvonne C., 2004. 6.3

[Pec04] Pechenov, Vladimir, 2004. 6.9

[Por97] Porter, R.J., et al. for the DLS Collaboration. Dielectron crossection measurements in nucleus - nucleus reactions at 1.0 aġev. *Phys. Rev. Lett.*, 79(7):1229ff, 1997. 2.2, 2.2.1, 2.2.2

[Por98] Porter, R.J. et al. Dielectron producton in a - a reactions at 1.0 a gev. *Nuclear Physics*, A(638):499c – 502c, 1998. 2.4

[Rap00] Rapp, R. Wambach, J. Chiral symmetry restoration and dileptons in relativistic heavy-ion collisions. In *Adv.Nucl.Phys.* Elsevier Inc., 2000. 2.1

[Roc88] Roche, G., et al. First observation of dielectron production in proton-nucleus collisions below 10 gev. *Phys. Rev. Lett. 61*, 61:1069ff, 1988. 2.2

[Roc89a] Roche, G. et all. Dielectron Production in Ca + Ca Collisions at 1.0 and 2.0 A GeV. *Phys. Lett. B*, 226(4):228, 1989. 2.2.2

[Roc89b] Roche,G. Dielectron production in ca+ca collisions at 1.0 and 2.0 a gev. *Phys. Lett.*, B(229):228ff, 1989. 2.2

[Rus03] A. Rustamov, 2003. 3.3

[S.A98] S.A. Bass et al. Micoscopic Models for Ultrarelativistic Heavy Ion Collisions. *Prog. Part. Nucl. Phys.*, 41:225, 1998. 2.2.2

[Sad04] Sadovski, Alexander, 2004. 5.17, 5.18, 5.19, 5.20

[Sak60] Sakurai, J. Currents and mesons. *Ann. Phys*, 11(1), 1960. 2.1

[Sal03] Salabura, Piotr. *Vector Mesons in strongly interacting matter*. Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, 2003. 2.1

[Sch95] Schön, H. *HADES, Ein Dielektronenspektrometer hoher Akzeptanz für relativistische Schwerionenkollisionen*. Dissertation, Institut für Kernphysik der Johann Wolfgang Goethe - Universität in Frankfurt am Main, 1995. 1, 6, 3.2

[Ste97] Steigerwald, A. Aufbau und Betrieb eines Silizium - Mikrostreifen - Detektor - Systems zu Testmessungen am HADES - Driftkammer - Prototypen. Diplomarbeit, Institut für Kernphysik Johann Wolfgang Goethe - Universität Frankfurt am Main, 1997. 6.3.2

[Sud04] Sudol, Malgorzate, 2004. 7.3

[Toi04] Toia, Alberica. *Performance of the HADES Spectrometer for Dilepton Identification in the Reaction $C+C$ at 1 - 2 $AGeV$*. Dissertation, Justus Liebig Universität Gießen, 2004. 4.4

[Ver77] Vermeen, Rob. A Driftchamber simulation program, 1977. 6.3.1

[Wei94] Weise, Wolfram. *Proceedings of the Workshop on Dilepton Production in Relativistic Heavy Ion Collisions*, page 22, 1994. 2.1

[Wes03] Wessels, Johannes P. Latest Results from CERES / NA45. *Nucl. Phys*, A(715):262 – 271, 2003. 2.7, 2.8

[Win93] Winckelmann, L. et al. *Phys. Lett. B298(1993) 22*, 1993. Nato Advanced Study, Bodrum 1993. 2

[Wol93] Wolf, G., Bartkovskaya, E. L., Mosel, U. Eta and dilepton production in heavy-ion reactions. *Nucl. Phys.*, A(552):549ff, 1993. 2

[Wü97] Wüstenfeld, J. Untersuchungen zum Konzept der HADES - Driftkammerauslese und Test der TDC - Prototypkarte. Diplomarbeit, Johann Wolfgang Goethe - Universität, Frankfurt, 1997. 5.2, 5.2.2, 5.2.2, C.1, C.2

[Yeg90] Yegneswaran, A. The dileptonspektrometer. *Nuclear Instruments and Methodes in Physics Research*, A(290):61, 1990. 2.2

[Zen97] Zentek, A. Konzeptionelle Untersuchungen für die HADES Driftkammern am Prototyp 0. Diplomarbeit, Institut für Kernphysik Johann Wolfgang Goethe - Universität Frankfurt am Main, 1997. 3.2

[Zum04] Zumbruch, P. Dissertation, Institut für Kernphysik der Technischen Universität Darmstadt, 2004. 5.2.2, 6.2.1, D.2

Danksagung

Mein herzlicher Dank geht an all diejenigen, die diese Arbeit mit ihrem Interresse und ihrer Initiative unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Stroebele, der mir durch die Aufnahme in die HADES - Arbeitsgruppe am IKF die Durchführung dieser Arbeit möglich gemacht hat. Die vielen Diskussionen mit ihm haben insbesondere in der Schlußphase entscheidend zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Herr Privat Dozent Dr. J. Stroth hat mir durch die Integration in die HADES - Driftkammergruppe an der GSI und durch sein Interresse an der Arbeit auch in schwiergen Phasen mich ermuntert, weiterzumachen. Dafür gilt ihm mein Dank.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen aus dem "Doktoranden - Zimmer" an der GSI, die mit vielen Diskussionen zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Hilfreich waren auch die Diskussionen mit C. Müntz und C. Sturm, dem auch mein besonderer Dank für das kritische Lesen der Arbeit gilt.

Für die freundliche Überlassung von Bildmaterial danke ich Y. C. Pachmayer, M. Sudol, J. Markert, J. Otwinowski A. Rustamov, A. Sadovski und V. Pechenov.

Mein Dank gilt aber auch allen nicht namentlich erwähnten Mitgliedern der HADES - Kollaboration, die zum Gelingen der verschiedenen Experimente beigetragen haben.

Mein Dank gilt auch J. Hoffmann von der Abteilung DVEE der GSI, der nicht nur das entwickelte Auslesekonzept in Hardware umgesetzt hat, sondern mich auch bei der Integration der Komponenten in das HADES - Auslesesystem unterstützt hat.
Die Erstellung der DSP - Programme für die SAM - Module wäre ohne die Unterstützung von W. Ott nicht möglich gewesen.

Zum Schluß gilt mein besonderer Dank meinen Eltern, ohne deren Unterstützung diese Arbeit nicht Wirklichkeit geworden wäre.

DANKE!

Lebenslauf

Jörn Wüstenfeld	
Geboren	16. 03. 1969
Grundschule	1975 - 1979
Förderstufe	1979 - 1981
Gymnasium	1981 - 1989
Abgeschloßen mit Abitur	1989
Zivildienst	10 / 1989 - 12 / 1990
Anschließend sechs Monate geabeitet an selber Stelle	1 / 1991 - 6 / 1991
Studium Diplom Physik	
Johann Wolfgang Goethe - Universität	1991 - 1998
Diplom bei Prof. Bethge	
Studium Promotion Physik	
Johann Wolfgang Goethe - Universität	1999 - 2004
Bei Prof. Stroebele	