Fakultät für Physik und Astronomie

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Diplomarbeit
im Studiengang Physik

vorgelegt von
Sebastian Hausmann
aus Hamburg

Januar 1995

Entwicklung des Steuer- und Kontrollsystems für die Rückwärts Driftkammer (BDC) des H1-Detektors und experimentelle Untersuchungen von Kammerprototypen

Die Diplomarbeit wurde ausgeführt von Sebastian Hausmann
am Physikalischen Institut der Universität Heidelberg
unter der Betreuung von Prof. F. Eisele

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung **1**

2. HERA und der H1-Detektor **2**
2.1 Der HERA-Speicherring 2
2.2 Der H1-Detektor 7

3. Die Backward Drift Chamber (BDC) **9**
3.1 Die Aufgaben der BDC 9
3.2 Driftkammerphysik 11
3.3 Der Aufbau der BDC 16
3.3.1 Übersicht 16
3.3.2 Der mechanische Aufbau der BDC 20
3.3.2.1 Der Randbereich 24
3.3.2.2 Die Hochspannungsversorgung 25
3.3.2.3 Die Numerierung der Oktanten und der zugehörigen BDC-Kabel 28
3.3.2.4 Die BDC-Prototypen 29
3.3.3 Die Analogelektronik der BDC 30
3.3.3.1 Die Verstärkerkette 31
3.3.3.2 Der FADC 1001 34
3.3.3.3 Das Turntable 35
3.3.3.4 Die Auslese der FADCs 38
3.3.3.5 Temperatur- und Kettenstrommessung 38
3.3.4 Die Digitalelektronik der BDC 39
3.3.4.1 Die Pipelines und das WDMB 40
3.3.4.2 Die Steuerung der Digitalauslese 43
3.3.4.3 Der Test der Digitalelektronik 43
3.3.5 Das Crate-Layout im Elektronikwagen 44

4. Überwachung von Hochspannung und Strömen **46**
4.1 Aufgaben 46
4.2 Das Hochspannungssystem CAEN SY127 47
4.3 Das Programm *HVControl 2.0* 49
4.3.1 Die Benutzeroberfläche 49
4.3.2 Das Zustandsdiagramm von *HVControl 2.0* 52
4.3.3 Die Installation von *HVControl 2.0* und die Datei *HVControl.Init* 55
4.3.4 LabVIEW: Ein graphikorientiertes Programmiersystem 56
4.3.4.1 Allgemeines 56
4.3.4.2 Programmieren unter LabVIEW 57
4.3.4.3 Die Einbindung von C-Programmen (CIN) 58
4.3.5 Aufbau und Module des Programms *HVControl 2.0* 60

5. Tests mit den Prototypen II und IIa **65**
5.1 Tests mit dem Prototypen IIa in Heidelberg 65
5.2 Tests mit dem Prototypen II bei H1 69

6. Test der Feldformungs-Elektroden **75**
6.1 Effizienz im Randbereich 75
6.2 Messung der Effizienz 77
6.3 Ergebnis 80

7. Test der BDC **82**

8. Diskussion der Ergebnisse und Ausblick **84**

9. Anhang **85**
9.1 Ansteuerung des HV-Geräts: Ein Beispiel 85
9.2 Anleitung HVControl 2.0 90
9.3 Wichtige VIs 97
9.3.1 Semaphore 97
9.3.2 WriteInitString/ReadInitString 99

10. Literatur- und Quellenverzeichnis **101**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 Speicherring HERA am DESY 2
Abbildung 2.2 Feynmandiagram für NC- und CC-Streuung und für Photon-Gluon-Fusion 4
Abbildung 2.3 Anordnung der Elektronen- und Protonen-Bunches bei HERA 4
Abbildung 2.4 Integrierte Luminosität von HERA 5
Abbildung 2.5 Der Aufbau des H1-Detektors 7
Abbildung 2.6 Der Elektrontagger und der Photonendetektor im Tunnel von HERA 8

Abbildung 3.1 Der innere Bereich von H1 9
Abbildung 3.2 Der innere rückwärtige Bereich von H1 nach dem Upgrade 10
Abbildung 3.3 Mittlerer Energieverlust durch Ionisation für geladene Teilchen in einem Argon-Methan-Gasgemisch 11
Abbildung 3.4 Landau-Verteilung für den Energieverlust von 250 MeV Elektronen in 1 cm gasförmigem Argon 12
Abbildung 3.5 Zeitliche Entwicklung der Lawine in der Nähe des Anodendrahtes 14
Abbildung 3.6 Das elektrisches Feld in einer Driftkammer 15
Abbildung 3.7 Geometrie zur Auflösung der Rechts-Links-Ambiguität in einer Driftkammer 15
Abbildung 3.8 Prinzipieller Aufbau der BDC 16
Abbildung 3.9 Untergrundrate in der BDC als Funktion des Radius (Monte Carlo Simulation) 17
Abbildung 3.10 Bestimmung des Ereigniszeitpunktes mit Zweidrahtsummen 18
Abbildung 3.11 Schnitt durch die BDC 19
Abbildung 3.12 Die BDC im geöffneten Zustand 20
Abbildung 3.13 Containermodul mit vier Wiremodulen und Driftzellen 21
Abbildung 3.14 Schnitt durch einen Oktanten in Drahtrichtung gesehen 22
Abbildung 3.15 Das Wiremodul 23
Abbildung 3.16 Ineffizienz im Randbereich und tote Zone aufgrund des Lorentzwinkels 24
Abbildung 3.17 Die Randplatine vor der Seitenplatine 25
Abbildung 3.18 Prinzipskizze der Hochspannungsversorgung für die Driftzellen 26
Abbildung 3.19 Der Hochspannungsteiler 27
Abbildung 3.20 Numerierung der Oktanten und der zugehörigen Kabel 28
Abbildung 3.21 Die Signale der gestrichelt dargestellten Drähte, werden analog addiert. 30
Abbildung 3.22 Die Verstärkerkette 32
Abbildung 3.23 Die Kabel vom Detektor zum Elektronikwagen mit Signal- und Hochspannungsleitungen 33
Abbildung 3.24 Nichtlineare Kennlinie des FADCs [Wil94] 34
Abbildung 3.25 Basisplatine des Turntables; oben: Rückseite, unten: Vorderseite 36
Abbildung 3.26 Übersicht Turntable 37
Abbildung 3.27 Steckverbindungen für Temperatur- und Kettenstrommessung 38
Abbildung 3.28 Prinzip der Digitalauslese 39
Abbildung 3.29 Schaltplan der WDMBs 41
Abbildung 3.30 Verbindung der WDMBs untereinander 42
Abbildung 3.31 Busverbindung für die WDMBs 43
Abbildung 3.32 Übersicht über das VME-Crate-Layout 44
Abbildung 3.33 Anordnung der Komponenten in den Schränken des Elektronikwagens 45

Abbildung 4.1 Verlauf des Hochfahrens der Hochspannung 46
Abbildung 4.2 Aufbau und Ansteuerung des HV-Geräts 47
Abbildung 4.3 Verwendung des Trip-Kontaktes 48
Abbildung 4.4 Frontpanel von *HVControl 2.0* 49
Abbildung 4.5 Zustandsdiagramm von HVControl 2.0 54
Abbildung 4.6 Die Datei *HVControl.Init* 55

Abbildung 4.7 Beispiele für Controls und Indicators 56
Abbildung 4.8 Front Panel und Block Diagram von *MinMax1* 57
Abbildung 4.9 Front Panel und Block Diagram von *MinMax2* 58
Abbildung 4.10 C-Code des Beispielprogramms *MinMax2* 59
Abbildung 4.11 Struktur der Programmbibliothek zur Ansteuerung des HV-Geräts 63

Abbildung 5.1 Ein Oktant der Prototypen II und IIa 65
Abbildung 5.2 Der Aufbau für den Prototyp-Test 66
Abbildung 5.3 Testaufbau der Digitalauslese 67
Abbildung 5.4 Inhalt der Pipelines der WDMBs 68
Abbildung 5.5 Prototyp II in seiner Testposition im H1-Detektor 69
Abbildung 5.6 Ereignisrate in drei Oktantenlagen während eines HERA-Runs 70
Abbildung 5.7 Addition der Zähldrahtsignale beim Prototypen II 71
Abbildung 5.8 Drei typische Pulse in den FADCs während eines HERA-Runs 71
Abbildung 5.9 Histogramm der Ereignisse in den Analogkanälen 72
Abbildung 5.10 Pulshöhenspektrum in FADC-Einheiten 72
Abbildung 5.11 Histogramm der Inhalte der Digitalkanäle 73
Abbildung 5.12 Inhalt der Pipelines (Occupancy) 74

Abbildung 6.1 Feldverlauf in den großen Zellen des Prototyps I (keine Randelektroden) 75
Abbildung 6.2 Feldverlauf in einer großen BDC-Zelle mit Feldformung am Sektorrand 76
Abbildung 6.3 Effizienz im Randbereich großer Zellen 77
Abbildung 6.4 Anordnung der Oktanten 78
Abbildung 6.5 Trigger- und Ausleseelektronik für den Test der Randelektroden 79
Abbildung 6.6 Effizienz im Randbereich großer Zellen mit Randelektroden 81

Abbildung 7.1 Test der BDC-Oktanten 82

Abbildung 9.1 Frontpanel zum Beispielprogramm aus Abbildung 9.2 86
Abbildung 9.2 Beispielprogramm zur Ansteuerung des Hochspannungsgeräts 87
Abbildung 9.3 Das VI *Create SY127 Address* 88
Abbildung 9.4 Das VI *Call SY127* 88
Abbildung 9.5 Das VI *Select Channel* 89
Abbildung 9.6 Das VI *SetV0* 89
Abbildung 9.7 Das VI *ReadV0* 89
Abbildung 9.8 Verwendung von Semaphoren unter LabVIEW 97
Abbildung 9.9 Beispiel für eine Init-Datei 99
Abbildung 9.10 Anschlußfeld des VIs *WriteInitString* 99
Abbildung 9.11 Anschlußfeld des VIs *ReadInitString* 100

1. Einleitung

Am DESY in Hamburg wird am Speicherring HERA die Struktur von Elementarteilchen untersucht. Dazu werden Elektronen und Protonen beschleunigt und zur Kollision gebracht. Die mögliche Streuung der Teilchen wird vom H1-Detektor beobachtet. Für diesen Detektor läuft ein Upgrade-Programm, in dem Subdetektoren ausgetauscht und zusätzliche Subdetektoren installiert werden. Einer dieser neuen Subdetektoren ist die *Rückwärts Driftkammer* (BDC).

Die BDC wurde am Physikalischen Institut der Universität Heidelberg entwickelt und befindet sich dort zur Zeit in der Produktion. Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit einigen Entwicklungen und Tests, die im Zusammenhang mit der BDC stehen.

Im Mittelpunkt steht zum einen die Entwicklung eines Programms zur Steuerung und Überwachung der Hochspannung. Zum anderen wurden Tests mit Prototypen der BDC durchgeführt.

Für die Hochspannungsversorgung werden prozessorgesteuerte Hochspannungsnetzgeräte verwendet, die von einem Apple Macintosh Rechner kontrolliert und angesteuert werden. An dieses System werden vielerlei Anforderungen gestellt, um den sicheren Betrieb der BDC zu gewährleisten und sie vor Schäden zu schützen.

Die Tests mit den Prototypen wurden durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit der Kammern zu demonstrieren und erste Betriebserfahrungen zu sammeln. Die BDC enthält spezielle Elektroden zur Formung des Driftfeldes. Die Elektroden werden aufgrund theoretischer Überlegungen verwendet, und ihre Wirksamkeit wird experimentell in dieser Arbeit nachgewiesen. Die Tests halfen außerdem, Fehler zu erkennen und Verbesserungen in die Entwicklung der BDC einfließen zu lassen. Zugleich konnten die Datennahme- und die Steuerprogramme erprobt werden.

Außerdem soll diese Arbeit die BDC und alle Komponenten, die zum Betrieb der BDC notwendig sind, vorstellen und beschreiben. Sie soll damit der Information derjenigen dienen, die die BDC kennenlernen wollen. Sie ersetzt natürlich nicht die Vielzahl der Schriften, Zeichnungen und anderen Unterlagen, die über die BDC existieren. Vieles befindet sich aber bei den Entwicklern und wird hier erstmals zusammenhängend dargestellt.

2. HERA und der H1-Detektor

2.1 Der HERA-Speicherring

In der Hochenergiephysik werden zur Untersuchung der Materie Streuexperimente verwendet. Dabei wird ein quasi punktförmiges Teilchen an dem zu untersuchenden Objekt gestreut. Die Auflösung hängt nach der Unschärferelation von dem Impulsübertrag Q ab: $\Delta \approx \hbar / Q$. Nach oben ist Q begrenzt durch die im Schwerpunktssystem verfügbare Energie. Die effektivste Methode, eine hohe Energie zu erhalten, besteht im Bau von Speicherringen, in denen das Testteilchen und das zu untersuchende Teilchen in entgegengesetzte Richtung beschleunigt und zur Kollision gebracht werden. Bei HERA (*Hadron Elektron Ring Anlage*) am DESY (*Deutsches Elektronen Synchrotron*) in Hamburg befinden sich in dem einen Beschleunigerring Elektronen und im anderen Protonen, die in vier Wechselwirkungszonen miteinander oder mit einem festen Target kollidieren können (siehe Abbildung 2.1). Statt der Elektronen können auch Positronen im Ring beschleunigt werden.

Abbildung 2.1 Speicherring HERA am DESY

HERA eignet sich u. a. zu folgenden Untersuchungen [Eis92]:

- Q^2-Entwicklung der Quarkverteilungen im Nukleon bis zu sehr hohen Werten von Q^2. Bei HERA können die QCD-Vorhersagen in einem Q^2-Bereich getestet werden, der um den Faktor 100 größer ist als der bisher zugängliche.
- Suche nach Substrukturen von Quarks und Leptonen und nach neuen Elementarteilchen. Dabei handelt es sich z. B. um Leptoquarks, Leptogluonen und angeregte Leptonen oder Quarks. Diese „exotischen“ Teilchen werden nicht durch das Standardmodell beschrieben.

- Messung der Impulsverteilung von Quarks und Gluonen, die nur winzige Bruchteile x des Protonimpulses tragen (weiche Partonen).
- Untersuchung der hadronischen Struktur des Photons.
- Messung von Charm- und Bottom-Mesonen mit sehr hoher Statistik.

In den Experimentierhallen Nord und Süd werden die Teilchenstrahlen zusammengeführt, so daß Elektronen und Protonen aneinander gestreut werden können. Die Detektoren H1 in Halle Nord und ZEUS in Halle Süd haben die Aufgabe, Richtung, Energie und Impuls der Teilchen nach der Streuung zu bestimmen.
Zur Beschreibung des Streuprozesses werden folgende kinematischen Variablen benutzt:

E_e, E_p		Energie der Elektronen- und Protonenstrahlen
e		Viererimpuls des einfallenden Elektrons
p		Viererimpuls des einfallenden Protons
e'		Viererimpuls des gestreuten Elektrons
s	$= (e + p)^2 = 4\, E_e\, E_p$	Quadrat der Schwerpunktsenergie
Q^2	$= -(e - e')^2 = 2\, E_e\, E_e' \,(1 + \cos \theta_e') = -q^2$	Quadrat des Viererimpulsübertrags
Q^2_{max}	$= s$	Größtmögliches Q^2
ν	$= (q \cdot p) / m_p$	Energieverlust des Elektrons
ν_{max}	$= s / (2\, m_p)$	Größter Energietransfer
y	$= (q \cdot p) / (e \cdot p) = \nu / \nu_{max}$	Anteiliger Energieübertrag des Elektrons; gemessen im Schwerpunktsystem des Protons
x	$= Q^2 / (2\, q \cdot p) = Q^2 / (2\, m_p \cdot \nu) = Q^2 / (y \cdot s)$	Bjorkens Skalenvariable; im Quark-Parton-Modell ist x der Anteil an der Energie des Nukleons, den das gestreute Parton trägt.
W^2	$= (p + q)^2 = m_p^2 - Q^2 + 2\, m_p \cdot \nu$ $= m_p^2 + Q^2\,(1/x - 1)$	Massenquadrat des gesamten erzeugten hadronischen Systems
Δ	$= \hbar / Q$	Kleinste Objektgröße, die im Proton aufgelöst werden kann

Solange inklusiv gemessen, das heißt, der hadronische Endzustand nicht detailliert beschrieben wird, reichen die drei Variablen s, Q^2 und x zur vollständigen Beschreibung der Kinematik des Prozesses aus.
Bei der e-p-Streuung treten im wesentlichen drei Prozesse auf:

- Tiefinelastische Streuung mit neutralem Strom (Deep Inelastic Scattering, Neutral Current; DIS NC): $e\,p \rightarrow e\,X$ (Abbildung 2.2a). Das Austauschteilchen γ oder Z^0 ist neutral, und das gestreute Elektron hat eine hohe Energie. Der Transversalimpuls des gestreuten Elektrons und der des Jets, der aus dem Quark entsteht, heben sich auf. Die Variablen x und Q^2 können entweder aus der Energie und dem Streuwinkel des Elektrons oder des Jets bestimmt werden.
- Tiefinelastische Streuung mit geladenem Strom (Deep Inelastic Scattering, Charged Current; DIS CC): $e\,p \rightarrow \nu\,X$ (Abbildung 2.2b). Bei diesem Prozeß ist das Austauschteilchen ($W^{\pm}$) geladen, und das entstehende Neutrino kann nicht beobachtet werden. Es wird also ein fehlender Transversalimpuls gemessen, was diesen Prozeß charakterisiert.
- Photoproduktion: Bei kleinem Q^2 findet Photoproduktion statt. Abbildung 2.2c) zeigt einen möglichen Prozeß. Dabei dominieren Prozesse, bei denen nur einige GeV im Kalorimeter deponiert werden.

Der größte Teil der Energie des Protonenrests verschwindet meistens unbeobachtet im Strahlrohr.

Abbildung 2.2 Feynmandiagram für NC- und CC-Streuung und für Photon-Gluon-Fusion

Elektronen, Positronen und Protonen werden durch eine Kette von Vorbeschleunigern (Linearbeschleuniger LINAC I-III, zwei Synchrotrons DESY II und III und Speicherring PETRA) auf die Einschußenergie von 40 GeV (p) bzw. 12 GeV ($e^{\pm}$) gebracht und dann in den HERA-Speicherring injiziert. Dort erhalten sie ihre Maximalenergie von 820 GeV (p) bzw. 30 GeV ($e^{\pm}$).
Bei HERA werden $e^{\pm}$ und p in zwei getrennten Magnetringen geführt und durch Strecken von Hochfrequenzresonatoren beschleunigt. Die Magnete des Protonenrings sind supraleitend, die des Elektronenrings normalleitend.
Die Hochfrequenzbeschleunigung führt zu einer Strahlstruktur, bei der kurze Protonen- und Elektronen-Bunches im zeitlichen Abstand von 96 ns entstehen. Ein Elektronen-Bunch enthält etwa $3{,}8 \cdot 10^{10}$ Elektronen und ein Protonen-Bunch etwa $1{,}0 \cdot 10^{11}$ Protonen. Nicht jede mögliche Position ist mit einem Bunch besetzt, und nicht alle Bunches haben einen Kollisionspartner (Abbildung 2.3). Die ungepaarten Bunches wechselwirken nur mit den Restgasatomen im Strahlrohr und mit dem Strahlrohr selbst, wodurch sich Art und Häufigkeit von Untergrundereignissen bestimmen läßt.

Abbildung 2.3 Anordnung der Elektronen- und Protonen-Bunches bei HERA

Die Design Parameter von HERA sind in Tabelle 2.1 aufgelistet.

	Elektronen-Ring		Protonen-Ring
Umfang		6336 m	
Energie	30 GeV		820 GeV
e-p Schwerpunktsenergie		314 GeV	
Feldstärke der Führungsmagnete	0,164 T		4,682 T
Strom des Strahls	60 mA		160 mA
Anzahl der Teilchen pro Strahl	$0{,}8\ 10^{13}$		$2{,}1\ 10^{13}$
Anzahl der Bunches	210		210
Strom pro Bunch	0,3 mA		0,8 mA
Zeit zwischen den Bunchcrossings		96 ns	
Luminosität		$1{,}5\ 10^{31}\ cm^{-2}s^{-1}$	

Tabelle 2.1

Ein wichtiger Parameter von Speicherringen ist die Luminosität. Sie ist definiert als das Verhältnis der Ereignisanzahl n pro Sekunde zum Wirkungsquerschnitt σ der erzeugten Reaktionen: $L = n / \sigma$. Die integrierte Luminosität von HERA ist in Abbildung 2.4 zu sehen.

Abbildung 2.4 Integrierte Luminosität von HERA
(Kurven von unten nach oben: 1992, 1993, 1994)

Die Großdetektoren H1 und ZEUS für die Untersuchung der e-p-Streuung sind in Aufbau und Zielsetzung ähnlich. H1 wird im folgenden Kapitel beschrieben.
Neben diesen beiden Detektoren befinden sich zwei weitere Experimente bei HERA im Aufbau: HERMES in Halle Ost und Hera-B in Halle West: Bei HERMES soll die innere Spin-Struktur des Protons und des Neutrons durch spinabhängige tiefinelastische Elektron-Nukleon-Streuung untersucht werden. Dazu werden die Elektronen im Speicherring in den Wechselwirkungszonen longitudinal polarisiert und mit einem polarisierten Gastarget (H, D, He^3) zur Kollision gebracht. Der Protonenstrahl wird hierbei nicht verwendet und am Experiment vorbeigeführt. HERMES soll 1995 in Betrieb gehen.
Das Ziel von HERA-B ist es, die CP-Verletzung im B-Mesonen-System zu bestimmen, wobei die Protonen im Halo eines Bunches an einem Drahttarget, das sich im Strahlrohr befindet, gestreut werden. Bei diesem Experiment bleibt der Elektronenstrahl unbenutzt. HERA-B soll bis 1998 fertig aufgebaut sein.

2.2 Der H1-Detektor

Wie schon erwähnt, soll der H1-Detektor Richtung, Impuls, Energie und Art der nachweisbaren Teilchen nach der e-p-Streuung bestimmen. Im Folgenden werden die wesentlichen Komponenten des Detektors vorgestellt. Eine genaue Beschreibung findet sich in [H1C93b]. Der Aufbau von H1 ist in Abbildung 2.5 zu sehen.

Abbildung 2.5 Der Aufbau des H1-Detektors

Da die Energie der von rechts kommenden Protonen bedeutend größer ist als die Energie der von links kommenden Elektronen, bewegt sich das e-p-Schwerpunktsystem in Protonenrichtung. Ein tiefinelastisches Ereignis (bei nicht zu kleinem x) zeichnet sich somit durch eine hohe Teilchendichte und hohe Teilchenenergien in Protonenrichtung aus. Demzufolge ist der Detektor asymmetrisch aufgebaut. Die Region, in die die Protonen fliegen, ist der Vorwärtsbereich, in der entgegengesetzten Richtung liegt entsprechend der Rückwärtsbereich. Das bei H1 verwendete Koordinatensystem

besteht aus den Koordinaten z, θ, φ: z ist die Strahlrohrachse in Protonenrichtung, θ ist der Polarwinkel (das ungestreute Proton verläßt den Detektor unter einem Winkel von $\theta = 0°$) und φ ist der Azimutalwinkel (in Protonenrichtung gesehen wird φ im Uhrzeiger gemessen; $\varphi = 0°$ zeigt nach links).
Der Wechselwirkungsbereich (Vertex) der Bunches befindet sich ungefähr bei [X] und hat eine Ausdehnung von etwa ±30 cm. Um den Vertex sind die Spurenkammern angeordnet ([2] und [3]), mit denen sich die Spuren der durchfliegenden geladenen Teilchen bestimmen lassen. Weiter außen liegt das Hauptkalorimeter ([4] und [5]), ein Flüssig-Argon-Kalorimeter, das die Teilchen weitgehend absorbiert und ihre Energie mißt.
Um den Impuls der geladenen Teilchen bestimmen zu können, werden sie von einem Magnetfeld auf gekrümmte Bahnen gelenkt. Das Magnetfeld wird von einer supraleitenden Spule [6] erzeugt. Das instrumentierte Eisen [10] schließt die Magnetfeldlinien und enthält außerdem Streamerröhren-Detektoren. Um den Einfluß des Solenoid-Magnetfeldes auf den Strahl zu reduzieren, gibt es einen Kompensationsmagneten [7].
Im rückwärtigen Bereich ($\theta > 152°$) gibt es ein weiteres Kalorimeter [12]. Dabei handelt es sich um ein elektromagnetisches Blei-Szintillator-Sandwich-Kalorimeter. Davor befindet sich eine Vieldraht-proportionalkammer. Diese beiden Subdetektoren werden im Rahmen eines Upgrade-Programms ausgetauscht (siehe nächstes Kapitel). Außen und innen am Eisenjoch und in Vorwärtsrichtung sind Myonen-Kammern [9] angeordnet. Ebenfalls in Vorwärtsrichtung befindet sich ein Myonspektrometer [14].
Weiter hinten im Tunnel von HERA (ca. 33 m bzw. 106 m vom Vertex entfernt) befinden sich zwei Kleinwinkel-Kalorimeter, der Elektron-Tagger und der Photonendetektor (Abbildung 2.6). Mit diesen Detektoren wird die Ereignisrate des Prozesses $ep \rightarrow e'p\gamma$ gemessenen und über den dafür bekannten Wirkungsquerschnitt die Luminosität bestimmt.

Abbildung 2.6 Der Elektrontagger und der Photonendetektor im Tunnel von HERA

3. Die Backward Drift Chamber (BDC)

3.1 Die Aufgaben der BDC

Beim Bau des H1-Detektors wurde auf eine gute Instrumentierung des Vorwärtsbereichs Wert gelegt, was zu Lasten des Rückwärtsbereiches ging. Dennoch sind natürlich Ereignisse mit kleinem Q^2 von Interesse. Zum Beispiel stellt sich die Frage nach der Partondichte in diesem Bereich, und mit welchem Modell sie vereinbar ist. Deshalb ist eine Verbesserung des Rückwärtsbereiches notwendig. Dazu dient das Upgrade-Programm.
Die Verbesserung im Rückwärtsbereich soll eine genauere Unterscheidung der tiefinelastischen ep-Kollision von der Photoproduktion ermöglichen. Dazu ist es wichtig, „echte“ Elektron-Signale von falschen zu unterscheiden, für die es folgende Ursachen gibt:

- Geladene Pionen liefern Spuren, die fälschlicherweise als Elektronenspuren identifiziert werden.
- Photonen und Elektronen können im Kalorimeter nicht unterschieden werden. Die Photonen entstehen aus dem Zerfall neutraler Pionen.
- Beide Fälle können sich überlagern und erschweren die Elektronenidentifikation weiter.

Der jetzige H1-Detektor ist im Rückwärtsbereich (d. h. $\theta > 152°$) mit einem elektromagnetischen Kalorimeter (*Backward Electromagnetic Calorimeter*, BEMC) ausgerüstet, das einen polaren Winkelbereich von $155° < \theta < 176°$ abdeckt (siehe Abbildung 3.1). Es erlaubt eine Elektronenidentifikation bis zu einem Winkel von $\theta = 173°$. Vor dem BEMC befindet sich eine Vieldrahtproportionalkammer (*Backward Proportional Chamber*, BPC). Diese liefert allerdings nur den Durchstoßpunkt eines geladenen Teilchens und keine Spursegmente.
Bis zu einem Winkel von $\theta = 157°$ liefern die zentralen Jetkammern (CJC1 und CJC2) und die beiden z-Kammern gute Spuren. Weil die Spuren oberhalb dieses Winkels in der CJC1 sehr kurz werden, wird ihre Rekonstruktion ungenau. Spuren in der Nähe des Strahlrohrs können überhaupt nur durch die Kombination eines Hits in der BPC mit dem rekonstruierten Vertex bestimmt werden. Dabei ist für kleines Q^2 die Rekonstruktion des Vertex nur schwer möglich, weil sich die Spuren des Jets in Vorwärtsrichtung und des gestreuten Elektrons in Rückwärtsrichtung unter einem großen Winkel schneiden und somit schleifende Schnitte entstehen.
Das Flüssig-Argon-Kalorimeter reicht bis zu einem Winkel $\theta = 155°$, so daß es nur wenig mit dem BEMC überlappt.

Abbildung 3.1 Der innere Bereich von H1

Die geplante Verbesserung des H1-Dektektors im Rückwärtsbereich besteht darin, das BEMC gegen ein neues Kalorimeter zu ersetzen (genannt SPACAL; *Spaghetti Calorimeter*), das sowohl näher an das Strahlrohr reicht, als auch mit dem Flüssig-Argon-Kalorimeter in einem größeren Bereich überlappt (Abbildung 3.2). Das SPACAL besteht aus dünnen Bleiplatten, in die Fasern aus Szintillatormaterial eingebettet sind. Vor das SPACAL wird die *Backward Drift Chamber* (BDC) montiert, die die BPC ersetzt. Die BDC kann im Gegensatz zur BPC die Spuren der geladenen Teilchen rekonstruieren, die in das SPACAL eindringen. Außerdem erstreckt die BDC sich homogen über einen großen Winkelbereich.
Zusätzlich wird der Durchmesser des Strahlrohrs auf 6 cm verringert, und in den dadurch entstehenden Raum um das Strahlrohr werden zentrale und rückwärtige Silikon-Streifen-Detektoren (*Central- / Backward Silicon Tracker*; CST / BST) installiert. Die CJC1 und die BST werden dann einen Winkelbereich bis $\theta = 165°$ abdecken. Insgesamt wird die Abdeckung im Rückwärtsbereich bis $\theta = 178°$ reichen.

Abbildung 3.2 Der innere rückwärtige Bereich von H1 nach dem Upgrade

Die BDC hat folgende Aufgaben:

- Bestimmung der Spursegmente von geladenen Teilchen, die auf das SPACAL treffen. Dabei muß die Genauigkeit ausreichen, um zu entscheiden, ob der Ursprung der Spur in der Vertexregion liegt.
- Der Auftreffpunkt eines Teilchens auf das SPACAL soll mit einer Genauigkeit von 1 mm bestimmt werden.
- Identifikation von aufgeschauerten Teilchen (Elektronen und Photonen).
- Abschätzung des Energieverlusts der Elektronen beim Durchgang durch das tote Material vor der BDC. (Das tote Material besteht im wesentlichen aus der Gehäusewand der Central Jet Chamber (CJC), den verschiedenen Kabel und der Ausleseelektronik; siehe auch [Mec94]).
- Die BDC soll ein schnelles Triggersignal für den Level 1 Hardware Trigger zur Verfügung stellen, das ep-Ereignisse vom Untergrund unterscheiden kann. Dazu wird der Polarwinkel θ der Spur bestimmt und überprüft, ob er mit dem Polarwinkel einer Spur aus dem Vertex verträglich ist.

3.2 Driftkammerphysik

Eine Driftkammer ist ein ortsempfindlicher Detektor zur Messung von Spuren geladener Teilchen. Sie ist eine Weiterentwicklung des Proportionalzählrohres und der Proportionalkammer.

Primärionisation

Ein geladenes Teilchen, das durch eine Driftkammer fliegt, ionisiert auf seiner Bahn die Gasatome in der Driftkammer (Primärionisation). Der mittlere Energieverlust des Teilchens pro Weglänge wird durch die Bethe-Bloch-Formel beschrieben:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi\ N_0 z^2 e^4}{mv^2}\frac{Z}{A}\left[\ln\left(\frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)}\right)-\beta^2\right] \qquad \text{Gleichung 3.1}$$

m : Elektronenmasse
z : Ladung des Teilchens in Einheiten von e
v : Geschwindigkeit des Teilchens
β = v/c
N_0 : Avogadro-Konstante
Z, A : Ordnungszahl und Massezahl der Atome des durchquerten Materials
x : Materiebelegung (in g/cm²); dx = $\rho \cdot$ ds, ρ: Dichte (in g/cm³), s: Wegstrecke (in cm)
I : effektives Ionisationspotential; I ≈ 10 Z eV

Als Funktion von β fällt dE/dx zunächst ab und hat ein Minimum bei $\beta\gamma$ = p/Mc ≈ 4. Teilchen mit dieser Geschwindigkeit nennt man minimalionisierende Teilchen. Anschließend steigt die Funktion zu relativistischen Teilchenenergien wieder an. Abbildung 3.3 zeigt als Beispiel den Energieverlust eines geladenen Teilchens in einer Argon-Methan-Mischung. Für relativistische Energien nähert sich die Kurve einem Wert, der für Gase bei Normaldruck etwa um den Faktor 1,5 höher liegt als der minimale Wert. Bei dichteren Medien (Gase unter höherem Druck, Flüssigkeiten und Festkörpern) ist der Anstieg bedeutend geringer.

Abbildung 3.3 Mittlerer Energieverlust durch Ionisation für geladene Teilchen in einem Argon-Methan-Gasgemisch [Per90].

Die Bethe-Bloch-Formel gibt nur den mittleren Energieverlust geladener Teilchen durch Ionisation und Anregung an. Allerdings treten starke Schwankungen um den mittleren Energieverlust auf. Diese Schwankungen können in Gasen durch eine Landau-Verteilung beschrieben werden. Abbildung 3.4 zeigt als Beispiel eine solche Landau-Verteilung für den Energieverlust von 250 MeV Elektronen in einer 1 cm dicken Argon-Gasschicht.

Abbildung 3.4 Landau-Verteilung für den Energieverlust von 250 MeV Elektronen in 1 cm gasförmigem Argon in linearer und halblogarithmischer Darstellung [Gru93].

Die Landau-Fluktuation des Energieverlustes entsteht durch hohe Energieübertragungen auf die Elektronen der Gasatome. Die Elektronen können dabei soviel Energie aufnehmen, daß sie selbst wieder ionisieren können. Diese Elektronen heißen δ-Elektronen oder Knock-on-Elektronen.

Driftbewegung

Die bei der Primärionisation entstandenen Elektronen stoßen zum einen mit den Atomen des Gases zusammen und bewegen sich dadurch unregelmäßig durch das Gas. Zum anderen werden die Elektronen aber zwischen den Stößen in Richtung des elektrischen Feldes beschleunigt, so daß sie insgesamt zur Anode driften, die als Draht durch die Driftkammer gespannt ist. Die Ionen bewegen sich zur Kathode. In dieser einfachen Theorie der Driftgeschwindigkeit kann diese dargestellt werden durch

$$\vec{v}_{\text{Drift}} = \frac{e}{m}\vec{E}\,\tau \qquad \text{(Gleichung 3.2)}$$

$\vec{E}$: Feldstärke
τ : Zeit zwischen zwei Stößen mit den Atomen des Gases

Die Zeit zwischen zwei Stößen τ ist gleich dem Reziprokwert der Streurate ν: $\tau = 1/\nu$. Die Streurate wiederum ist durch folgende Beziehung gegeben:

$$\nu = N\sigma v_c \qquad \text{(Gleichung 3.3)}$$

N : Teilchendichte des Gases
σ : Wirkungsquerschnitt
v_c : Geschwindigkeit der Elektronenbewegung

Zusammengefaßt erhält man für die Driftgeschwindigkeit:

$$v_{Drift} = \frac{e}{m}\left(\frac{E}{N}\right)\frac{1}{\sigma v_c} \qquad \text{(Gleichung 3.4)}$$

v_{Drift} skaliert also mit E/N, und es ist sinnvoll, E/N als eigene Größe, die sogenannte reduzierte Feldstärke, einzuführen. Ihre Einheit ist das Townsend (Td = 10^{-17} Vcm²). Als Faustregel gilt: 1 Td entspricht einer Feldstärke von 250 V/cm bei Normaldruck.
Als Richtwert für die Driftgeschwindigkeit in der bei uns verwendeten Gasmischung Argon/Isobutan/Ammoniak (92,5% / 5% / 2,5%) erhält man für eine Feldstärke von 1000 V/cm einen Wert von $v_{Drift} \approx 40$ µm/ns [Wil94].

Lorentzwinkel

Bei Anwesenheit eines magnetischen Feldes werden die Elektronen zwischen zwei Stößen mit den Gasatomen durch die Lorentzkraft beeinflußt. Das führt zu einer veränderten Driftgeschwindigkeit, die bei senkrecht aufeinanderstehenden E- und B-Feldern gegeben ist durch

$$\left|\vec{v}_{Drift}\right| = \frac{\mu E}{\sqrt{1+\omega^2\tau^2}} \qquad \text{(Gleichung 3.5)}$$

$\mu = e\cdot\tau/m$ die Beweglichkeit der Ladungsträger
$\omega = e\cdot B/m$ die Zyklotronfrequenz (aus $mr\omega^2 = evB$).

Außerdem werden die Elektronen von ihrer ursprünglichen Driftbewegung in E-Feld-Richtung abgelenkt. Dieser Ablenkungswinkel ist der Lorentzwinkel α, für den näherungsweise gilt:

$$\tan\alpha \approx v_{Drift} \cdot \frac{B}{E} \qquad \text{(Gleichung 3.6)}$$

Signalentstehung

Da der Anodendraht in der Driftkammer einen sehr geringen Durchmesser hat (in der BDC zum Beispiel d = 20µm), gilt für ist das elektrische Feld in der Nähe des Drahts näherungsweise eine 1/r-Abhängigkeit, was zu sehr hohen Feldstärken (bis ungefähr 10^5 V/cm) führt. In der Nahdrahtzone können deshalb die Elektronen zwischen zwei Stößen mit den Gasatomen so viel Energie aufnehmen, daß sie weitere Atome ionisieren können (Sekundärionisation), was in Abbildung 3.5 gezeigt ist.

Abbildung 3.5 Zeitliche Entwicklung der Lawine in der Nähe des Anodendrahtes [Kle92]
a) Ein primäres Elektron bewegt sich zur Anode;
b) das Elektron gewinnt im elektrischen Feld Energie und ionisiert Atome; die Lawinenbildung setzt ein;
c) Elektronen- und Ionenwolke driften auseinander;
d) und e) die Elektronenwolke driftet zum Draht, die Ionenwolke entfernt sich radial vom Draht.

Anode und Kathode stellen einen Kondensator dar, auf den durch die Bewegung der Ladungsträger im elektrischen Feld Ladungen influenziert werden. Die über die Anode abfließende Ladung kann als Spannung an einem Widerstand abgegriffen werden. Die Elektronen driften bedeutend schneller als die Ionen, und die Signalamplitude stammt überwiegend von den Ionen. Die Signalanstiegszeit der Elektronenkomponente liegt im Nanosekundenbereich, die Anstiegszeit der Ionen im 10 Millisekundenbereich. Um dennoch kurze Signale zu erhalten, wird durch Verwendung eines geeigneten RC-Gliedes das Signal differenziert und damit nur der Impuls berücksichtigt, der von den Elektronen ausgelöst wird.
Der insgesamt gemessene Spannungsimpuls ist

$$\Delta U = -A\frac{Ne}{C}$$

e = Elementarladung
N = Anzahl der auf der Teilchenspur erzeugten positiven und negativen Ladungen
C = Kapazität der Anode gegen Erde
A = Gasverstärkung; Faktor, um den der Spannungsimpuls größer ist, als in dem Fall ohne Sekundärionisation. Typisch beträgt die Gasverstärkung $A = 10^4 \ldots 10^6$.

Ziel der Driftkammer ist es, den Durchgangsort eines geladenen Teilchens aus der gemessenen Driftzeit möglichst genau zu bestimmen. Eine Voraussetzung hierfür ist es, alle bei der Primärionisation entstandenen Elektronen mit möglichst konstanter Geschwindigkeit v_d durch den Driftraum driften zu

lassen. Wenn dann der Zeitpunkt t_0 des Teilchendurchgangs bekannt ist (z. B. durch Szintillatoren), kann über die Relation $z = v_d (t_1 - t_0)$ auf den Ionisationsort z geschlossen werden. t_1 ist der Zeitpunkt des Anstiegs des Anodenimpulses.
Für eine konstante Driftgeschwindigkeit benötigt man ein homogenes Driftfeld, das man durch Anbringen von Driftelektroden auf dem Driftweg zwischen Kathode und Anode erhält (außer in unmittelbarer Drahtnähe). Ein solches Feld ist in Abbildung 3.6 zu sehen. Die Zelle ist senkrecht zum Zähldraht, der sich in der Mitte befindet, aufgeschnitten. Links und rechts liegen die Kathoden, oben und unten befinden sich die Driftelektroden.

Abbildung 3.6 Das elektrisches Feld in einer Driftkammer

Um die Lage der Ionisationsspur im Raum bestimmen zu können, werden mehrere Driftzellen hintereinander angeordnet. Eine Möglichkeit zu unterscheiden, ob die Elektronen von links oder rechts auf den Draht driften, besteht darin, hintereinanderliegende Zellen um eine Driftraumbreite gegeneinander zu versetzen (Auflösung der Links-Rechts-Ambiguität; Abbildung 3.7).

Abbildung 3.7 Geometrie zur Auflösung der Rechts-Links-Ambiguität in einer Driftkammer [Gru93]

3.3 Der Aufbau der BDC

3.3.1 Übersicht

Die BDC besteht aus vielen Driftkammerzellen. Die Anordnung der Zähldrähte in der BDC ist in Abbildung 3.8 skizziert. Die einzelnen Lagen sind um 11,25° gegeneinander in φ-Richtung verdreht. Die „Spinnennetz"-Anordnung der Drähte wurde aufgrund folgender Überlegung gewählt:
In Abbildung 3.9 sieht man die vorhergesagte Untergrundrate in der BDC in Abhängigkeit vom Radius. Deutlich ist die Zunahme der Untergrundrate zu kleinen Radien zu erkennen. Die Spinnennetz-Geometrie verhindert, daß sich die deshalb erwarteten Probleme auf den Bereich großer Radien auswirken, wie es bei einer radialen Drahtanordnung der Fall wäre.
Um der größeren Ereignisrate nahe am Strahlrohr weiterhin Rechnung zu tragen, sind die inneren Driftzellen kleiner als die äußeren. So haben die Driftzellen unterhalb eines Radius von etwa 23 cm eine Driftraumlänge von rund 5 mm und die außerhalb liegenden eine von rund 15 mm, was einer Driftzeit von ungefähr 150 ns bzw. 450 ns entspricht. Bei HERA treffen die Elektronen- und Protonenbunches alle 96 ns aufeinander (Bunch-Crossing). Somit überlappen sich in den inneren Zellen maximal die Ereignisse aus zwei aufeinanderfolgenden Bunch-Crossings und auch die Anhäufung von Untergrund (Pile-Up) hält sich entsprechend in Grenzen.

Abbildung 3.8 Prinzipieller Aufbau der BDC

Abbildung 3.9 Untergrundrate in der BDC als Funktion des Radius (Monte Carlo Simulation)

Hintereinanderliegende Drähte sind um eine Driftzellenlänge in radialer Richtung gegeneinander versetzt, so daß dadurch die Links-Rechts-Ambiguität aufgelöst wird Abbildung 3.8. Außerdem kann so der Bunchcrossing-Zeitpunkt t_0 über Bildung von Zweidrahtsummen bestimmt werden. Es gilt nämlich vereinfacht (Abbildung 3.10):

$$s_i = v_d (t_i - t_0) \qquad \text{i} = 1,2 \qquad \text{(Gleichung 3.7)}$$

s_i : Driftweg vom Ionisationsort i zum Draht
t_i : Zeitpunkt des Signalanstiegs am Draht
t_0 : Zeitpunkt der Ionisation
v_d : konstante Driftgeschwindigkeit

Abbildung 3.10 Bestimmung des Ereigniszeitpunktes mit Zweidrahtsummen

Wenn die Spur senkrecht durch die Driftzellen führt, gilt:

$$s_1 + s_2 = D \qquad \text{(Gleichung 3.8)}$$

D : senkrechter Abstand der Drähte

Zusammengefaßt erhält man daraus die Gleichung

$$t_1 + t_2 = \frac{D}{v_d} + 2t_0 \ , \qquad \text{(Gleichung 3.9)}$$

die als einzige Unbekannte t_0 enthält. Im allgemeinen erfolgt der Teilchendurchgang nicht senkrecht. Dann kann aus der Position des Vertex' der Polarwinkel θ der Spur bestimmt und die Summe $s_1 + s_2$ entsprechend modifiziert werden. Die Bestimmung von t_0 unterstützt auch den Level1-Trigger.
Ein Schnitt durch die Kammer ist in Abbildung 3.11 zu sehen. Man erkennt die in den Lagen gegeneinander versetzten Driftzellen.

In den folgenden Abschnitten wird der mechanische Aufbau der BDC und die zugehörige Elektronik detailliert beschrieben.

Abbildung 3.11 Schnitt durch die BDC

3.3.2 Der mechanische Aufbau der BDC

In Abbildung 3.12 ist die BDC im geöffneten Zustand zu sehen, wie sie um das Strahlrohr angeordnet ist.

Abbildung 3.12 Die BDC im geöffneten Zustand

Die vier Lagen der BDC bestehen aus je acht Oktanten. Je vier Oktanten sind zu einem Containermodul zusammengefaßt, das vier Einschübe – die Wiremodule – enthält (Abbildung 3.13 links). Auf der Vorder- und Rückseite des Wiremoduls sind die eigentlichen Driftzellen angeordnet (Abbildung 3.13 rechts). Der Driftraum wird durch Kathodenbleche begrenzt, die auf die Basisplatine des Wiremoduls aufgelötet sind. In der Mitte einer Driftzelle befindet sich der Zähldraht als Anode. Um das Driftfeld möglichst homogen zu gestalten, befinden sich links und rechts Driftelektroden. Sie liegen zum einen auf der Basisplatine des Wiremoduls und zum anderen im Deckel des Containermoduls. Abbildung 3.14 zeigt die Position der Zähldrähte eines Oktanten als Abstand von der Strahlrohrmitte. Jede Seite des Wiremoduls enthält 32 Driftzellen. Innen befinden sich auf der einen Seite 15 und auf der anderen 16 kleine Zellen mit einer Ausdehnung in radialer Richtung von 10 mm. Außen sind es 16 bzw. 15 große Zellen zu 30 mm. Dazwischen gibt es je eine Übergangszelle, die sowohl einen kleinen als auch einen großen Driftweg hat. Diese Zelle erhält eine besondere Hochspannungsversorgung. Das Wiremodul (Abbildung 3.15) besteht aus einer zwölflagigen Basisplatine, die in ihrem Inneren die Signalleitungen für die Zähldrähte und die Hochspannungsleitungen für die Drift- und Randelektroden enthält. An den Rändern der Basisplatine sind die Seitenplatinen befestigt, zwischen denen die Drähte gespannt sind. Vor den Seitenplatinen liegen die Randplatinen, die in dieser Abbildung nicht eingezeichnet sind. Außen auf dem Wiremodul sind die Hochspannungsteilerplatine und die Verstärkerplatine montiert.
Je vier Containermodule werden zu einem Paket zusammengefügt (Abbildung 3.12). Dadurch kann die BDC auseinander- und zusammengebaut werden, ohne das Strahlrohr öffnen zu müssen, so daß das Vakuum erhalten bleibt. Bevor die BDC auf Schienen in den H1-Detektor gefahren wird, wird sie am SPACAL befestigt. Damit sich die Eigenbewegung des SPACAL nicht auf die BDC überträgt, wird sie nur an einem Punkt am SPACAL fixiert und an zwei weiteren Punkten über Langlöcher gehalten.

Abbildung 3.13 Containermodul mit vier Wiremodulen und Driftzellen

Abbildung 3.14 Schnitt durch einen Oktanten in Drahtrichtung gesehen.
Eingetragen ist der radiale Abstand der Drähte von der Strahlrohrmitte.

Abbildung 3.15 Das Wiremodul

3.3.2.1 Der Randbereich

Im Randbereich der Driftzellen treten grundsätzlich drei problematische Effekte auf (Abbildung 3.16):

- Zum einen werden die driftenden Elektronen in einem Magnetfeld aufgrund der Lorentzkraft so abgelenkt, daß sie nicht senkrecht, sondern in einem anderen Winkel zum Draht driften. Das hat zur Folge, daß Elektronen, die im Randbereich entstanden sind, von den Seitenwänden der Driftzelle aufgefangen werden, bevor sie den Draht erreicht haben. Dadurch entstehen tote Zonen.
- Zum anderen ist das Driftfeld im Randbereich nicht ohne weiteres homogen. Es entsteht ein zusätzlicher ineffizienter Bereich. Um diesen Effekt zu verringern oder sogar auszuschalten, sind Randelektroden senkrecht zu den Driftelektroden eingelötet (Abbildung 3.17). Wie weit diese Randelektroden das Feld tatsächlich wie gewünscht homogenisieren, wird in Kapitel 6 „Test der Feldformungs-Elektroden“ untersucht.
- Zum dritten bilden natürlich das Material im Randbereich wie Rand- und Seitenplatinen, die Wand des Containermoduls und der leere Raum dazwischen eine ineffiziente Zone. Der ineffiziente Bereich zwischen der Randplatine in einem Oktanten und der Randplatine im benachbarten Oktanten hat eine Breite von 7 mm.

Der Einfluß dieser toten Zonen wird dadurch gemildert, daß die Oktanten der einzelnen Lagen gegeneinander verdreht sind und somit unempfindliche Bereiche von empfindlichen überlappt werden. Dadurch kann im ungünstigen Fall die Spur immer noch von sechs der acht möglichen Drähte gesehen werden.

Abbildung 3.16 Ineffizienz im Randbereich und tote Zone aufgrund des Lorentzwinkels für je zwei hintereinanderliegende Driftzellen

Abbildung 3.17 Die Randplatine vor der Seitenplatine. Auf der Randplatine befinden sich die Feldformungselektroden

3.3.2.2 Die Hochspannungsversorgung

Zur Versorgung einer Seite eines Oktanten werden fünf Hochspannungen benötigt. Jede Driftzelle erhält eine Spannung U_Z für die Driftelektrode über dem Zähldraht und eine Spannung U_D für die Kathoden. Der Zähldraht liegt auf Masse. Abbildung 3.18 zeigt eine Prinzipskizze der Hochspannungsversorgung der Driftzellen. Alle Kathoden der großen (äußeren) Zellen erhalten eine gemeinsame Spannung U_{DA}; alle Driftelektroden über den Zähldrähten der großen Zellen erhalten eine gemeinsame Spannung U_{ZA}. Entsprechend werden die kleinen (inneren) Zellen mit den Spannungen U_{DI} und U_{ZI} versorgt. Die Feldstärke in den Zellen E = U/d erhält man also aus

$$E_A = \frac{U_{ZA} - U_{DA}}{1{,}5\ \text{cm}} \quad \text{für die äußeren bzw.} \quad E_I = \frac{U_{ZI} - U_{DI}}{0{,}5\ \text{cm}} \quad \text{für die inneren Zellen.}$$

Die Spannung zwischen U_D und U_Z muß gleichmäßig auf die Driftelektroden zwischen Zähldraht und Kathode verteilt werden, damit ein homogenes Driftfeld entsteht. Dazu dienen die Widerstände R_A und R_I. Sie symbolisieren in der Prinzipskizze eine Widerstandskette, die der Übersichtlichkeit halber nicht eingezeichnet ist.

Die Zählspannungen U_Z haben über die Widerstände R_{FA}, R_{KA} bzw. R_{FI}, R_{KI} eine Verbindung nach Masse. Dadurch wird gewährleistet, daß alle Punkte der Hochspannungsversorgung auf einem definierten Potential liegen, auch wenn einzelne Spannungen ausfallen. Außerdem sorgen diese Widerstände dafür, daß immer ein Strom aus den Hochspannungsnetzgeräten heraus- und nie hineinfließt. An den Widerstände R_{KA} und R_{KI} wird die durch den sogenannten Kettenstrom abfallende Spannung abgegriffen. Durch sie läßt sich der Zustand der Kammer überwachen, weil sich bei einem auftretenden Fehler (z. B. Überschläge in einer Zelle oder Ausfall eines Widerstandes) der Kettenstrom

ändert. Zwar wird auch der vom Hochspannungsgerät gelieferte Strom gemessen, allerdings versorgt ein Kanal des HV-Geräts mehrere Oktanten mit Spannung, so daß ein Fehler nicht einem einzelnen Oktanten zugeordnet werden kann.
Zwischen den inneren und den äußeren Driftzellen liegt eine Übergangszelle, die einen großen und einen kleinen Driftraum hat. Sie erhält ein eigene Spannung U_H für die Driftelektrode über dem Zähldraht. Über diese Spannung kann die Gasverstärkung in der Übergangszelle unabhängig von den großen und kleinen Zellen eingestellt werden.

Die verwendeten Spannung für einen Oktanten seien noch einmal zusammenfassend aufgelistet:

U_{DA}	Spannung für die Kathoden der großen (äußeren) Zellen
U_{DI}	Spannung für die Kathoden der kleinen (inneren) Zellen
U_{ZA}	Spannung für die Driftelektroden über den Zähldrähten der großen Zellen
U_{ZI}	Spannung für die Driftelektroden über den Zähldrähten der kleinen Zellen
U_H	Spannung für die Driftelektrode über dem Zähldraht der Übergangszelle

Den genauen Schaltplan mit allen Widerstandsketten zeigt Abbildung 3.19.

Abbildung 3.18 Prinzipskizze der Hochspannungsversorgung für die Driftzellen

Abbildung 3.19 Der Hochspannungsteiler

3.3.2.3 Die Numerierung der Oktanten und der zugehörigen BDC-Kabel

Die Kabel, die die BDC mit der Elektronik im Elektronikwagen verbinden, sind nach folgendem Prinzip numeriert:
Ein vierstelliger Zifferncode („BDC ####“) bezeichnet die Stelle in der BDC, für die das Kabel die Signal- und Hochspannungsleitungen enthält (Abbildung 3.20).

Abbildung 3.20 Numerierung der Oktanten und der zugehörigen Kabel

Ein Teilchen, das durch die BDC fliegt, passiert acht Lagen von Drähten. Die Lage, die dem Wechselwirkungspunkt (Vertex) am nächsten liegt, erhält die Nummer 0. Wie schon erwähnt, sind die Containermodule zu Paketen zusammengefaßt, um den Einbau der BDC in den H1-Detektor zu erleichtern. Das untere Paket hat die Nummer 0 und das obere 1. Jeder der Oktanten bildet einen Sektor. Die Sektoren sind vom Vertex aus gesehen entgegen dem Uhrzeigersinn numeriert. Die Oberkante des Sektors 0 in der Lage 4/5 liegt waagerecht. Die anderen Sektoren sind je Lage um 11,25° verdreht. Jede der zwei Lagen eines Oktanten wird von vier Kabeln versorgt, die die Signal- und Hochspannungsleitungen enthalten. Das Kabel 0 enthält die Signalleitungen für die inneren Drähte und Kabel 3 die für die äußeren.

3.3.2.4 Die BDC-Prototypen

Für die unterschiedlichen Tests im Zusammenhang mit der Konstruktion und dem Bau der BDC wurden seit 1993 verschiedene Prototypen entwickelt. Zur Übersicht sind die verschiedenen Typen in der Tabelle 3.1 aufgelistet. Die Prototypen sind kleiner als die BDC und haben einen Radius von ca. 30 cm.

Name	Baujahr	Beschreibung	Dokumentation
Prototyp I	1993	Drei Containermodule enthalten je ein Wiremodul. Für Tests am Strahl 22 bei DESY und im Physikalischen Institut der Universität Heidelberg.	[Wer94] und [Kat94]
Prototyp II	1994	Vier Containermodule enthalten je zwei Wiremodule. Bei H1 eingebaut zu Testzwecken.	Siehe Kapitel „Tests mit dem Prototypen II “
Prototyp IIa	1994	Ein Containermodul enthält ein Wiremodul. Bauweise wie Prototyp II, zusätzlich Randelektroden zur Feldformung. Für Tests im Physikalischen Institut der Universität Heidelberg.	Siehe Kapitel „Tests mit dem Prototypen IIa in Heidelberg“ und „Test der Feldformungs-Elektroden“
BDC	1994/95	„Endgültige“ BDC für den Einsatz bei H1 ab Frühjahr 1995 Befindet sich zur Zeit (Ende 1994) in der Produktion.	Dieses Kapitel

Tabelle 3.1

3.3.3 Die Analogelektronik der BDC

An die Elektronik werden folgende Anforderungen gestellt:

- Die Signale der Zähldrähte müssen verstärkt werden, bevor sie von den FADCs digitalisiert werden.
- Ein minimalionisierendes Teilchen soll bei einer Gasverstärkung $A = 5 \cdot 10^4$ im FADC einen Puls erzeugen, der bis Kanal 80 reicht. Dazu ist eine elektronische Verstärkung der Drahtsignale um Faktor 450 notwendig.
- Die Elektronik soll möglichst unempfindlich gegen äußere Störsignale sein.

In der Elektronik der BDC gibt es einen analogen und einen digitalen Zweig der Elektronik: Um Kosten zu sparen, werden nicht die Signale jedes einzelnen Drahtes in den FADCs digitalisiert. Statt dessen werden die Signale von acht Drähten, die sich auf gleichem Radius befinden, analog addiert und die Summe den FADCs zugeführt (Abbildung 3.21). Dabei wird angenommen, daß im allgemeinen die Teilchendichte pro Ereignis so gering ist, daß nur einer der Drähte ein Signal gibt oder daß zwei Signale von verschiedenen Drähten zumindest in der Driftzeit gut getrennt sind. Um nun trotzdem zu wissen, von welchen Drähte das Signal stammt, wird in einem Digitalzweig der Elektronik eine Speicherstelle markiert, die dem Draht zugeordnet ist. Dieser Vorgang wird im Kapitel 3.3.4 „Die Digitalelektronik der BDC“ beschrieben.

Abbildung 3.21 Die Signale der gestrichelt dargestellten Drähte, die sich auf gleichem Radius befinden, werden analog addiert.

3.3.3.1 Die Verstärkerkette

Die Analogelektronik wurde in der Elektronikwerkstatt des Physikalischen Instituts der Universität Heidelberg entwickelt [Rus94].
Die gesamte Verstärkerkette für einen Zähldraht vom Draht bis zum FADC ist in Abbildung 3.22 zu sehen. An der BDC befindet sich der Vorverstärker, der das Signal vom Draht 30fach verstärkt. Der Transistor BFQ29 ist als Basisstufe und der Transistor BFR92 als Emitterfolger geschaltet. Sie bilden den wesentlichen Teil des Verstärkers. Das IC NE592 erzeugt ein Differenzsignal, was die Störunempfindlichkeit der Signalübertragung zum *Linereceiver* erhöht. Insgesamt stellt der Vorverstärker einen Breitband-Spannungsverstärker dar. Das Differenzsignal wird über etwa 30 m lange paarweise abgeschirmte *Twisted Pair* Kabel zum Elektronikwagen des H1-Detektors geführt. Der Linereceiver verstärkt das Signal um den Faktor 15 und dient zusätzlich der Impedanzanpassung. Das negative Signal gelangt zum Komparator des WDMBs, der das erste Glied im Digitalzweig darstellt. Das positive Signal gelangt zum *Summierermodul*, wo es mit den Signalen der sieben anderen Drähte addiert wird. Hier ist der Verstärkungsfaktor 1, und die Gesamtverstärkung beträgt also 450. Das Summensignal gelangt dann wieder als Differenzsignal zum FADC. Ein FADC nimmt die Signale von 16 Summierern auf.
Der Linereceiver, das Summierermodul und das WDMB befinden sich im sogenannten *Electronic Carrier* oder *Turntable*.
Die Kabel, die den Vorverstärker an der BDC mit den Turntables Elektronikwagen verbinden, sind in Abbildung 3.23 zu sehen. Sie weisen eine Trennung am sogenannten *Kabelbahnhof* auf, um die BDC leichter installieren zu können. Der Kabelbahnhof befindet sich am Rand des H1-Detektors.

Abbildung 3.22 Die Verstärkerkette

Abbildung 3.23 Die Kabel vom Detektor zum Elektronikwagen mit Signal- und Hochspannungsleitungen.
Oben: kurze Kabel vom Detektor zum Kabelbahnhof; unten: lange Kabel vom Kabelbahnhof zum Elektronikwagen.

3.3.3.2 Der FADC 1001

Im Gegensatz zum einfachen ADC (Analog Digital Converter) digitalisiert ein FADC (Flash-ADC) die anliegenden Signale zu vielen dicht aufeinanderfolgenden Zeitpunkten und legt die gemessenen Werte in einem internen Speicher ab. Auf ein äußeres Triggersignal hin wird die Digitalisierung angehalten, und der Speicher kann ausgelesen werden (*Common Stop Mode*; im *Common Start Mode* wird die Digitalisierung durch das Triggersignal gestartet. Dieser Modus wird hier aber nicht benutzt). Der hier verwendete FADC 1001 wurde am DESY entwickelt. Er hat 16 Kanäle, und die Signale müssen als Differenzsignal vorliegen. Die Digitalisierungsrate beträgt 104 MHz. Für jeden Kanal hat der FADC eine Speichertiefe von 256 Bins, die je ein Byte groß sind. Bei der gegebenen Digitalisierungsrate wird also alle 9,6 ns ein neues Bin gefüllt, und der FADC enthält die Signale der vergangenen 2,46 µs. Der dynamische Bereich des FADCs beträgt ±2 Volt. Die Kennlinie ist nichtlinear und kann mit folgender Funktion beschrieben werden:

$$A(U) = \frac{a \cdot 256 \cdot U}{2560 + b \cdot U}$$

A(U): Signalhöhe in FADC-Einheiten
U: Amplitude des Eingangsignals in Volt

Durch die Nichtlinearität erhält man den dynamischen Bereich eines linearen 10-bit FADCs. Die Konstanten a und b haben die Werte a = 3,75 und b = 2,72, wodurch sich die in Abbildung 3.24 gezeigte Kennlinie ergibt [Wil94]. Aufgetragen ist die FADC-Amplitude gegen das positive Spannungssignal am symmetrischen Eingang des FADCs.

Abbildung 3.24 Nichtlineare Kennlinie des FADCs [Wil94]

Der FADC 1001 kann zusätzlich Testpulse erzeugen, die bis zum Vorverstärker an der BDC geführt werden, und dort parallel zum Draht in die Verstärkerkette eingespeist werden. Von dort legt das Pulsersignal denselben Weg wie ein Zähldrahtsignal zurück, was eine Zeitkalibration und zusätzlich einen Test der Elektronik ermöglicht.

3.3.3.3 Das Turntable

Im Turntable befinden sich die Linereceiver, die Summierermodule und die WDMBs. Das Turntable besteht aus einem Standard-Crate an dessen Rückseite sich die mehrlagige Basisplatine befindet (siehe Abbildung 3.25). Von hinten werden oben und unten je 32 Kabel von der BDC zugeführt. Auf der anderen Seite der Basisplatine (innen im Turntable) befinden sich an dieser Stelle die Summierermodule. Je zwei Summierermodule (oben und unten angeordnet) sind über Kabel mit einem FADC verbunden. In der Mitte der Basisplatine befinden sich 32 Steckerleisten, die die Platinen mit den je 16 Linereceivern aufnehmen. An diese Platinen sind die WDMBs angeschraubt. Alle 32 WDMBs eines Turntables sind über eine separate Busplatine miteinander verbunden (siehe Kapitel 3.3.4 „Die Digitalelektronik der BDC“).
Die Leitungen für die Kettenströme und die Temperatursensoren werden auf Steckkontakte auf der Rückseite der Basisplatine geführt.
Eine Übersicht über die prinzipielle Verknüpfung der einzelnen Elemente im Turntable ist in Abbildung 3.26 zu finden. Es enthält symbolisiert die Verstärkerkette aus Abbildung 3.22. Von links kommen die Signale der Zähldrähte; es sind acht der 64 Drähte eines Oktanten eingezeichnet. Es erfolgt eine Impedanzanpassung und eine Vorverstärkung. Dieser Teil befindet sich auf der BDC. Die Signale werden über *Twisted Pair* (TWP) Kabel zum Kabelbahnhof (Interconnection) und von dort über 30 m lange TWP Kabel zum Turntable geführt. Die Signale werden von den Linereceivern im Turntable empfangen. Anschließend erfolgt die Verteilung der Signale auf die Summierer (rechts oben) und die WDMBs (rechts). Der erste Summierer addiert die Signale von dem jeweils ersten Draht der acht Oktanten einer Lage (Oktant n bis Oktant n+7). Der zweite Summierer addiert die Signale der zweiten Drähte dieser acht Oktanten usw. Je acht Summierer sind zu einem Block zusammengefaßt, und die Signale von zwei Blöcken werden von einem FADC gelesen.
Die WDMBs sind das erste Glied im Digitalzweig. Die gesamte Digitalelektronik wird weiter unten vorgestellt. Ein WDMB enthält zwei Gatearrays. Ein Gatearray liest wie dargestellt die Signale von acht benachbarten Zähldrähten eines Oktanten.

Abbildung 3.25 Basisplatine des Turntables; oben: Rückseite, unten: Vorderseite

Abbildung 3.26 Übersicht Turntable

3.3.3.4 Die Auslese der FADCs

Das Auslesen der FADCs wird von einem sogenannten Scanner übernommen. Ein Auslesezyklus hat vereinfacht folgenden Ablauf:

- Im Ruhezustand erhalten die FADCs vom Scanner ein Sample-Signal, das die FADCs veranlaßt, permanent die anliegenden Kammersignale zu digitalisieren und abzuspeichern.
- Wenn die Triggerlogik die Entscheidung zum Auslesen der Daten getroffen hat, wird das Digitalisieren und Speichern angehalten.
- Der Scanner transferiert die FADC-Daten in seinen eigenen Speicher. Um eine hohe Übertragungsgeschwindigkeit zu erreichen, wird nicht der VME-Standard benutzt, sondern ein eigener Standard. Während des Transfers sucht der Scanner über einstellbare Schwellen nach Pulsanfängen und -enden und speichert deren Position in einer separaten Tabelle.
- Die Daten werden von den Prozessoren in den FADC-Crates aus den Scannern gelesen.

3.3.3.5 Temperatur- und Kettenstrommessung

Über die Messung der Temperatur und des Kettenstroms läßt sich der Zustand der BDC beurteilen. Die Temperatur wird über einen Spannungsteiler aus zwei Widerständen gemessen, von denen der eine temperaturabhängig ist (Abbildung 3.27 links). Diese Widerstände befinden sich auf der Platine des Vorverstärkers auf dem Rand der BDC.
Der Kettenstrom wird von einem Widerstand innerhalb des Hochspannungsteilers abgegriffen (siehe Hochspannungsteiler, Abbildung 3.19).
Auf der Rückseite des Turntables werden die Leitungen für die Temperatur- und Kettenstrommessung nach außen geführt (Abbildung 3.25). Die Pinbelegung der Stecker wird in Abbildung 3.27 rechts gezeigt. An diese Stecker sind ADCs angeschlossen, die sich im VME-Master-Crate befinden und von den Programmen der Slowcontrol überwacht werden.

Abbildung 3.27 Steckverbindungen für Temperatur- und Kettenstrommessung
links: Temperaturmessung über einen temperaturabhängigen Widerstand
rechts: Pinbelegung der Stecker für Temperatur- und Kettenstrommessung auf der Rückseite des Turntables.

3.3.4 Die Digitalelektronik der BDC

Der Digitalteil der BDC-Auslese hat die Aufgabe, zu bestimmen, welche der acht Drähte auf demselben Radius in der BDC ein Ereignis registriert haben. Da die Signale von je acht Drähten addiert werden bevor sie in die FADCs gelangen, geht im Analogteil der Auslese die Information über die Herkunft des Signals verloren.
Die Digitalelektronik wurde vom 2. Physikalischen Institut der Universität Hamburg und dem 1. Physikalischen Institut der RWTH Aachen für die Auslese der Streamerkammer des H1-Detektors entwickelt [Tut91]. Bis auf geringe Änderungen wurde die Elektronik so für die BDC übernommen.
Prinzipiell funktioniert die Digitalelektronik folgendermaßen (Abbildung 3.28):
Die von den Zähldrähten kommenden Signale werden über Komparatoren geführt. Diese entscheiden, ob die Signalspannung über einer Referenzspannung liegt. Jedem Draht ist ein 32 Bit tiefer FIFO (First In First Out) Speicher zugeordnet, *Pipeline* genannt. Wenn die Signalspannung die Referenzspannung überschreitet, wird das erste Bit der Pipeline auf 1 gesetzt andernfalls auf 0. Die Bits werden nach jedem Bunchcrossing (BC), dessen Zeitpunkt durch die HERA-Clock angezeigt wird, um eine Stelle weiter geschoben. Erreicht ein Bit den Ausgang der Pipeline, geht es verloren. Die Pipelines enthalten also die Information darüber, welcher Draht wann innerhalb der letzten 32 Bunchcrossings ein Signal registriert hat. Dabei muß natürlich die Referenzspannung so eingestellt werden, daß sie nicht vom Rauschen überschritten wird, echte Signale aber klar erkannt werden.

Abbildung 3.28 Prinzip der Digitalauslese

Wenn nun die Triggerlogik des H1-Detektors entscheidet, daß ein Ereignis registriert werden soll, so wird dies auch der Digitalelektronik mitgeteilt. Daraufhin werden die Pipelines angehalten und die Auslese der Pipelines gestartet. Der Inhalt der Pipelines wird nun solange Bit für Bit zum Ausgang geschoben, bis die Bits den Ausgang erreichen, die zu Ereignissen in der Kammer gehören. Diese relevanten Bits liegen immer an derselben Stelle in der Pipeline und werden gemeinsam über das Ausgangs-Schieberegister ausgelesen. Das Weiterschieben und Auslesen des Pipelineinhalts erfolgt so lange, bis alle relevanten Bits den Ausgang erreicht haben. Die Anzahl der ausgelesenen Bits ist gleich der Zahl der Bunchcrossings, die während der längstmöglichen Driftzeit in den Zelle vorkommen können.

3.3.4.1 Die Pipelines und das WDMB

Um Platz zu sparen, wurden die Pipelines für acht Datenkanäle und die zugehörige Logik auf einem Gate-Array untergebracht. Zwei solcher Gate-Arrays befinden sich zusammen mit den Komparatoren auf den sogenannten *Wire Digital Module Boards* (WDMBs), deren Schaltplan in Abbildung 3.29 zu sehen ist. Links werden die Signale der Drähte, wie sie vom Linereceiver zur Verfügung gestellt werden, herangeführt. Es folgen die Komparatoren; je zwei befinden sich in den Bausteinen U1 bis U9. Daneben sieht man die beiden Gate-Arrays. Rechts oben befindet sich ein Operationsverstärker (U5), der die als Differenzsignal anliegende Referenzspannung in ein einfaches negatives Signal umwandelt und durch 10 teilt. Die Referenzspannung am Komparator kann im Bereich von 0 bis -255 mV eingestellt werden. Die Bausteine U12 bis U19 sind Leitungstreiber. Die WDMBs werden an die Linereceiver angeschraubt und mit diesen in das Turntable gesteckt. Um die Pipelines gemeinsam auslesen zu können, sind die Ausgangs-Schieberegister der WDMBs über einen *Digital Bus* miteinander verbunden, was in Abbildung 3.30 gezeigt ist. Dieser Bus befindet sich nicht auf der Basisplatine des Turntables, sondern wird zusätzlich auf die WDMBs gesteckt. Über ihn laufen neben den Daten der Pipelines außerdem die Steuersignale für das Auslesen der WDMBs und die Referenzspannung. Eine Besonderheit des Busses ist in Abbildung 3.31 dargestellt: Da die Ausgänge der Schieberegister auf den WDMBs auf Pin 3 und 4 der Busstecker liegen und die Eingänge auf Pin 1 und 2, müssen die entsprechenden Leitungen des Busses wie gezeigt verdreht werden, um zu gewährleisten, daß der Ausgang eines Schieberegister mit dem Eingang des folgenden verbunden ist.

Abbildung 3.29 Schaltplan der WDMBs

Abbildung 3.30 Verbindung der WDMBs untereinander

Abbildung 3.31 Busverbindung für die WDMBs

3.3.4.2 Die Steuerung der Digitalauslese

Wie aus Abbildung 3.30 ersichtlich ist, benötigen die WDMBs eine Reihe von Steuersignalen zum Auslesen der Pipelines und zum Anwählen verschiedener Auslesemodi. Außerdem müssen die ausgelesenen Daten weitergeleitet und die Referenzspannung zur Verfügung gestellt werden. Diese Aufgabe wird von einem *Readout Controller* (ROC) übernommen, der über den VME-Bus angesprochen wird. Die Verbindung zwischen dem ROC und dem Digital Bus wird durch ein *Bus Terminal* hergestellt. Ein *Readout Distributor* (ROD) versorgt die ROCs mit der HERA Clock und mit verschiedenen Trigger- und Steuersignalen, die Auskunft darüber geben, ob die Pipelines gefüllt, ausgelesen oder gestoppt werden sollen. Diese Signale erhält der ROD vom VME-STC-Crate. Sie können aber auch vom ROD selbst erzeugt werden, um das Auslesesystem getrennt von der H1-Elektronik verwenden zu können.

3.3.4.3 Der Test der Digitalelektronik

Um das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten der Digitalelektronik einfach testen zu können, wurde folgendes Verfahren entwickelt: Die Leitungen *Dat_Out* des Digitalbuses sind mit dem Anfang der Schieberegisterkette verbunden (Eingang SI des ersten WDMBs, siehe Abbildung 3.30). Damit können die Schieberegister stellvertretend für Signale von den Drähten mit einem beliebigen Bitmuster gefüllt werden. Beim Auslesen sollte man wieder dieses Bitmuster erhalten, andernfalls existiert ein Fehler im Digitalteil.
Ein LabVIEW-Programm führt diesen Test mit vier verschiedenen Bitmustern durch. Ein einfaches Auslesen beim Betrieb mit Kammersignalen kann mit einem weiteren Programm erfolgen. Dieses Programm wurde z. B. beim Test der Prototypen eingesetzt.

Da dieses Kapitel nur einen einführenden Überblick geben soll, sei noch einmal auf die Literatur verwiesen: [Tut91], [Ges90].

3.3.5 Das Crate-Layout im Elektronikwagen

Der Vollständigkeit halber sei hier eine sehr kurze Übersicht über das gesamte VME-Crate-Layout gezeigt (Abbildung 3.32).

Abbildung 3.32 Übersicht über das VME-Crate-Layout [Tut94]

Die Karten in den Crates haben folgende Funktionen:

VME Master Crate

MacVEE:	Interface zum Macintosh.
Fic:	Master Prozessor, der den lokalen *Event Builder* darstellt. Er kommuniziert mit der *Central Data Acquisition* (Central Daq) und über die MacVEE-Karte mit dem Benutzer.
DPM	*Dual Ported Memory*; zusätzlicher Speicherbereich
Taxi:	Interface (optical link) zum *Central Daq Event Builder*.
CAEN A200:	Interface zum HV-Gerät.
Vic:	(Vertical Interconnect) Verbindung der Crates untereinander.
ADCs:	ADCs für Temperatur- und Kettenstrommessung.

VME STC Crate (Subsystem Trigger Controller)

Fic:	Prozessor zum Auslesen der Daten aus den Scannern.
Vic:	Interface zum VME Master Crate.
FanOut:	Interface, das die Signale von den Fast- und Slow Cards an die Subsysteme weiterverteilt.
100Meg	Versorgt Scanner mit der 100 MHz Taktsignal.
Fast Card:	Stellt die Signale vom zentralen Trigger-System zur Verfügung oder erzeugt sie lokal selber.
Slow Card:	Wie Fast Card, aber für langsame Signale.
Logic Card:	Verbindung zwischen den Scannern und den STC-Prozessoren.
PLL:	Erzeugung der 100 MHz-Clock mit einer Phase Lock Loop.
Tribi	Trigger-Bit; Information vom zentralen Trigger über den aktuellen Triggerstatus

CTC ist der *Central Trigger Controller* und VSB der *VME Subsystem Bus*

In Abbildung 3.33 sieht man die Anordnung der Komponenten in den Schränken des Elektronikwagens.

Abbildung 3.33 Anordnung der Komponenten in den Schränken des Elektronikwagens

4. Überwachung von Hochspannung und Strömen

4.1 Aufgaben

An die von der BDC benötigten Hochspannungen (auch HV genannt) werden folgende Anforderungen gestellt:

- Die gewünschten Spannungen müssen konstant gehalten werden.
- Die Ströme müssen überwacht werden. Das ermöglicht neben der Temperatur- und Kettenstrommessung einen schnellen Überblick über den Zustand der Kammer.
- Eine starke Zunahme eines Stromes deutet auf einen Defekt in der Kammer hin. Um größeren Schaden zu vermeiden muß die Spannung schnell abgeschaltet werden.
- Beim Ausschalten einer Spannung müssen auch andere Spannungen, die zur selben Kammer gehören, ausgeschaltet werden, weil es sonst zu Funkenüberschlägen innerhalb der Kammer kommen kann.
- Ein nur geringfügiges Überschreiten eines vorgegeben Stromes soll dem Benutzer gemeldet werden. Ein sofortiges Abschalten ist aber noch nicht gewünscht, weil dies die eventuelle Fehlersuche erschweren würde.
- Das Hochfahren einer Spannung erfolgt in mehreren Stufen (siehe Abbildung 4.1). Nachdem die Spannung um einen bestimmten Betrag erhöht wurde, wird eine kurze Zeit gewartet, bevor die Spannung weiter erhöht wird. Während dieser Wartezeit wird der Ausgangsstrom gemessen und zusammen mit der Ausgangsspannung gespeichert. Wenn in einer Kammer ein Fehler auftritt, kann durch dieses Verfahren ermittelt werden, bei welcher Spannung das geschieht. (Zusätzlich soll während der Wartezeit der Kettenstrom gemessen werden. Diese Funktion konnte bisher aber noch nicht implementiert werden.)
- Alle wichtigen Zustände und Zustandsänderungen müssen automatisch protokolliert werden.
- Die Hochspannungsversorgung, die sich im Elektronikwagen befindet, muß vom H1-Kontrollraum aus gesteuert werden können. Grundsätzliche Funktionen wie z. B. das Ein- und Ausschalten der Hochspannungen muß auch die Schichtbesatzung ohne spezielle Kenntnisse auslösen können.

Abbildung 4.1 Verlauf des Hochfahrens der Hochspannung

Die gestellten Anforderungen werden prinzipiell folgendermaßen gelöst:
Die Hochspannungsgeräte sind mikroprozessorgesteuert und werden von einem Computer (Apple Macintosh) überwacht. Das Steuerprogramm im Macintosh ist in der Programmiersprache LabVIEW geschrieben, das C-Routinen für die zeitkritischen Aufgaben enthält. In den folgenden Kapiteln wird dieses Konzept detailliert beschrieben.

4.2 Das Hochspannungssystem CAEN SY127

Die Hochspannungen werden von dem Hochspannungsgerät *High Voltage System SY127* der Firma CAEN (Costruzioni Apparecchiature Elettroniche Nucleari in Viareggio/Italien) zur Verfügung gestellt. Dieses Gerät wurde speziell für die Spannungsversorgung von Detektoren der Hochenergiephysik wie Drahtkammern, Photomultiplier usw. entwickelt und findet bei H1 schon beim Central Tracker Verwendung. Es besteht aus einem *Control-Modul*, verschiedenen *HV-Modulen* und einem *Communication-Controller*. Das Control-Modul enthält einen Mikroprozessor (INTEL 8085A), der die HV-Module steuert und überwacht. HV-Module werden für Spannungen von bis zu ±15 kV und in Abhängigkeit von der Spannung für Ströme bis zu 3 mA angeboten. Bis zu 10 dieser HV-Module, die wiederum bis zu 4 HV-Ausgänge haben, können von einem Control-Modul überwacht werden. Die Bedienung erfolgt über die Folientastatur an der Frontplatte, die aber nur eine eingeschränkte Funktionalität hat, oder über ein VT52-Terminal, das über eine RS232C-Schnittstelle mit dem HV-Gerät verbunden ist. Für eine komfortablere Steuerung besteht die Möglichkeit, das Gerät von einem Computer über ein VME-Interface zu steuern. Hiervon wurde bei der Hochspannungsversorgung der BDC Gebrauch gemacht. Bis zu 100 HV-Geräte können in Reihe geschaltet und so gemeinsam überwacht werden. Zur Sicherheit gibt es noch einen Optokoppler, um die Signalleitungen des Computers galvanisch vom HV-Gerät zu trennen.
Für die BDC werden 80 Hochspannungskanäle benötigt. Eine Lage eines Pakets der BDC wird gemeinsam mit U_{DI}, U_{ZI}, U_{DA}, U_{ZA} und U_H versorgt. Es gibt acht Lagen und zwei Pakete, was zu 80 Kanälen führt.
Jedem Kanal des Hochspannungsgeräts können zwei Spannungen (V0 und V1) und zwei Ströme (I0 und I1) zugeordnet und wechselseitig angewählt werden. Hier werden aber nur V0 und I0 benutzt.

Abbildung 4.2 zeigt die Verbindung der einzelnen Elemente untereinander:

Abbildung 4.2 Aufbau und Ansteuerung des HV-Geräts

Die *Micron-Card* im Macintosh und die *MacVEE-Card* im VME-Crate bilden den Adreßraum des VME-Busses in den Macintosh ab. Die beiden Karten sind über zwei 60adrige Flachbandkabel miteinander verbunden. Die *A200-Card* bildet das Interface vom VMEbus zum CAEN SY127 und ist an dieses Gerät über ein einfaches LEMO-Kabel angeschlossen. Optional kann der Reset-Eingang des HV-Geräts über ein LEMO-Kabel mit einer Input/Output-Karte im VME-Crate verbunden werden. Damit läßt sich ein Reset des HV-Geräts über das Steuerungsprogramm auslösen.

Wie oben erwähnt, müssen nach einem automatischen Abschalten eines Kanals wegen Überstroms auch alle anderen Hochspannungen derselben Kammer abgeschaltet werden. Zu diesem Zweck stellt das HV-Gerät eine Hardwarelösung zur Verfügung: Auf der Rückseite des HV-Geräts gehört zu jedem Kanal ein zusätzlicher *Trip-Kontakt* (Abbildung 4.3). Die Trip-Kontakte der Kanäle, die in dem genannten Fall gemeinsam abgeschaltet werden sollen, werden mit kurzen zweiadrigen Kabeln verbunden. Auf diese Weise erfolgt das gemeinsame Abschalten innerhalb 1 µs. Die weiter unten beschriebene Möglichkeit, die Kanäle wegen Überstroms softwaremäßig durch das Steuerprogramm abschalten zu lassen, hat demgegenüber den Nachteil, daß der Vorgang mehrere Sekunden dauern kann.

Abbildung 4.3 Verwendung des Trip-Kontaktes
oben: HV-Modul auf der Rückseite des HV-Geräts; unten: Verbindung mehrerer Tripkontakte

Es wurden umfangreiche Langzeittests durchgeführt, um die Funktionssicherheit zu überprüfen. Dabei stellte sich heraus, daß bei kontinuierlicher Kommunikation mit dem HV-Gerät dieses nach einiger Zeit nicht mehr antwortet. Diese Ausfälle traten abhängig von der Zugriffsrate schon nach wenigen Minuten oder erst nach einigen Stunden auf. Die Dauer der Ausfälle war unterschiedlich lang: Meistens reagierte das Gerät auf nur einen Zugriff nicht und war beim nächsten wieder ansprechbar. Allerdings traten auch längere Unterbrechungen von bis zu 15 Stunden auf. In Zusammenarbeit mit dem Hersteller stellte sich heraus, daß es sich um einen Fehler im Steuerprogramm des HV-Gerätes handelte. Das machte einen Austausch der EPROMs, auf denen sich das Programm befindet, notwendig. In der nun verwendeten Version 6.5 ist dieser Fehler behoben.

4.3 Das Programm *HVControl 2.0*

Zur Steuerung und Überwachung der Hochspannungsgeräte wurde ein Programm entwickelt, das im Folgenden vorgestellt wird. Das Programm erfüllt zusammen mit den HV-Geräten die oben gestellten Anforderungen an Funktionalität und Betriebssicherheit. Ein wichtiges Ziel des Programms ist es, jedem Physiker auf Schicht auf einfache Weise die Bedienung des Hochspannungsgeräts zu ermöglichen.
Das Programm ist in der Programmiersprache *LabVIEW* geschrieben. Eine Einführung in diese Programmiersprache ist weiter unten zu finden.

4.3.1 Die Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche (Frontpanel) des Programms *HVControl 2.0* ist in Abbildung 4.4 zu sehen.

Abbildung 4.4 Frontpanel von *HVControl 2.0*

Das Programm wird durch anklicken des Pfeilsymbols links oben auf dem Frontpanel gestartet (nicht abgebildet).

In die Tabelle *Channel Value Input* werden die Parameter eingetragen, die an das Hochspannungsgerät übertragen werden. Jede Zeile enthält die Werte für einen einzelnen Kanal. Die Spalten haben folgende Bedeutung:

- Memo: Ein Kürzel, das den Kanal beschreibt (z. B. „U DI“ für „Driftspannung innen“).
- U: Sollspannung in Volt.
- I start: Strom in µA, der beim Hochfahren der Spannung maximal fließen darf, bevor eine Warnung ausgegeben wird.
- I fail: Strom in µA, der im Normalbetrieb maximal fließen darf, bevor eine Warnung ausgegeben wird. Der Benutzer muß entscheiden, ob es sich um tolerable Stromschwankungen handelt oder ob in der Kammer ein Fehler aufgetreten ist.
- I max: Strom in µA, bei dem das Hochspannungsgerät die Spannung automatisch abschaltet (Trip).
- RampUp: Geschwindigkeit in V/s, mit der die Spannung hochgefahren wird.
- RampDn: Geschwindigkeit in V/s, mit der die Spannung heruntergefahren wird.

Die Tabelle *Channel Value Output* enthält die Werte, die das Hochspannungsgerät dem Programm übermittelt:

- Memo: In diese Spalte werden die Memo-Eintragungen der Tabelle *Channel Value Input* übernommen.
- U mon: Hier wird die tatsächlich am Ausgang anliegende Spannung angezeigt.
- I mon: Und hier der am Ausgang gemessene Strom.
- Status: In dieser Spalte wird der Status angezeigt, in dem sich der zugehörige Kanal befindet. Es gibt folgende Zustände, wobei auch mehrere gleichzeitig vorkommen können:
  - RUp (Ramp up): Die Spannung dieses Kanals wird hochgefahren.
  - RDn (Ramp down): Die Spannung dieses Kanals wird heruntergefahren.
  - OvV (Overvoltage): Die am Ausgang gemessene Spannung ist höher als die Sollspannung.
  - UnV (Undervoltage): Die gemessene Spannung ist niedriger als die Sollspannung.
  - OvC (Overcurrent): Der gemessene Strom ist größer als der maximal zulässige.
  - Trip: Wegen Überstrom hat das Hochspannungsgerät diesen Kanal ausgeschaltet.

Im Fenster *State* wird dargestellt, in welchem Teil des Programms sich *HVControl* befindet.
Der Schalter *HV* ist der Hauptschalter, mit dem alle Kanäle gemeinsam ein- oder ausgeschaltet werden. *Non-Zero output* zeigt an, daß an mindestens einem Ausgang eine Spannung anliegt. Am Hochspannungsgerät befindet sich ein Schalter *HV ENABLE*, mit dem alle Kanäle ausgeschaltet werden können, unabhängig davon, ob der programmierte Zustand Ein oder Aus ist. Die Stellung dieses Schalters wird durch die Lampe *HV-Enable* auf dem Frontpanel des Programms angezeigt.
Die Lampen *HV Ramp*, *Plateau* und *HV-endvalue reached* zeigen beim Hochfahren der Spannung an, in welcher Phase des Hochfahrens sich das Programm befindet. In der Plateauphase des Hochfahrens werden die Spannung und der Strom am Ausgang gemessen und im Fenster *Plateau-Monitor* dargestellt. Die Anzeige der Kettenströme befindet sich in Vorbereitung.
Das Fenster *Date-Time* enthält das aktuelle Datum und die aktuelle Uhrzeit.
Im Fenster *Error Record* werden die während des Betriebs aufgetretenen Fehler aufgelistet. Die zugehörige Lampe blinkt bei einem neu aufgetretenen Fehler und kann mit dem Knopf *Acknowledge* wieder ausgeschaltet werden.

Die weiteren Knöpfe haben folgende Funktionen:

- *Channel Type*: Öffnet ein Fenster, das die für jeden Kanal maximal verfügbare Spannung und den maximal verfügbaren Strom auflistet. Diese hängen von den in das HV-Gerät eingeschobenen HV Modulen ab.
- *Group Assignm.*: Wenn ein Kanal trippt, kann es notwendig sein, daß auch andere Kanäle abgeschaltet werden müssen. In dem mit diesem Knopf geöffneten Fenster können Kanäle zu Gruppen zusammengefaßt werden, die gemeinsam ausgeschaltet werden, wenn ein Kanal trippt.
- *Options*: Öffnet ein Fenster zum Einstellen verschiedener Betriebsparameter.
- *Info*: Das hiermit geöffnete Fenster enthält kurze Angaben über das Programm (z. B. die Versionsnummer).
- *Preferences*: Öffnet ein Fenster, das die zum Betrieb notwendigen Parameter enthält, die schon beim Start des Programms bekannt sein müssen (z. B. Basisadressen usw.)
- *Fill Input Table*: Hiermit läßt sich die Eingabe vereinfachen, wenn die Tabelle *Channel Value Input* mit vielen identischen Werten gefüllt werden soll.
- *Reset A200*: Führt ein Reset der A200-Karte und des VME-Busses durch.
- *Reset SY127*: Wenn der Reset-Eingang des HV-Gerätes mit einer Input/Output-Karte verbunden ist, läßt sich mit diesem Knopf ein Reset des HV-Gerätes auslösen. Dabei werden alle Ausgänge ausgeschaltet.
- *Quit*: Beendet das Programm.

Eine genauere Anleitung für die Benutzung des Programms *HVControl* ist im Anhang zu finden.

4.3.2 Das Zustandsdiagramm von *HVControl 2.0*

Das Programm *HVControl 2.0* ist so organisiert, daß es verschiedene Zustände annimmt und dadurch den Ablauf steuert und auf äußere Bedingungen reagiert.
Die Zustände, in denen sich das Programm befinden kann, sind in Abbildung 4.5 gezeigt. Nach dem Start beginnt das Programm damit, alle gespeicherten Parameter von der Festplatte zu lesen und die Variablen auf definierte Werte zu setzen. Danach wird ein Reset des A200-Interfaces und des VME-Busses ausgeführt und getestet, ob eine Verbindung zum Hochspannungsgerät SY127 besteht. Wenn das der Fall ist, werden an dieses alle Parameter übermittelt (*Initialisation of SY127*).
Der Hauptteil des Programms besteht aus einer Schleife (*Eventloop*), die erst durch drücken der *Quit*-Taste verlassen wird:
In dieser Schleife wird zuerst die Tabelle *Channel Value input* gelesen und die Werte, die sich seit dem letzten Schleifendurchlauf geändert haben, an das HV-Gerät übermittelt.
Als nächstes wird die Stellung des HV-Schalters abgefragt. Wenn sich diese seit dem letzten Schleifendurchlauf geändert hat, wird die Hochspannung ein- bzw. ausgeschaltet. Während das Ausschalten in einem Schritt d. h. innerhalb eines Schleifendurchlaufs geschieht, benötigt das Einschalten wegen des Hochfahrens in Stufen mehrere Schleifendurchläufe. Dieses Verfahren wurde gewählt, um die Ausführung parallel ablaufender Prozesse nicht zu behindern. Die verschiedenen Zustände, in denen sich die Spannungssteuerung befinden kann, sind mit *State 0* bis *State 6* bezeichnet. Zu Beginn jedes Schleifendurchlaufs wird entschieden, ob die Bedingungen zur Beendigung eines Zustands erfüllt sind, und deshalb ein anderer Zustand eingenommen werden kann, oder ob der gegenwärtige Zustand noch weiter erhalten bleibt.
Es existieren folgende Zustände:

- **State 0:** Schalte HV aus. Falls der HV-Schalter auf *on* gestellt wird, ist der nächste Zustand State 1, andernfalls State 0.
- **State 1:** Schalte HV ein und gehe zu State 2.
- **State 2:** Setze die Spannung auf die nächste Stufe und gehe zu State 3.
- **State 3:** Warte solange, bis die am Ausgang gemessene Spannung mit der eingestellten übereinstimmt, und gehe dann zu State 4. Wegen der Spannungstoleranzen darf nur auf eine ungefähre und nicht auf eine exakte Übereinstimmung geprüft werden.
- **State 4:** Das Plateau ist erreicht. Zeichne Ausgangsspannung, Ausgangsstrom und Kettenstrom auf. Gehe dann zu State 5.
- **State 5:** Falls die Endspannungen erreicht worden sind, ist die Anstiegsphase beendet, und der nächste Zustand ist State 6. Andernfalls wird das Ansteigen fortgesetzt (State 2).
- **State 6:** Die Endspannungen sind erreicht. Nächster Zustand ist wieder State 6.

Falls der HV-Schalter von *on* nach *off* geschaltet wird, ist der nächste Zustand in jedem Fall State 0 unabhängig vom anliegenden Zustand.
Im weiteren Verlauf der Schleife *Eventloop* werden nun die aktuellen Parameter vom HV-Gerät gelesen und in die Tabelle *Channel Value Output* eingetragen.
Die gemessenen Ströme *IMon* werden mit den unter *Ifail* eingetragenen Werten verglichen. Falls *IMon* größer ist als *Ifail*, erscheint eine Warnung im Fenster *Error Record*.
Das *Protection-Byte* wird gelesen, um festzustellen, ob sich das HV-Gerät im Alarm- oder Tripzustand befindet.
Am Schluß der Schleife *Eventloop* befindet sich eine kurze Warteschleife. Da der Zugriff auf das HV-Gerät sehr zeitintensiv ist und es sich dabei um *Exclusiv-Tasks* handelt, die vom Macintosh nicht unterbrochen werden, steht für andere Prozesse nur sehr wenig Rechenzeit zur Verfügung. Diese Warteschleife reduziert diesen nachteiligen Effekt etwas. Allerdings darf die Warteschleife auch nicht zu lang sein, weil dann das Programm *HVControl* nicht schnell genug auf unerwartete Ereignisse im HV-Gerät reagieren kann.

Da LabVIEW die Multitaskingfähigkeit des Macintoshs unterstützt, kann parallel zur *Eventloop* eine weitere Schleife ausgeführt werden, die *Read-Button-Loop*. In ihr wird der Zustand der verschiedenen Knöpfe überwacht und eine Funktion ausgeführt, wenn der zugehörige Knopf gedrückt wurde. Falls die *Quit*-Taste gedrückt wird, verläßt das Programm die Mainloop und führt die Quit-Routine aus. Hier werden die Werte aus der Eingabetabelle auf Festplatte gespeichert. Falls die Hochspannung eingeschaltet ist, wird gefragt, ob sie ausgeschaltet werden soll. Außerdem kann hier angegeben werden, daß auch LabVIEW beendet werden soll.

Parallel zur *Mainloop* laufen zwei weitere Schleifen ab: Die *Timer-Loop* und die *Check SY127-Error-Loop*. Die erste wird zweimal pro Sekunde durchlaufen und liefert so die Blinkfrequenz für die *Error LED*. Außerdem aktualisiert sie Zeit und Datum im entsprechenden Fenster. Die zweite Schleife überwacht den Zustand einer lokalen Variablen. In ihr wird der Fehlercode gespeichert, den die Funktionen zurückliefern, die auf das HV-Gerät zugreifen. Falls ein Fehler aufgetreten ist, sorgt diese Schleife dafür, das er im *Error-Record*-Fenster angezeigt wird.

Abbildung 4.5 Zustandsdiagramm von HVControl 2.0

4.3.3 Die Installation von *HVControl 2.0* und die Datei *HVControl.Init*

Beim Start des Programms werden verschiedene Betriebsparameter von der Festplatte gelesen. Alle Betriebsparameter stehen in der Datei *HVControl.Init*. Damit diese Datei auch schon beim ersten Start von *HVControl 2.0* existiert, gibt es das Programm *HVControl.Install*, das die Datei *HVControl.Init* anlegt. Die Datei ist in Abbildung 4.6 zu sehen. Um die Wartung zu vereinfachen, hat sie folgenden Aufbau: Die einzelnen Parameter sind zu Gruppen zusammengefaßt, deren Gruppenname in eckigen Klammern steht. Dann folgen die Parameter, denen hinter dem Gleichheitszeichen ein Wert zugeordnet wird. Kommentare beginnen mit „*“. Wenn rechts von einem Gleichheitszeichen keine Eintragungen stehen (z. B. bei Channel05 bis Channel07 in der Gruppe [GroupTable]), bedeutet dies, daß dem zugehörigen Parameter kein Wert zugeordnet ist.
Damit die Datei von LabVIEW aus einfach zu schreiben und zu lesen ist, existieren die Funktionen *WriteInitString* und *ReadInitString*, die im Anhang beschrieben sind.

```
[Preferences]
Micron Slot = C
MacVee Crate Number = 0
A200 Address = 200000
CAEN Crate Number = 1
Number of Channels = 32
IO-Card Address = C1FEC000
Output Channel = 3

[Options]
Step = 4000
Keyboard = enabled

[Channel Values]
*Contents of Table "Channel Value Input"
*ChannelNo = Memo;U;I start;I fail;I max;RampUp;RampDn
Channel00 = U ZI;1000;200;200;300;20;500;
Channel01 = U ZA;1000;200;200;300;20;500;
Channel02 = U ZI;1000;200;200;300;20;500;
Channel03 = U ZA;1000;200;200;300;20;500;
Channel04 = U ZI;1000;200;200;300;20;500;
Channel05 = U ZA;1000;200;200;300;20;500;
Channel06 = U ZI;1000;200;200;300;20;500;
Channel07 = U ZA;1000;200;200;300;20;500;

[GroupTable]
*Contents of Table "Group Assignment"
Channel00 = 0;1;2;
Channel01 = 0;1;2;
Channel02 = 0;1;2;
Channel03 = 0;1;2;
Channel04 = 0;1;2;
Channel05 =
Channel06 =
Channel07 =
```

Abbildung 4.6 Die Datei *HVControl.Init*

4.3.4 LabVIEW: Ein graphikorientiertes Programmiersystem

4.3.4.1 Allgemeines

LabVIEW ist eine graphikorientierte Entwicklungsumgebung im Gegensatz zu den bekannten textorientierten Programmiersprachen und dient vornehmlich der Steuerung externer Geräte. Die Benutzeroberfläche der in LabVIEW geschriebenen Programme ähnelt den Frontplatten technischer Geräte, so daß der Benutzer den Eindruck erhält, er bediene das Gerät direkt und nicht über einen Computer. Die LabVIEW-Programme heißen somit auch *Virtuell Instruments* (VIs). Der Hersteller von LabVIEW, *National Instruments* in Austin (Texas), bietet für viele Meßinstrumente fertige VIs an.

LabVIEW hat folgende wesentliche Eigenschaften:

- Es existieren viele Ein- und Ausgabefenster, die Controls und Indicators genannt werden, wie z. B. Schalter, Taster, Drehknöpfe, Schieberegler, zwei- und dreidimensionale Graphiken usw. Abbildung 4.7 zeigt einige Beispiele.
- Die verschiedenen Elemente lassen sich einfach und schnell auf der Benutzeroberfläche anordnen und können ebenso einfach vom Programm aus angesprochen werden. So lassen sich auch aufwendige Oberflächen problemlos erstellen.
- Das Programmieren ist relativ einfach, weil nicht die oft komplizierte Syntax einer textorientierten Programmiersprache gelernt werden muß, sondern das Programm durch Verbinden von Symbolen mit Linien entsteht. Außerdem entfällt viel Schreibarbeit.

Abbildung 4.7 Beispiele für Controls und Indicators

LabVIEW hat aber folgende Nachteile:

- Es wird nicht konsequent zwischen Programmierung und Benutzung getrennt, so daß der Benutzer unbeabsichtigt in den eigentliche Programmcode eingreifen kann.
- Große Programme werden trotz der Verwendung von Unterprogrammen (SubVIs) sehr schnell unübersichtlich. Z. B. liegen bei If-Bedingungen die Symbole für die True- und die False-Anweisung auf dem Bildschirm voreinander, so daß die eine Anweisung die andere vollständig überdeckt und nur einer der beiden Fälle zur gleichen Zeit gesehen werden kann. Bei der Ausgabe des Programms auf einem Drucker erscheinen logisch zusammenhängende Programmteile oft auf unterschiedlichen Seiten. Bedingt durch die Verwendung graphischer Symbole benötigen auch Programmteile mit wenig Inhalt verhältnismäßig viel Platz.
- Eine Erweiterung großer Programme ist oft nur schwer möglich. Es kann nicht wie in anderen Programmiersprachen einfach eine neue Programmzeile eingefügt werden, sondern es muß erst durch Verschieben der schon vorhandenen VIs „Platz geschaffen werden“.

- Die Fehlersuche wird nur sehr eingeschränkt unterstützt: Breakpoints können nur zu Beginn und nicht innerhalb eines VIs gesetzt werden, und das Anzeigen von Variablenwerten während der Laufzeit erfolgt nur sehr langsam. Außerdem werden entweder alle Variablenwerte angezeigt oder keine. Es existieren zwar *Probes*, aber die zeigen den Variablenwert nur zu einem bestimmten Zeitpunkt und nicht ihre Veränderung während der Laufzeit an. Ein Einzelschrittmodus ist aber möglich.

Die LabVIEW-Version 3.0.1 enthält gegenüber den Vorgängerversionen folgende wichtige Neuerungen:

- Es gibt nun lokale Variablen, was unter LabVIEW bedeutet, daß die Werte von Controls und Indicators an beliebig vielen Stellen im Programm verändert werden können.
- Attribute Nodes ermöglichen, das Aussehen von Controls und Indicators zu manipulieren. So können diese z. B. ausgeblendet oder grau (nicht benutzbar) dargestellt werden.
- Der Debugger wurde verbessert, so daß nun der Programmfluß leichter zu verfolgen ist. Oben genannte Nachteile existieren aber nach wie vor.
- Zahlen können dezimal, hexadezimal, binär und oktal eingegeben werden.

4.3.4.2 Programmieren unter LabVIEW

LabVIEW-Programme bestehen immer aus der erwähnten Benutzeroberfläche (*Panel*) und dem eigentlichen Programmcode (*Block-Diagram*). Ein einfaches Beispiel soll die Art des Programmierens unter LabVIEW erläutern:

Abbildung 4.8 Front Panel und Block Diagram von *MinMax1*

Von zwei Variablen soll die größere als *Max* und die kleinere als *Min* zurückgegeben werden. Also befinden sich auf dem Panel (Abbildung 4.8 links) zwei Eingabefelder (Controls) *Var1* und *Var2* und zwei Ausgabefelder (Indicators) *Max* und *Min*. Die Felder des Panels werden durch gleichnamige Symbole im Diagram (Abbildung 4.8 rechts) repräsentiert (*DBL* bedeutet Fließkommazahl mit doppelter Genauigkeit). Der Datenfluß innerhalb des Programms wird durch Linien symbolisiert, die von Controls ausgehen und zu Unterprogrammen (SubVIs) oder Indicators führen. Ein Unterprogramm wird genau dann ausgeführt, wenn an allen Eingängen die Daten zur Verfügung stehen. Außerdem kann das Programm durch for- und while-Schleifen, if- und case-Fallunterscheidungen usw. gesteuert werden. In dem vorliegenden Beispiel werden zuerst die Eingabefelder *Var1* und *Var2* gelesen und deren Werte sowohl dem SubVI *Greater?* als auch der Fallunterscheidung *True/False* zur

Verfügung gestellt. *Greater?* wird somit sofort ausgeführt und liefert abhängig von den Eingangsvariablen den Boolean-Wert *True* oder *False* zurück, auf den die Fallunterscheidung noch wartet. Daraufhin wird das obere (True) bzw. untere Kästchen (False) der Fallunterscheidung ausgeführt und der Variablen *Max* der Wert von *Var1* und *Min* der Wert von *Var2* übergeben bzw. umgekehrt. (Die Kästchen für die Fallunterscheidung liegen nur beim Ausdruck untereinander. Auf dem Bildschirm überdecken sie sich gegenseitig.)
Grundlegende VIs wie z. B. *Greater?* stellt LabVIEW in einer umfangreichen Bibliothek zur Verfügung. Ebenso kann dieses Beispielprogramm als SubVI eingesetzt werden (es existiert aber ebenfalls schon in der LabVIEW-Bibliothek).
Die Bedingung, daß jedes VI genau dann ausgeführt wird, wenn alle Eingabeparameter anliegen, deutet schon darauf hin, daß LabVIEW multitaskingfähig ist. Auf die damit verbundene Schwierigkeit beim Ansteuern von externer Hardware wird weiter unten eingegangen.

4.3.4.3 Die Einbindung von C-Programmen (CIN)

LabVIEW bietet die Möglichkeit, Programme aus anderen Programmiersprachen einzubinden. Da davon im Rahmen dieser Arbeit intensiv Gebrauch gemacht wurde, soll obiges Beispiel zur Veranschaulichung als C-Programm neu geschrieben werden. LabVIEW stellt dazu ein *Code Interface Node* (CIN) zur Verfügung, das ein externes C-Programm repräsentiert. Die zweite Version von *MinMax* ist in Abbildung 4.9 gezeigt. Dem CIN werden wie jedem normalen VI auch Variablen übergeben, die es an das C-Programm weitergibt. Ebenso können Variablen vom C-Programm an das LabVIEW-Programm zurückgegeben werden. Als C-Programmiersprache wurde THINK C von *Symantech* verwendet. Der C-Code und sein Header-File für das Beispielprogramm ist in Abbildung 4.10 zu finden. Der Code muß neben anderen Funktionen die Funktion *CINRun* enthalten, die während der Laufzeit von LabVIEW aufgerufen wird. In die Funktion *CINRun* kann der gewünschte C-Code geschrieben werden. Da beim Aufruf des C-Codes während der Laufzeit viele LabVIEW-spezifischen Informationen ausgetauscht werden, muß das File *extcode.h,* das die LabVIEW-spezifischen Makros definiert, in den C-Code eingebunden werden. Die oben genannten Funktionen liefern einen Fehlercode (meistens *noError*) zurück, mit dem LabVIEW über eventuell aufgetretene Fehler bei der Ausführung des C-Codes informiert wird. Das C-Programm wird als Coderessource übersetzt und anschließend in LabVIEW eingebunden (näheres siehe Handbücher [Lab93]).

Abbildung 4.9 Front Panel und Block Diagram von *MinMax2*

```
/*
 * Code Interface Node header file "CIN_MinMax.h"
 */

CIN MgErr CINInit(void);
CIN MgErr CINDispose(void);
CIN MgErr CINAbort(void);

CIN MgErr CINRun(float64 *var1, float64 *var2,
                 float64 *max, float64 *min);

CIN MgErr CINLoad(RsrcFile rf);
CIN MgErr CINUnload(void);
CIN MgErr CINSave(RsrcFile rf);
```

```
/*
 * Code Interface Node file "CIN_MinMax.c"
 */

#include <extcode.h>
#include "CIN_MinMax.h"

CIN MgErr CINInit(void) { return noErr; }
CIN MgErr CINDispose(void) { return noErr; }
CIN MgErr CINAbort(void) { return noErr; }

CIN MgErr CINRun(float64 *var1, float64 *var2,
                 float64 *max, float64 *min)
{
     if (*var1 > *var2)
     {
          *max = *var1;
          *min = *var2;
     }
     else
     {
          *min = *var1;
          *max = *var2;
     }
     return noErr;
}

CIN MgErr CINLoad(RsrcFile rf) { return noErr; }
CIN MgErr CINUnload(void) { return noErr; }
CIN MgErr CINSave(RsrcFile rf) { return noErr; }
```

Abbildung 4.10 C-Code des Beispielprogramms *MinMax2*

4.3.5 Aufbau und Module des Programms *HVControl 2.0*

Das Lesen und Schreiben der Parameter des HV-Geräts erfolgt über das A200-Interface auf folgende Weise:

- Setzen von Parametern:
  Auswählen eines Kanals oder einer Gruppe von Kanälen.
  Prüfen, ob ein Fehler aufgetreten ist.
  Parameter setzen.
  Prüfen, ob ein Fehler aufgetreten ist.

- Lesen von Parametern:
  Auswählen eines Kanals oder einer Gruppe von Kanälen.
  Prüfen, ob ein Fehler aufgetreten ist.
  Parameter lesen.
  Prüfen, ob ein Fehler aufgetreten ist.

Bei einem eventuell aufgetretenen Fehler liefert das HV-Gerät einen Fehlercode zurück, anhand dessen erkannt werden kann, um welchen Fehler es sich handelt. Eine Programmbibliothek, die die oben genannten Sequenzen zum Lesen und Schreiben der Geräteparameter enthält, haben wir vom DESY in Hamburg erhalten [Cla93]. Diese Bibliothek enthält neben LabVIEW-VIs sowohl PASCAL- als auch C-Code. Um die Wartung zu erleichtern und unsere Programme insgesamt einheitlich zu gestalten, wurden diese Teile der Bibliothek ganz nach C umgeschrieben und ihre Struktur überarbeitet und vereinfacht.
Beim Zugriff auf das HV-Gerät muß gewährleistet sein, daß das Programm es erkennt, wenn das HV-Gerät nicht reagiert, und nicht endlos auf eine Antwort wartet (*Timeout*-Erkennung). Es stellte sich heraus, daß die Zeit, die das Programm dem HV-Gerät zur Reaktion gewährt, bevor es davon ausgeht, daß ein Timeout vorliegt, von der Geschwindigkeit des Rechners abhängt, auf dem das Programm läuft. Der von uns verwendete Rechner war so schnell, daß er ein Timeout annahm, obwohl das HV-Gerät nur die Verarbeitung der Daten noch nicht beendet hatte. Aus diesem Grund und weil Programme grundsätzlich maschinenunabhängig sein sollten, wurden die Timeoutroutinen angepaßt. Nun wird ein Timeout gemeldet, wenn das HV-Gerät nicht nach 5 Sekunden auf ein Kommando reagiert hat.
Falls der Macintosh das nicht eingeschaltete VME-Crate anzusprechen versucht, wird das Programm normalerweise sofort unterbrochen und der Prozessor meldet ein *BusError-Exception*. Das führt zu einem Absturz des Rechners. Um dies zu verhindern, war in der Bibliothek ein *Buserror Handler* implementiert, der weiterentwickelt wurde [Feu94]. Beim Auftreten eines Bus-Errors wird dies dem Programm gemeldet und der Zugriff auf das VME-Crate beendet, ohne daß es zu weiteren Störungen kommt.

Die Bibliothek stellt nun folgende VIs zur Verfügung. Auf viele von ihnen greift das Programm *HVControl* zu; der Vollständigkeit halber sind sie aber alle erwähnt:

- **A200Reset:** Führt ein Reset des VME-Crates und des A200 Interfaces aus.
- **AssignChanneltoGroup:** Verschiedene Kanäle lassen sich zu Gruppen zusammenfassen, die dann gemeinsam ein- und ausgeschaltet und deren Spannungen und Ströme gemeinsam eingestellt werden können.
- **ClearAlarm:** Ein eventueller Alarmzustand wird aufgehoben, falls die Ursache des Alarms nicht mehr existiert. Ein Alarmzustand tritt ein, wenn das HV-Gerät einen Überstrom oder eine Überspannung am Ausgang erkennt.
- **Create SY127 Address:** Bildet aus der Nummer des Slots, in dem die Micron-Card steckt, aus der VME-Crateadresse und aus der Nummer des HV-Gerätes die Gesamtadresse für den Zugriff

auf das HV-Gerät und speichert sie in der globalen Variablen *g_SY127_address*. Diese Funktion muß aufgerufen werden, bevor die Kommunikation mit dem HV-Gerät beginnt.

- **DisableKeyboard:** Sperrt die Benutzung der Tastatur auf der Frontplatte des HV-Gerätes.
- **DisablePassword:** Sperrt die Benutzung eines Paßwortes. Die Eingabe des Paßwortes kann nur über ein VT52-Terminal erfolgen.
- **DisablePowerOnReStart:** Beim Einschalten des HV-Gerätes und nach einem Hardware-Reset werden an den HV-Ausgängen keine Spannungen angelegt.
- **EnableKeyboard:** Ermöglicht die Benutzung der Tastatur auf der Frontplatte des HV-Gerätes.
- **EnablePassword:** Ermöglicht die Benutzung eines Paßwortes. Die Eingabe des Paßwortes kann nur über ein VT52-Terminal erfolgen.
- **EnablePowerOnReStart:** Beim Einschalten des HV-Gerätes und nach einem Hardware-Reset werden an den HV-Ausgängen die Sollspannungen angelegt.
- **ReadChannelType:** Gibt den Typ der eingesteckten HV-Module zurück.
- **ReadGroupAssignment:** Gibt die Gruppenzuordnung zurück.
- **ReadI0:** Liest den eingestellten Wert für den maximal zulässigen Strom I0.
- **ReadI1:** Liest den eingestellten Wert für den maximal zulässigen Strom I1.
- **ReadIMON:** Liest den momentan am Ausgang anliegenden Strom aus.
- **ReadIScaling:** Gibt an, in welcher Einheit der Strom gemessen wird (z. B. 1/10 µA, 1 µA usw.)
- **ReadProgrVersion:** Liest die benutzte Version des CIN-Codes.
- **Read Protection:** Liest ein Statusbyte, das für das gesamte HV-Gerät gilt und dessen Bits folgende Bedeutung haben:

  Bit 0 Power On Restart
  Bit 1 Password enable
  Bit 2 Keyboard enable
  Bit 3 Alarm (OvV, UnV, Trip in any channel)
  Bit 4 if 0, V0 active; if 1, V1 active
  Bit 5 if 0, I0 active; if 1, I1 active
  Bit 6 Alarm (same as Bit 3)
  Bit 7 HV-Enable

- **ReadRampDown:** Liest die eingestellte Geschwindigkeit (in V/s), mit der die Spannung heruntergefahren wird.
- **ReadRampUp:** Liest die eingestellte Geschwindigkeit (in V/s), mit der die Spannung heraufgefahren wird.
- **ReadStatus:** Liest ein Statusbyte, das jedem einzelnen Kanal zugeordnet ist und dessen Bits folgende Bedeutung haben:

  Bit 0 OFF
  Bit 1 Trip
  Bit 2 ON
  Bit 3 Over-Voltage
  Bit 4 Under-Voltage
  Bit 5 Over-Current
  Bit 6 Ramp-up
  Bit 7 Ramp-down

- **ReadTripTime:** Liest die Zeitdauer in ms, die ein Überstrom maximal anliegen darf, bis das HV-Gerät den betreffenden Kanal abschaltet.
- **ReadV0:** Liest die Sollspannung V0.
- **ReadV1:** Liest die Sollspannung V1.
- **ReadVMON:** Liest die momentan am Ausgang anliegende Spannung.

- **ReadVScaling:** Gibt an, in welcher Einheit die Spannung gemessen wird (z. B. 1/10 V, 1 V usw.)
- **RemoveChannelfromGroup:** Entfernt Kanäle aus Gruppen.
- **Select Channel:** Wählt einen Kanal aus, für den die nächsten Schreib- und Leseoperationen gelten.
- **SelectGblAbsGrp:** Wählt eine Gruppe aus, für deren Mitglieder die nächsten Schreib- und Leseoperationen gelten.
- **SelectGblRelGrp:** Wählt eine Gruppe aus, für deren Mitglieder die nächsten Schreib- und Leseoperationen gelten. Im Gegensatz zu *SelectGblAbsGrp* bewirken die folgenden Schreiboperationen keine absolute Spannungs- und Stromeinstellung, sondern eine relative Änderung.
- **Set SY127 Address:** Alte Version von *Create SY127 Address*. Wurde nur aus Kompatibilitätsgründen aufgenommen.
- **SetI0:** Setzt den maximalen Strom I0.
- **SetI1:** Setzt den maximalen Strom I1.
- **SetRampDown:** Setzt die Geschwindigkeit (in V/s), mit der die Spannung heruntergefahren wird.
- **SetRampUp:** Setzt die Geschwindigkeit (in V/s), mit der die Spannung heraufgefahren wird.
- **SetTripTime:** Schreibt die Zeitdauer in ms, die ein Überstrom anliegen darf, bis das HV-Gerät den betreffenden Kanal abschaltet.
- **SetV0:** Setzt die Sollspannung V0.
- **SetV1:** Setzt die Sollspannung V1.
- **TurnHVOff:** Schaltet den Kanal aus.
- **TurnHVOn:** Schaltet den Kanal ein.

Alle oben genannten VIs rufen das VI *Call_SY127* auf und übergeben ihm bis zu vier Parameter (Abbildung 4.11). Dieses VI enthält einen CIN, der die C-Funktionen, die das HV-Gerät steuern, aufruft. Vorher fügt *Call_SY127* den vier möglichen Parametern die Basisadresse des HV-Geräts hinzu. Die C-Funktionen befinden sich in der C-Code-Bibliothek. Damit die richtige C-Funktion aufgerufen wird, ist einer der übergebenen Parameter der *Selector*, der für jede Funktion einen anderen Wert annimmt. (In der Abbildung nimmt der Selector die Werte 2, 7 bzw. 8 an.) Die anderen Parameter enthalten z. B. Werte, die an das HV-Gerät übertragen werden sollen. Nachdem die C-Funktionen das HV-Gerät angesprochen haben, liefern sie eine Variable *Output* zurück. Diese enthält bei Funktionen, die vom HV-Gerät lesen, den gelesenen Wert, oder bei einem aufgetretenen Fehler den Fehlercode. Diese Variable wird zurück an das aufrufende VI übermittelt. Eine detaillierte Beschreibung des Zugriffs auf das HV-Gerät mit einem Beispiel ist im Anhang zu finden.

Abbildung 4.11 Struktur der Programmbibliothek zur Ansteuerung des HV-Geräts. Oben sind drei Funktionen abgebildet, die die Funktion *Call_SY127* aufrufen. Sie enthält einen C-Code, der die Funktionen in der eigentlichen Bibliothek über einen *Selector* auswählt. Letztere Funktionen kommunizieren mit dem HV-Gerät.

Neben den oben aufgeführten stehen drei weitere VIs zur Verfügung, die einige der codiert vorliegenden Informationen über den SY127 als String ausgeben:

- **Decode ChannelType:** Wandelt die Information aus der Funktion *ReadChannelType* in einen String um.
- **Decode Error:** Wandelt die von allen obigen Funktionen als Integer-Zahl zurückgelieferte Fehlermeldung in einen String um.
- **Status to String:** Wandelt die Information aus der Funktion *ReadStatus* in einen String um.

Das Lesen und Setzen eines Parameters im HV-Gerät erfolgt wie oben erwähnt in mehreren Schritten. Wegen der Multitaskingfähigkeit des Apple Macintoshs kann es vorkommen, daß dabei eine Funktion von einer anderen unterbrochen wird, bevor sie die Kommunikation beendet hat. Zwar liegt jedem dieser Schritte eine C-Routine zugrunde, deren Unterbrechung LabVIEW grundsätzlich nicht zuläßt, allerdings kann die Unterbrechung zwischen den C-Routinen erfolgen. Um dies zu verhindern wurde das Prinzip der sogenannten *Semaphoren* verwendet: Bevor eine Funktion die Kommunikation mit dem HV-Gerät beginnt, fordert sie einen Semaphor an, den sie nach Beendigung wieder zurückgibt. Diesen Semaphor erhält sie aber nur, solange er von keiner anderen Funktion beansprucht wird. Dadurch wird eine zeitliche Überschneidung von Zugriffen auf das HV-Gerät verhindert. Die Implementierung des Semaphor-Konzepts geschieht mit folgenden Funktionen:

- **InitSemaphore:** Erzeugt einen neuen Semaphor.
- **WaitSemaphore:** Übergibt den Semaphor, wenn er frei ist, an die aufrufende Funktion.
- **SignalSemaphore:** Gibt den Semaphor nach Gebrauch wieder zurück.

Eine genaue Beschreibung ist im Anhang zu finden.

5. Tests mit den Prototypen II und IIa

Um das zu erwartende Verhalten der BDC kennenzulernen, wurde der Prototyp II gebaut und im H1-Detektor installiert. Die Tests mit diesem Prototyp halfen, Fehler zu erkennen und die Elektronik zu verstehen. Außerdem konnte die Auslesesoftware unter realen Bedingungen getestet und weiterentwickelt werden. Vor Inbetriebnahme des Prototyps II wurde die Analog- und Digitalelektronik mit dem Prototyp IIa in Heidelberg getestet. Im Folgenden sollen die verschiedenen Arbeiten und Tests vorgestellt werden.

Die Prototypen II und IIa sind verkleinerte Versionen der BDC. Die Oktanten reichen bis zu einem Radius von etwa 29 cm. Sie bestehen aus einer Doppellage mit je 13 Zähldrähten. (Siehe Abbildung 5.1)

Abbildung 5.1 Ein Oktant der Prototypen II und IIa. Eingezeichnet sind die Drähte auf den beiden Seiten des Oktanten (--- bzw. —)

5.1 Tests mit dem Prototypen IIa in Heidelberg

Der Prototyp IIa ist der erste Typ, der die Randplatinen mit den Feldformungs-Elektroden enthält. Der Test dieser Kammer und insbesondere die Untersuchung der Ansprechwahrscheinlichkeit in der Randzone wird im Kapitel 6 beschrieben.
Beim Anlegen von Hochspannung an die mit der Gasmischung Argon/Isobutan/Ammoniak (92,5% / 5% / 2,5%) gefüllten Kammer kam es zu Überschlägen innerhalb der Kammer. Auf den Seitenplatinen der Wiremodule befinden sich um die Lötstellen herum, an denen die Zähldrähte befestigt sind, Ringe, die auf Masse gelegt sind. Das soll verhindern, daß Kriechströme auf der Seitenplatine den Zähldraht beeinflussen. Die Masseleitung zu diesen Ringen hatte allerdings einen zu geringen Abstand zu den Driftelektroden im Deckel des Oktanten, so daß es bei der Inbetriebnahme der Kammer dort zu Überschlägen kam. Durch Überdecken der kritischen Stellen mit Kaptonfolie konnten diese Störungen beseitigt werden. Bei der BDC wurde der Abstand zwischen

Masseleitung und Driftelektroden vergrößert, so daß bei ihr nicht mit diesen Störungen zu rechnen ist.
Danach wurde die ganze Auslesekette mit Turntable, FADC und Macintosh aufgebaut, wie es in Abbildung 5.2 zu sehen ist. Dabei wurde nur eine Lage des Oktanten mit 13 Zähldrähten ausgelesen.

Abbildung 5.2 Der Aufbau für den Prototyp-Test. Exemplarisch ist nur einer von 13 Auslesekanälen eingezeichnet.

Bei der Inbetriebnahme des Turntables, in dem sich der Linereceiver und der Summierer befinden, wurde starkes Rauschen auf den Signalleitungen beobachtet. Die Rauschspannung von über 100 mV war vergleichbar mit der Signalspannung. Es stellte sich heraus, daß die dünnen Masseleitungen auf den Verstärkerplatinen an der Kammer zu hochohmig waren. Durch Anbringen von niederohmigen Massedrähten konnte die Rauschspannung auf etwa 30 mV reduziert werden.
Bei der Überprüfung der Verstärkerkette zeigte sich, daß die Verstärkung zu gering war und der Linereceiver zu früh in die Begrenzung ging, so daß am FADC maximal 400 mV anlagen. Vorgesehen ist aber, daß Signale aus der Kammer den FADC-Bereich von 2 V voll ausschöpfen. Durch Modifikation der verstärkungsbestimmenden Widerstände konnte die Verstärkung für den Test auf folgende Werte eingestellt werden:

	Verstärkung
Vorverstärker V140	30
Linereceiver V141	15
Summierer A297	0,8

Die Dynamik des Linereceivers konnte kurzfristig für den Testaufbau durch Einfügen eines Transistors erweitert werden, so daß die maximale Spannung am FADC nun 800 mV beträgt. Der Transistor konnte zusammen mit den zugehörigen Widerständen auf die Platine aufgelötet werde. Für die BDC mußte der Linereceiver aber überarbeitet und ein neues Platinenlayout erstellt werden. Der neue (hier noch nicht verwendete) Linereceiver schöpft die Dynamik des FADCs von 2 V voll aus.

Die Digitalauslese wurde wie in Abbildung 5.3 gezeigt aufgebaut. Die Funktionsweise der Digitalauslese wurde schon in Kapitel 3.3.4 „Die Digitalelektronik der BDC“ beschrieben.

Abbildung 5.3 Testaufbau der Digitalauslese

Bei diesem Test wurden kosmische Myonen beobachtet. Dazu wurde eine Seite des Prototyps gänzlich durch einen Szintillator abgedeckt. Auf der anderen Seite bedeckte ein kleiner Szintillator nur den Bereich der beiden größten Zellen des Prototyps. An die Szintillatoren waren Photomultiplier angeflanscht. Eine Koinzidenzschaltung zwischen diesen lieferte ein einfaches Triggersignal.
Der Test des Prototypen IIa war gleichzeitig die erste Möglichkeit, im Rahmen des BDC-Projekts den Digitalzweig mit einer Kammer zu testen. Zur Auslese des Digitalzweiges wurde das Programm *DigDaq* verwendet. Dieses Programm startete über die Input/Output-Karte den Gate-Generator, dessen Ausgang das *Pipeline Enable*-Signal lieferte. Der Digitalzweig begann nun mit dem Füllen der Pipelines in den WDMBs. Die Zeitkonstante des Gate Generators war gegenüber der Ereignisrate sehr groß. Nach Eintreffen eines Triggersignals wurde der Ausgang des Gate-Generators inaktiv, worauf die Pipelines angehalten und ihr Inhalt ausgelesen wurden. Die Daten konnten On-Line angesehen oder auf die UNIX-Workstation transferiert werden, um sie dort Off-Line zu analysieren.
Es wurden umfangreiche Tests durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit der modifizierten Verstärkerstufen und Digitalkomponenten zu überprüfen. Abbildung 5.4 zeigt das Ergebnis einer solchen Messung mit etwa 8000 Triggerereignissen. Im Bild a) sieht man, wie sich die Ereignisse auf die Pipelines verteilen. Auf der Abszisse ist die Nummer der Pipeline aufgetragen und auf der Ordinate die insgesamt in ihnen gefundenen Einträge. Jedem Zähldraht ist eine Pipeline zugeordnet, und da nur die Drähte 12 und 13 von beiden Szintillatoren abgedeckt wurden, findet man auch nur in den Pipelines 12 und 13 wesentliche Einträge.
Bild b) zeigt, wo die Ereignisse innerhalb der Pipelines lagen (Occupancy). Je später ein Ereignis auftrat, um so weiter wurde es durch die Pipeline geschoben. Auf der Abszisse sind die 32 Bins der Pipelines aufgetragen. Der Inhalt aller Pipelines wurde hier überlagert. Die Ereignisse konzentrieren sich in den fünf Bins 22 bis 26. Da alle 96 ns ein neues Bin gefüllt wird, entsprechen fünf Bins etwa dem maximalen Driftzeitunterschied $\Delta t \approx 400$ ns, den die Elektronen bei einem Driftweg von 1,5 cm in der großen Zelle haben können. Da der Teilchendurchgang nämlich nicht mit dem Taktsignal der Pipeline korreliert ist, hat die Breite der Occupancy einen Fehler von ±1 Bin. Bei H1 wird der Pipelineinhalt im Takt der HERA-Clock weitergeschoben.

In Bild c) ist zu sehen, daß am häufigsten ein oder zwei Bins von einem Ereignis belegt wurden. Häufig sind aber auch keine Einträge in den Pipelines zu beobachten. In diesen Fällen wurde auf Rauschen getriggert.

Abbildung 5.4 Inhalt der Pipelines der WDMBs
a) Anzahl der Ereignisse pro Draht, die in der zugehörigen Pipeline gefunden wurden
b) Inhalt der 32 Pipelinebins. Alle Pipelines wurden übereinandergelagert.
c) Anzahl der Bins, die in einer Pipeline gleichzeitig gesetzt waren.

5.2 Tests mit dem Prototypen II bei H1

Der Prototyp II besteht aus acht Oktanten, die paarweise nebeneinander und in vier Ebenen hintereinander angeordnet sind. Seine Oktanten entsprechen dem Prototyp IIa (Abbildung 5.1), nur daß sie keine Feldformungselektroden haben. Der Prototyp II wurde gebaut, um unter realen H1-Bedingungen die Funktionsfähigkeit der Kammer und der Elektronik zu überprüfen und die Ausleseprogramme zu testen. Dazu wurde die Kammer, vom Wechselwirkungspunkt aus gesehen, hinter das BEMC im H1-Detektor eingebaut (Abbildung 5.5). Im Folgenden werden einige der Meßergebnisse exemplarisch vorgestellt, um die Betriebsfähigkeit der Kammer zu demonstrieren. Dieser Test bei H1 war auch der erste Feldtest des Slowcontrol-Systems.

Abbildung 5.5 Prototyp II in seiner Testposition im H1-Detektor
oben: Blick von außen in Richtung Vertex
unten: Blick von oben

Die Komponenten der Verstärkerkette und der Digitalelektronik sind dieselben wie die, die für den Test des Prototypen IIa benutzt wurden. Die Auslese der FADCs erfolgt über einen Scanner, so wie es im Kapitel 3.3.3.4 für die BDC beschrieben wurde.
Bedauerlicherweise gab es bei H1 Ausfälle einzelner Oktanten, die darauf zurückzuführen sind, daß die Prototypkammer unter großem Zeitdruck fast ungetestet eingebaut werden mußte. Zum einen gab es Überschläge innerhalb der Kammer, weshalb die entsprechenden Bereiche ausgeschaltet werden mußten. Aus Zeitgründen konnte der Prototyp aber noch nicht geöffnet werden, so daß eine definitive Analyse der Fehler noch aussteht. Zum anderen waren einige der Kabel zwischen Kammer und

Turntable defekt. Dadurch erhielt die Kammer entweder keine Hochspannung oder die Signale der Drähte erreichten nicht das Turntable. Als schwächste Stelle am Kabel erwiesen sich die Stecker, bei denen durch mechanische Einwirkung Lötstellen brachen. In der Version für die BDC erhalten die Kabelstecker zum Schutz ein stabiles Gehäuse.
Exemplarisch zeigt Abbildung 5.6 die Ereignisrate in drei Oktantenlagen während eines HERA-Runs. Aufgetragen ist die Zahl der Ereignisse pro Sekunde gegen die Drahtnummer. Die Schwelle am Diskriminator war dabei mit 226 mV sehr hoch eingestellt. Zu sehen ist die erwartete Zunahme der Rate hin zu kleinen Radien.

Abbildung 5.6 Ereignisrate in drei Oktantenlagen während eines HERA-Runs
Aufgetragen ist die Rate in Hz gegen die Drahtnummer (der innerste Draht hat die Nummer 0)

Da in der Testphase nur ein Turntable zur Verfügung stand, mußte die Addition der Zähldrahtsignale etwas modifiziert werden: Es wurden die Signale von den Drähten addiert, die in einer Lage auf demselben Radius liegen. (Das entspricht der Addition in der BDC, nur daß eine Lage aus zwei Oktanten und nicht aus einem Vollkreis besteht.) Zusätzlich wurden die Signale von entsprechenden Drähten aus zwei Lagen zusammengefaßt und den FADCs zugeführt, wie es in Abbildung 5.7 zu sehen ist. Jeder Kanal in einem FADC enthält also die Information von vier Zähldrähten.
Im Folgenden werden einige grundlegende Verteilungen gezeigt, die am Anfang der Datennahme in gemacht wurden, und welche die Funktionsfähigkeit der Kammer demonstrieren. Später wurden am DESY auch Teilchendurchgänge mit externem Trigger registriert und rekonstruiert. Zusätzlich wurde der Untergrund bestimmt [Tut94]. Abbildung 5.8 zeigt drei typische Pulse, wie sie in den FADCs gefunden wurden. Diese und alle folgenden Messungen sind während des Betriebs von HERA gemacht worden.

Abbildung 5.7 Addition der Zähldrahtsignale beim Prototypen II
(Blick von unten auf das Strahlrohr; der Vertex liegt links)

Abbildung 5.8 Drei typische Pulse in den FADCs während eines HERA-Runs

Die 16 Kanäle der vier FADCs wurden der Reihe nach von 0 bis 63 durchnumeriert. Als Triggersignal wurde willkürlich das Signal aus Kanal 20 (das ist der fünfte Kanal des zweiten FADCs) gewählt, das über einen Diskriminator geführt wurde. In Abbildung 5.9 ist die Anzahl der Trigger aufgetragen, bei denen ein Puls im FADC-Kanal gefunden wurde. Es sind klar die Drahtsignale der vier Doppellagen zu sehen, in denen die Hitrate jeweils von den Drähten bei kleinen Radien zu denen bei großen Radien abfällt. Kanal 20, auf den getriggert wurde, hat natürlich die höchste Ereigniszahl.

Abbildung 5.9 Histogramm der Ereignisse in den Analogkanälen

Das Histogramm des Pulshöhenspektrums in FADC-Einheiten zeigt Abbildung 5.10. Die Spitze bei 170 FADC-Einheiten entsteht durch die erwähnte begrenzte Dynamik des Linereceivers. 170 Einheiten entsprechen etwa 800 mV. Der Ausläufer jenseits des Peaks wird durch Störungen in den Komponenten erzeugt, die auf den Linereceiver folgen.

Abbildung 5.10 Pulshöhenspektrum in FADC-Einheiten

Der Inhalt der Digitalkanäle ist in Abbildung 5.11 histogrammiert. Je 64 Kanäle entsprechen den 16 Kanälen eines FADCs, wobei die Kanäle [0, 16, 32, 48], [1, 17, 33, 49] usw. des Digitalzweiges zu je einem Kanal des Analogzweiges gehören. Die große Spitze in der Abbildung ist auf Rauschen zurückzuführen. Die Spitzen in den Kanälen 68 und 100 korrespondieren mit dem Trigger, der ja vom fünften Kanal des zweiten FADCs abhängt.
Im Bereich der Kanäle 32 bis 63 und 112 bis 127 erkennt man an den fehlenden Einträgen die ausgefallenen oder nicht betriebsbereiten Lagen wieder.

Abbildung 5.11 Histogramm der Inhalte der Digitalkanäle

Die Belegung der Pipelines (Occupancy) ist in Abbildung 5.12 histogrammiert. Gegenüber der Messung in Heidelberg (Abbildung 5.4b) konzentrieren sich die Ereignisse wegen der Synchronisation mit der HERA-Clock nun auf etwa drei bis vier Bins in der Pipeline.

Abbildung 5.12 Inhalt der Pipelines (Occupancy)

Trotz der erheblichen Beeinträchtigung der Kammerfunktion durch Hochspannungs- und Kabelprobleme und eines hohen Rauschniveaus konnte die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der Kammer demonstriert und wichtige Erkenntnisse für notwendige Verbesserungen bei der BDC gewonnen werden. Die Hochspannungssteuerung und -überwachung hat sich bewährt, und das Auslesesystem konnte getestet und im Zuge der Tests erheblich verbessert und komplettiert werden.

6. Test der Feldformungs-Elektroden

6.1 Effizienz im Randbereich

Wie schon in Kapitel 3.3.2.1 diskutiert, ist eine der Ursachen für eine geringere Effizienz der Driftzellen im Randbereich die Inhomogenität des Driftfeldes. Die BDC und der Prototyp IIa enthalten Randelektroden, die das Feld homogenisieren sollen. Inwieweit dadurch tatsächlich eine Verbesserung eintritt, kann durch einen Vergleich mit dem Prototyp I ermittelt werden, der die Randelektroden nicht enthält, aber sonst gleich aufgebaut ist.
Es wird zwischen Seiten- und Randplatinen unterschieden: Die Seitenplatinen sind die seitliche Begrenzung der Wiremodule; an ihnen sind die Zähldrähte befestigt. Die Randplatinen liegen vor den Seitenplatinen (siehe auch Abbildung 3.17). Auf ihnen befinden sich die Feldformungselektroden, die hier untersucht werden.
Bisher wurde der Randbereich des Prototyps I experimentell untersucht und der Feldverlauf in den Driftzellen mit Hilfe des Programms MAFIA berechnet [Wer94]. In Abbildung 6.1 sieht man das elektrische Feld am Rand einer großen Driftzelle. In der Mitte ist in z-Richtung der Draht gespannt, und oben und unten befinden sich die Kathoden. Die Seitenplatine aus GFK wurde als Leiter angenommen. Das ist gerechtfertigt, weil ihre Oberflächenleitfähigkeit größer ist als die des Gases. Die Feldlinien, die die Driftrichtung der Elektronen vorgeben, stehen auf der rechten Seite des Ausschnitts senkrecht auf dem Draht, während sie zum Rand hin immer mehr in Richtung Seitenplatine gekrümmt sind. Die eingezeichnete Linie begrenzt den Bereich, von dem aus keine Elektronen mehr zum Draht driften.

Abbildung 6.1 Feldverlauf in den großen Zellen des Prototyps I (keine Randelektroden) [Wer94]

Weitere Berechnungen zeigen, daß der relativ große ineffiziente Bereich durch das Anbringen von Feldformungselektroden bedeutend verkleinert werden kann (Abbildung 6.2). Diese Elektroden (schwarz gezeichnet) stehen senkrecht auf den Driftelektroden der Basisplatine und befinden sich jeweils auf demselben Potential. Um die Durchstoßpunkte des Drahtes herum sind sie kreisförmig gebogen, um sie dem dort herrschenden elektrischen Feld anzupassen.

Abbildung 6.2 Feldverlauf in einer großen BDC-Zelle mit Feldformung am Sektorrand [Wer94]

Gut zu erkennen ist, daß die Feldlinien nun bis dicht zum Rand senkrecht auf dem Zähldraht stehen.
Diese theoretischen Betrachtungen wurden für den Fall ohne Feldformungselektroden experimentell am Prototyp I verifiziert [Wer94]. Dazu wurde der Prototyp in den Elektronenstrahl 22 am DESY gebracht. Die Elektronen dieses Strahls hatten eine Energie von 3 GeV. Die drei Oktanten des Prototyps waren um je 18° gegeneinander verdreht. Der Aufbau ließ sich so einstellen, daß der Elektronenstrahl senkrecht auf die Oktanten auftraf. Mit den Hits in den Oktanten 1 und 2 wurde die Spur des Elektrons durch die Kammer rekonstruiert. Wenn die Zellen des Oktanten 3, durch die die Spur führt, ein Ereignis registriert haben, so gelten sie an der rekonstruierten Koordinate als effizient.
Die auf diese Weise erhaltene Effizienz der Zelle im Randbereich ist in Abbildung 6.3 zu sehen. Die Kästchengröße ist ein Maß für die Effizienz (siehe unten). Zusätzlich sind alle Spuren (auch die, die nicht vom Oktanten 3 registriert wurden) als Punkte eingezeichnet, um zu belegen, daß die Statistik im Randbereich ausreichend ist. Die Übereinstimmung der Messung mit der Berechnung ist deutlich zu erkennen.

Abbildung 6.3 Effizienz im Randbereich großer Zellen [Wer94]

6.2 Messung der Effizienz

Nachdem die Berechnungen gezeigt hatten, daß sich durch Verwendung von Randelektroden die Effizienz im Randbereich verbessern ließe, wurde dies im Experiment überprüft.
Dazu wurden die drei Oktanten des Prototyps I und der Prototyp IIa, der die Feldformungselektroden enthält, so aufeinander gelegt, daß jeder Oktant gegenüber seinem Nachbarn um 9° verdreht ist (Abbildung 6.4). Der Typ IIa befand sich in der obersten Lage, und sein zu untersuchender Randbereich wurde von den anderen Oktanten überlappt. Spuren durch die Kammern, die von kosmischen Myonen erzeugt wurden, sollten von den drei unteren Oktanten registriert und später rekonstruiert werden. Wenn die Zelle des Prototypen IIa auch diese Spur detektiert hat, gilt sie an der entsprechenden Koordinate als effizient (analog zu dem oben beschriebenen Experiment).
Ober- und unterhalb des Randbereichs befanden sich je zwei nebeneinander liegende Szintillatoren mit Photomultiplier, an die die Triggerlogik angeschlossen war. Wenn einer der beiden oberen Szintillatoren und einer der beiden unteren einen Teilchendurchgang registrierte, mußte das Teilchen zwangsläufig auch durch die dazwischen liegenden Kammern hindurchgeflogen sein. Bei dieser Ereigniskonstellation wurde ein Triggersignal ausgelöst.

Abbildung 6.4 Anordnung der Oktanten
eingezeichnet sind die Zähldrähte der jeweils oberen (---) und unteren(—) Lage und die seitliche Begrenzung der Oktanten.

Die Trigger- und Ausleseelektronik ist in Abbildung 6.5 zu finden. Die Signale der Photomultiplier, die an die Szintillatoren angeflanscht sind, werden auf einen Diskriminator geführt, um logische High/Low-Signalpegel zu erhalten. Danach werden die Signale wie beschrieben miteinander verknüpft. Nach einer Verzögerung von etwa 1,2 µs im Delay gelangt das Signal als Trigger zum Minicontroller. Dieser hat die Aufgabe, die FADCs zu steuern. (Es wurde der bei der BDC schon beschriebene FADC-Typ 1001 verwendet.) Die FADCs digitalisieren permanent die von den Oktanten kommenden Signale. Wenn der Minicontroller ein Triggersignal erhalten hat, wird die Digitalisierung angehalten, und die FADCs werden vom Macintosh über die MacVEE-Karte ausgelesen. Während des Auslesens sendet der Minicontroller ein Vetosignal, das dafür sorgt, daß keine weiteren Triggersignale zum Minicontroller gelangen. Die Verzögerung des Triggersignals ist so eingestellt, daß die Elektronen der Primärionisation Zeit haben, zum Draht zu driften, und die Signale der Zähldrähte schließlich etwa in der Mitte des 2,5 µs tiefen Speicherbereichs der FADCs liegen.
Die Signale eines Szintillators werden zusätzlich von einem FADC gelesen, um später bei der Spurrekonstruktion den Zeitpunkt des Teilchendurchgangs t_0 digitalisiert vorliegen zu haben.
Der Minicontroller hat keine direkte Verbindung zum VME-Bus und wird deshalb über eine Input/Output-Karte angesprochen. Mit den FADCs ist der Minicontroller über den ECL-Bus verbunden.
Das Hochspannungsgerät CAEN SY127 wird über das A200-Interface vom Macintosh gesteuert.

Abbildung 6.5 Trigger- und Ausleseelektronik für den Test der Randelektroden

Das Auslesen und Speichern der Daten und ihre Anzeige On-Line auf dem Bildschirm erfolgt mit einem in LabVIEW geschriebenen Datennahmeprogramm, das auf einem Apple Macintosh läuft. Die Daten werden als sogenannte BOS-Bänke gespeichert und zur Analyse auf eine UNIX-Workstation überspielt. Das BOS-(*Bank Operating System*)-Format wird bei H1 zur Speicherung der Ereignisdaten verwendet. Es definiert die Art der Datenspeicherung in Bänken (Blöcken) innerhalb eines FORTRAN-Arrays und die Verwendung von zusätzlichen Informationen wie z. B. Bankname, Banknummer, Banklänge, Datum und diverser Flaggen. Beschrieben wird das BOS-Konzept in [Blo88]; einen Überblick liefert [Wil94].

Ein Spurrekonstruktionsprogramm faßt Hits, die miteinander verträglich sind, zu Spuren zusammen. Als Hits werden Pulse mit einer bestimmten Amplitude, Weite und Ladung akzeptiert. Der für die Rekonstruktion verwendete Algorithmus ist ein Kalman-Filter. Dieser Filter besteht aus drei Schritten:

1. Extrapolation der Spur von einer Lage in die nächste. Eine Spur besteht aus Parametern und deren Kovarianzmatrix.
2. Prüfung, ob ein Hit zu einer Spur paßt. Dazu wird das χ^2 der Spur ausgerechnet.
3. Addition eines Hits zu einer Spur, das heißt die Parameter und die Kovarianzmatrix werden angepaßt.

Dazu wird eine sogenannte Spurhypothese aufgestellt, die mit allen Hits der ersten Lage verträglich ist. In der ersten Lage werden die Hits auf Verträglichkeit mit der Spur geprüft und falls sie passen (in der ersten Lage passen alle), wird eine Kopie der Spur erzeugt und der Hit addiert. Dann werden alle neuen Spuren in die nächste Lage extrapoliert. Dort werden wieder alle Hits auf Verträglichkeit geprüft usw. Nach der letzten Lage wird die so erzeugt Menge von Spuren darauf überprüft, ob es Spuren mit gemeinsamen Hits gibt. Von diesen wird die Spur mit dem kleinsten χ^2 gewählt. [Sch94].

Die Spuren wurden aus den Hits in den drei Doppellagen des Prototyps I rekonstruiert und ihr Durchstoßpunkt durch die untere Lage des Prototyps IIa bestimmt.
An die von dem Rekonstruktionsprogramm gelieferten Spuren wurden noch weitere Bedingungen gestellt, um von der Vielzahl der Spuren, die durch die Kammern führen, nur die mit einem möglichst geringen Fehler zu verwenden. Deshalb wurde gefordert, daß die Spur von mindestens fünf der sechs möglichen Lagen gesehen wurde und höchstens um 30° gegenüber einem senkrechten Einfall geneigt sind.

Als Zählgas wurde eine Mischung aus Argon/Isobutan/Ammoniak (92,5% / 5% / 2,5%) verwendet. Folgende Spannung waren für die äußeren Zellen eingestellt: $U_D = 2350$ V, $U_Z = 850$ V. Das entspricht einem Driftfeld von $E = 1000$ V/cm (etwa 4,6 Td). Die Gasverstärkung betrug etwa $A = 8 \cdot 10^4$.
Es wurden rund 134000 Teilchendurchgänge registriert; daraus ließen sich etwa 18000 Spuren rekonstruieren.

6.3 Ergebnis

Das Ergebnis der Messung ist in Abbildung 6.6 zu sehen. Um die Statistik zu erhöhen, wurden die Daten aus drei großen Zellen übereinander gelagert. (Die Ereigniszahl in den kleinen Zellen war so gering und die Signalqualität schlecht, so daß von einer Auswertung dieser Zellen abgesehen wurde.)

Die Größe der Kästchen eines (x,y)-Bins repräsentiert folgenden Quotienten:

$$\text{Kästchengröße} = \frac{\text{Anzahl der gefundenen Treffer in den untersuchten Zellen}}{\text{Anzahl der Spuren im Bin}}$$

und ist damit ein Maß für die Effizienz.
Eingezeichnet sind auch die Begrenzung der Zelle und die Lage der Randplatine mit den Feldformungselektroden. Die kleinen Punkte zeigen wieder die Durchstoßpunkte aller Spuren an (auch der, die von der obersten Kammer nicht gesehen wurden) und belegen, daß durch alle Bereiche Spuren gegangen sind.
Man sieht, daß die Effizienz zum Rand hin abnimmt, aber die Verbesserung gegenüber der Messung ohne Feldformungselektroden ist eminent. Daß die Zelle scheinbar auch außerhalb ihrer Ränder effizient ist, liegt an der begrenzten Auflösung. Die Kästchen außerhalb der Zelle müssen zu den benachbarten Kästchen innerhalb der Zelle gezählt werden.
Im Zentrum der Zelle, dort wo die Kästchen am größten sind, beträgt die Effizienz 100%, zum Rand hin liegt sie größtenteils über 60%. Ohne Randelektroden war die Zelle in diesem Bereich ineffizient. Es fällt aber auf, daß die Effizienz früher abnimmt als in Abbildung 6.3. Ein wesentlicher Unterschied zu der Messung am Prototyp I besteht darin, daß hier die Myonen unter verschiedenen Winkeln durch die Kammer fliegen, während dort die Elektronen alle senkrecht auf die Kammer auftrafen. Dadurch tritt hier ein zusätzlicher Fehler auf, der die Extrapolation der Spuren in die untersuchte Lage ungenau werden ließ.
In der rechten oberen Ecke (rechts von der gestrichelten Linie) sollten die Zellen ineffizient sein, weil die dort entstehenden Elektronen auf den seitlichen Rand stoßen, wenn sie senkrecht zum Draht driften. Dennoch wird dort eine Effizienz nachgewiesen. Das mag zum einen an der erwähnten Ungenauigkeit der Spurextrapolation liegen, zum anderen ist eine Verformung der Feldlinien zum Rand hin denkbar, die dazu führt, daß die Elektronen aus diesem Bereich heraus zum Draht driften.
Die theoretische Berechnung nimmt ideale Verhältnisse in der Kammer an. Tatsächlich aber gibt es davon Abweichungen. So reichen zum Beispiel die Kathoden aus fertigungstechnischen Gründen nicht ganz bis an die Randelektroden heran. Aus gleichem Grund ist ein exakt senkrechtes Einlöten

der Randplatinen und Kathoden auf die Basisplatine nicht möglich. Wie weit solche Ungenauigkeiten das Feld beeinflussen ist schwer abzuschätzen.
Dennoch wurde klar gezeigt, daß sich der Einbau von Randelektroden sehr lohnt.

Abbildung 6.6 Effizienz im Randbereich großer Zellen mit Randelektroden

7. Test der BDC

Bevor die BDC in Hamburg zum Einsatz kommt, sollen die Oktanten auf Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit geprüft werden. Einige Oktanten werden zusammen mit der Elektronik getestet, die gegenüber der bisher verwendeten modifiziert wurde. Da sich die BDC zur Zeit noch in der Produktion befindet, wird diese Arbeit keine Testergebnisse enthalten. Dennoch soll der geplante Testaufbau kurz vorgestellt werden.

Für diesen Test wird die Verstärkerkette von der BDC zu den FADCs so verwendet, wie es der Schaltplan in Abbildung 3.22 zeigt. Nur die Auslese und Steuerung der FADCs erfolgt wieder mit dem Minicontroller und nicht wie bei H1 mit dem Scanner. Abbildung 7.1 zeigt den Aufbau für diesen Test.

Abbildung 7.1 Test der BDC-Oktanten

Die Triggerschaltung ähnelt dem Aufbau bei den Tests der Randelektroden und ist dort schon beschrieben worden. Je drei Szintillatoren über und unter dem Oktanten registrieren den Durchgang von kosmischen Myonen, die in diesem Test beobachtet werden sollen. Wenn oben und unten ein

Szintillator ein Ereignis detektiert hat, wird verzögert ein Triggersignal an den Minicontroller gelegt. Der Macintosh erkennt diesen Zustand und sorgt für die Auslese der FADCs. Die Verbindung des Minicontrollers mit den FADCs und die Auslese ist auch beim Test der Randelektroden beschrieben worden.
Die Elektronik wurde während der Entwicklung und bei der Produktion getestet [Rus94]. Es bleibt aber zu überprüfen, wie sie sich in Verbindung mit der BDC verhält.

Folgende Tests sollen durchgeführt werden, soweit sich das jetzt schon absehen läßt:

On-Line-Tests mit dem Oszilloskop und dem Datenprogramm:
- Anlegen verschiedener Hochspannungen an die Oktanten; Überprüfung der Vorverstärkerausgänge mit dem Oszilloskop. Test auf Hochspannungsfestigkeit. Suche nach Überschlägen in der Kammer.
- Pulse von den FADCs zur Kammer schicken und wieder auslesen.
- Auslesen von Ereignissen, die durch Präparate (Sr, Fe, Cs) oder durch kosmischen Myonen erzeugt wurden.
- Begutachten von Form und Qualität der Zähldrahtsignale.
- Überprüfung der Verstärkungsfaktoren.
- Überprüfung der Dynamik.
- Überprüfen der Signale auf Rauschen.

Off-Line-Analyse nach Aufzeichnung vieler Teilchendurchgänge:
- Vergleich der Ereigniszahl in den verschiedenen Driftzellen
- Ladungsspektrum
- Verteilung der Driftzeiten
- Pulshöhenspektrum

8. Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Kontrolle und Überwachung der Hochspannungsversorgung der BDC entwickelt. Dazu wurde ein LabVIEW-Programm geschrieben, das auf einem Apple Macintosh läuft und mit dem Mikroprozessor des Hochspannungsgeräts kommuniziert. Dieses Programm wurde vorgestellt und erläutert. An das Hochspannungssystem werden wichtig Anforderungen in Hinblick auf die Betriebssicherheit gestellt. Dazu gehört langsames und kontrolliertes Hochfahren der Spannungen, genaues Einhalten der gewünschten Spannung, Überwachung der Ströme und schnelles Abschalten bei Auftreten eines Fehlers. Daneben muß das Programm leicht zu bedienen sein.
Bei verschiedenen Test in Heidelberg und am DESY konnte gezeigt werden, daß das System die Anforderungen gut erfüllt und wie gewünscht benutzt werden kann. Wie immer bei Einführung eines Programms wurden von den Benutzern Verbesserungsvorschläge geäußert, die noch programmiert werden müssen. So soll vor allem die Benutzeroberfläche angepaßt werden. Wegen technischer Schwierigkeiten konnte das Auslesen der Kettenströme noch nicht verwirklicht werden. Dieser Teil befindet sich aber in Vorbereitung und wird in kürze in das System implementiert.

Des weiteren wurden verschiedene Tests mit Prototypen der BDC gemacht. Ein Test galt den Randelektroden, die das Feld im Randbereich einer Zelle formen. Theoretische Berechnungen haben gezeigt, daß sich mit diesen Elektroden eine deutliche Verbesserung des Feldes erreichen läßt. Diese Behauptung wurde im Experiment deutlich bestätigt: Bis zu einem Abstand von etwa 1 cm von der Randplatine beträgt die Effizienz der Zelle etwa 100%. Dichter zum Rand hin liegt die Effizienz größtenteils über 60%. Ohne Randelektroden war die Zelle in diesem Bereich ineffizient. Nur in der äußersten Ecke nimmt Effizienz erwartungsgemäß ab.
Um die Funktionsfähigkeit und Betriebssicherheit der BDC im Vorfeld zu überprüfen, wurde ein Prototyp, der aus insgesamt acht Oktanten besteht, im H1-Detektor eingesetzt. Gleichzeit wurde ein kleiner Prototyp in Heidelberg in Betrieb genommen. Dabei konnten Fehler entdeckt und behoben werden. Diese Arbeit zeigt die ersten Ergebnisse der verschiedenen Messungen.
Geplante Tests mit den Oktanten der BDC konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr durchgeführt werden. Der Teststand befindet sich aber im Aufbau, und die Oktanten werden getestet, sobald sie die Produktion verlassen.

Insgesamt läßt sich nach den Tests mit den Prototypen sagen, daß die BDC eine in allen Bereichen verstandene Driftkammer ist. Es ist zu erwarten, daß sie bei ihrem Einsatz im H1-Detektor gut funktionieren und sich bewähren wird.

9. Anhang

9.1 Ansteuerung des HV-Geräts: Ein Beispiel

Da das Programm *HVControl 2.0* relativ komplex ist, soll ein Beispiel die Ansteuerung des Hochspannungsgeräts CAEN SY127 mit der LabVIEW-Bibliothek verdeutlichen. Ein kurzes Programm soll die Spannung V0 schreiben und lesen (siehe Abbildung 9.2).

Zuerst muß die Adresse des HV-Geräts, das über das A200-Interface im VME-Crate angesprochen wird, festgelegt und in der globalen Variablen *SY127 Address* gespeichert werden. Das geschieht im Kasten 0. Die notwendigen Parameter sind

- *Micron Slot*, der die Slotnummer des Macintoshs enthält, in der die Micron-Karte steckt.
- *MacVee Crate* enthält die Nummer der MacVEE-Karte, die angesprochen werden soll. Jede Micron-Karte kann mit bis zu acht MacVEE-Karten verbunden werden. Die MacVEE-Karte steckt im VME-Crate und bildet zusammen mit der Micron-Karte das VME-Crate in den Speicherbereich des Macintoshs ab.
- *A200 Address* ist die Adresse des A200 Interfaces im VME-Crate.

Die Verknüpfung der drei Parameter zu einer Adresse und ihre Speicherung in der globalen Variablen *SY127 Address* übernimmt das VI *Create SY127 Address* (unter LabVIEW werden Funktionen als VIs – *Virtuell Instruments* – bezeichnet). Zur Kontrolle wird die Adresse wieder zurückgeliefert. *Create SY127 Address* ist ein einfach aufgebautes VI (Abbildung 9.3). Die *Micronnummer* wird um 28 Bits nach links geschoben und mit der um 24 Bits verschobenen *MacVee Crate Number* in einer ODER-Operation verknüpft. Das Ergebnis wird mit *A200 Address* verknüpft und in der globalen Variablen *SY127 Address* gespeichert.
Alle VIs, die auf das HV-Gerät zugreifen, verwenden diese Adresse, ohne daß sie explizit übergeben werden muß.
Als nächstes sollte das A200-Interface und das VME-Crate mit dem VI *A200 Reset* zurückgesetzt werden (Kasten 1 in Abbildung 9.2). Ein Zurücksetzen von externen Geräten empfiehlt sich immer, auch wenn es für die einwandfreie Funktion meistens nicht notwendig ist.
Danach wird in Kasten 2 ausgewählt, welcher Kanal durch den nächsten Befehl beeinflußt werden soll. Dazu wird dem VI *Select Channel* die Geräte- und die Kanalnummer übergeben. (Alternativ ist es möglich, Kanäle zu Gruppen zusammenzufassen und dann die Kanäle einer Gruppe gemeinsam auszuwählen.) Schließlich folgt in Kasten 3 der eigentliche Schreib- oder Lesebefehl. Je nach Wert der Variablen *Select Function* (0 oder 1) wird die Spannung V0 entweder geschrieben oder gelesen.
Alle VIs, die auf das HV-Gerät zugreifen, geben einen Fehlercode zurück. Folgende Werte sind möglich:

0 :	Operation erfolgreich
-1 :	Ungültige Kanal- oder Gerätenummer
-2 :	Leseversuch ohne vorherige Auswahl eines Kanals
-3 :	Schreibversuch ohne vorherige Auswahl eines Kanals
-4 :	Versuch, anderes Statusbit zu ändern als On/Off-Bits
-5 :	Versuch, Nur-Lese-Parameter zu ändern
-6 :	Versuch, einen Kanal einer nicht existierenden Gruppe zuzuordnen
-9 :	Versuch, mit A>7 zu schreiben, nachdem eine absolute Gruppe ausgewählt wurde
-10 :	Versuch, mit einem Bit ungleich 0 den Status zu ändern
-11 :	Versuch, mit A>6 zu schreiben, nachdem eine relative Gruppe ausgewählt wurde
-12 :	Fehler beim Schreiben eines Protection-Bits
-32 :	Ausgewählter Kanal existiert nicht

-33 : Versuch, einen zu kleinen Parameter zu schreiben
-34 : Versuch, einen zu großen Parameter zu schreiben
-48 : Funktion im HV-Gerät nicht verfügbar
-256 : Versuch, ein nicht existierendes Gerät anzusprechen
-1000 : Fehler beim Buszugriff
-2000 : Funktion im Programm nicht verfügbar
-3000 : Timeout

Bei der ausschließlichen Verwendung der in Kapitel 4.3.5 „Aufbau und Module des Programms *HVControl 2.0*“ aufgelisteten VIs werden einige der obengenannten Fehler nicht auftreten, weil diese VIs entsprechende Operationen nicht zulassen. Nur beim direkten Zugriff über die C-Routinen können alle Fehler vorkommen.

Zur Erläuterung der Hierarchie aus Abbildung 4.11, seien als Beispiel die VIs *Select Channel*, *SetV0* und *ReadV0* herausgegriffen. Die Verwendung von *Select Channel* wurde im vorherigen Beispielprogramm erläutert. Dieses VI (Abbildung 9.5) enthält im wesentlichen wie alle VIs, die im Programm verwendet werden, einen Aufruf des VIs *Call SY127*, und übergibt diesem VI einen *Function Selector* (hier 2). *Call SY127* enthält den Aufruf des C-Programms (CIN; Abbildung 9.4). Über den *Function Selector* weiß das C-Programm, von welchem VI es aufgerufen wurde und welche Funktion es demnach am HV-Gerät auslösen soll. Das VI *Call SY127* liest außerdem die Adresse des HV-Geräts aus der globalen Variablen *SY127 Address* und stellt sie dem CIN zur Verfügung. Schließlich werden noch bis zu drei Parameter an das CIN übergeben. Das VI *Select Channel* benutzt aber nur zwei Parameter (*CAEN Crate #* und *Channel*). Im Falle eines Fehlers enthält *Error* einen negativen Wert (siehe oben).
Das *VI SetV0* (Abbildung 9.6) funktioniert genauso wie *Select Channel*, nur daß hier der *Function Selector* 7 ist.
Das VI *ReadV0* (Abbildung 9.7) ist ein Beispiel für ein VI, das einen Wert liest. Es übergibt außer dem *Function Selector* keine Parameter an *Call SY127*. Dafür enthält der Rückgabewert *Error/Data,* wenn er nicht negativ ist, die gelesene Spannung V0, andernfalls den Fehlercode.

Abbildung 9.1 Frontpanel zum Beispielprogramm aus Abbildung 9.2

Abbildung 9.2 Beispielprogramm zur Ansteuerung des Hochspannungsgeräts

Abbildung 9.3 Das VI *Create SY127 Address* (oben: Anschlußfeld, unten: Block-Diagram)

Abbildung 9.4 Das VI *Call SY127* (oben: Anschlußfeld, unten: Block-Diagram)

Abbildung 9.5 Das VI *Select Channel* (oben: Anschlußfeld, unten: Block-Diagram)

Abbildung 9.6 Das VI *SetV0* (oben: Anschlußfeld, unten: Block-Diagram)

Abbildung 9.7 Das VI *ReadV0* (oben: Anschlußfeld, unten: Block-Diagram)

9.2 Anleitung HVControl 2.0

9.3 Wichtige VIs

9.3.1 Semaphore

Der Grund für den Einsatz von Semaphoren wurde schon am Ende von Kapitel 4.3.5 beschrieben: Da LabVIEW die Multitaskingfähigkeit des Macintoshs unterstützt, kann es vorkommen, daß verschiedene VIs gleichzeitig auf ein externes Gerät zugreifen. Dadurch können Störungen entstehen, so daß der gleichzeitige Zugriff verhindert werden muß.
Der Zugriff auf das Hochspannungsgerät erfolgt bei uns über den Aufruf von C-Routinen, und diese werden bei LabVIEW grundsätzlich in ihrer Ausführung nicht unterbrochen. Wie am Anfang des oben genannten Kapitels erläutert wurde, wird ein Parameter in mehreren Schritten an das Hochspannungsgerät übermittelt. Jeder Schritt enthält zwar den Aufruf einer C-Routine, aber zwischen den einzelnen Schritten kann eine Unterbrechung durch andere VIs stattfinden. Semaphoren gewährleisten nun, daß der Übermittlungsprozeß nicht unterbrochen wird.
Zu Beginn eines Prozesses, der nicht unterbrochen werden soll, läßt dieser sich einen Semaphoren zur Verfügung stellen. Dieser Semaphor ist damit in Gebrauch und kann nicht von anderen Prozessen benutzt werden. Am Ende des Prozesses wird der Semaphor wieder freigegeben und kann nun von anderen Prozessen angefordert werden. Die Umsetzung dieses Konzepts in LabVIEW verdeutlicht ein kurzes Beispielprogramm (Abbildung 9.8).

Abbildung 9.8 Verwendung von Semaphoren unter LabVIEW

Zuerst wird ein Semaphor erzeugt, indem dem VI *Create Semaphore* eine Nummer übergeben wird. Das VI liefert dann einen Semaphor zurück. Durch die Verwendung unterschiedlicher Nummern können mehrere Semaphoren erzeugt werden. Allerdings sollten natürlich alle VIs, die auf dasselbe Gerät zugreifen, denselben Semaphor benutzen. Der Semaphor wird nun zur Steuerung der Reihenfolge zweier sonst gleichzeitig ablaufender Prozesse benutzt. Im oberen Zweig des Beispielprogramms wird zuerst das VI *Wait Semaphor* aufgerufen. Dieses VI wird erst beendet, wenn der Semaphor nicht von anderen VIs benutzt wird. Das trifft in diesem Fall sofort zu, weil der untere Zweig mit einer kurzen Verzögerung beginnt, also den Semaphor noch nicht anfordert. Anschließend wird im oberen Zweig eine For-Schleife viermal durchlaufen. Das repräsentiert einen beliebigen Prozeß (Prozeß A), der nicht unterbrochen werden soll. In dieser Zeit wird im unteren Zweig das VI

Wait Semaphor aufgerufen. In diesem Fall ist der Semaphor aber nicht frei, so daß das VI vorerst nicht beendet wird. Nachdem im oberen Zweig die For-Schleife beendet ist, wird der Semaphor mit dem VI *Signal Semaphor* wieder freigegeben. Daraufhin wird das wartende VI *Wait Semaphor* im unteren Zweig beendet, der Prozeß B ausgeführt (hier nur symbolisiert) und der Semaphor erneut freigegeben.
Über den unteren Eingang des VIs *Wait Semaphor* kann ausgewählt werden, ob das VI wie im Beispielprogramm erst beendet wird, wenn der Semaphor zur Verfügung steht (Eingang = TRUE), oder ob das VI unabhängig davon beendet wird (Eingang = FALSE). Im letzteren Fall muß der nachfolgende Prozeß selber entscheiden, ob der Semaphor frei ist oder nicht, was durch den unteren Ausgang des VIs angezeigt wird.

9.3.2 WriteInitString/ReadInitString

Die VIs *WriteInitString* und *ReadInitString* ermöglichen ein komfortables Schreiben und Lesen von Init-Files. Diese Files können z. B. die Parameter enthalten, die ein Programm zu seiner Initialisierung benötigt. In einem solchen File werden die Parameter zu Gruppen zusammengefaßt. Innerhalb einer Gruppe folgt jedem Parameter hinter einem Gleichheitszeichen der dem Parameter zugeordnete Wert. In Abbildung 9.9 enthält z. B. die Gruppe *Ort* die Parameter *x* und *y*, denen die Werte *12.5* bzw. *3* zugeordnet sind. Die von dem Programm *HVControl 2.0* verwendete Init-Datei ist in Abbildung 4.6 zu finden.

```
[GroupName]
Parameter = String

[Ort]
x = 12.5
y = 3

[Farbe]
Kreis = rot
Linie = blau
```

Abbildung 9.9 Beispiel für eine Init-Datei

Mit Hilfe der VIs *WriteInitString* und *ReadInitString* kann nun sehr einfach auf die Parameter zugegriffen werden. Ebenso können Gruppen angelegt oder gelöscht werden.
Dem VI *WriteInitString*, dessen Anschlußfeld in Abbildung 9.10 zu sehen ist, werden vier Variablen übergeben:

- *FileName*: Name der Datei, in die der Parameter geschrieben werden soll. Falls die Datei noch nicht existiert, wird sie neu angelegt. Der Dateiname muß einschließlich des zugehörigen Pfades angegeben werden.
- *GroupName*: Name der Gruppe, in die der Parameter geschrieben werden soll. Falls die Gruppe noch nicht existiert, wird sie neu angelegt.
- *KeyName*: Name des Parameters, der geschrieben werden soll. Falls er nicht existiert, wird er neu angelegt. Wenn die Variable *KeyName* leer ist, wird die mit der Variablen *GroupName* angegebene Gruppe gelöscht.
- *StringToWrite*: Dies ist der Wert, der dem Parameter zugewiesen wird. Es kann sich dabei um einen beliebigen String handeln.

Die vom VI zurückgelieferte Variable *Error* ist ungleich 0, wenn beim Öffnen oder Erzeugen der Datei ein Fehler aufgetreten ist. *Error* enthält dann den entsprechenden LabVIEW-Code für Schreib-/Lesefehler.

Abbildung 9.10 Anschlußfeld des VIs *WriteInitString*

Das VI *ReadInitString* ist dem VI *WriteInitString* sehr ähnlich. Das Anschlußfeld zeigt Abbildung 9.11. Die zu übergebenden Variablen haben folgende Bedeutung:

- *FileName*: Name der Datei, aus der der Parameter gelesen werden soll. Auch hier muß der vollständige Pfadname angegeben werden.
- *GroupName*: Name der Gruppe, aus der der Parameter gelesen werden soll.
- *KeyName*: Name des Parameters, dessen Wert gelesen werden soll.
- *Default*: Falls die Datei, die Gruppe oder der Parameter nicht gefunden wird und deshalb kein Wert gelesen werden kann, wird statt dessen der String, der in der Variablen *Default* steht, vom VI zurückgeliefert.

Der vom VI gelesene String steht in der Variablen *String*. Beim Auftreten eines Fehlers enthält die Variable *Error* den zugehörigen Fehlercode und *String* den von *Default* angegebenen Wert. Folgende Werte kann *Error* annehmen:

0: kein Fehler
1: File nicht gefunden
2: Gruppe nicht gefunden
3: Parameter nicht gefunden

Abbildung 9.11 Anschlußfeld des VIs *ReadInitString*

10. Literatur- und Quellenverzeichnis

[Blo88] V. Blobel
„The BOS System“
DESY Internal Report R1-88-01 (1988)

[CAE91a] CAEN
SY127 High Voltage System „User’s Manual“ April 1991

[CAE91b] CAEN
Mod. „Technical Information Manual A200“ April 1991

[Cla93] Don Clarke (dc RAL/H1 93)
„Library wich contains the functions to control the CAEN High Voltage System SY127“
DESY 1993

[Eis92] Franz Eisele, Günter Wolf
„Erste Ergebnisse von HERA“
Physikalische Blätter 48 (1992) Nr. 10

[Feu94] Martin Feuerstack
Persönliche Mitteilungen
Physikalisches Institut der Universität Heidelberg, 1994

[Ges90] Karl Geske, Harald Riege, Rolf von Staa
„The Digital Electronics of the H1 Streamer Tube Detector“
H1LSTEC 90-8, 1990 Hamburg

[Gru93] Claus Grupen
„Teilchendetektoren“
BI-Wissenschaftsverlag 1993 Mannheim

[H1C93a] The H1 Collaboration
„Technical Proposal to Upgrade the Backward Scattering Region of the H1 Detektor“
PRC 93/02

[H1C93b] The H1 Collaboration
„The H1 detector at HERA“
DESY 93-103; 1993

[Hen94] Hennenberger
Konstruktionszeichnungen
Physikalisches Institut der Universität Heidelberg, 1994

[Hin92] H. Hinsch
„Vorlesung über Elektronik“
Vorlesungsskript; WS 92/93; Universität Heidelberg

[Kat94] Judith Katzy
Dissertation in Vorbereitung (1994), Physikalisches Institut der Universität Heidelberg

[Kle92] Konrad Kleinknecht
„Detektoren für Teilchenstrahlung“
3. Auflage, Teubner 1992 Stuttgart

[Lab93] „LabVIEW for Macintosh User manual“
„LabVIEW Function Reference Manual“
„LabVIEW Code Interface Reference Manual“
National Instruments, August 1993, Austin Texas USA

[Len94] Peter Lennert
Konstruktionszeichnungen und persönliche Mitteilungen
Physikalisches Institut der Universität Heidelberg, 1994 und 1995

[Mec94] Martin Mechenbier
„Der Einfluß nicht-sensitiven Detektormaterials auf die Elektronrekonstruktion im Rückwärtsbereich von H1: Monte-Carlo-Untersuchungen und Datenanalyse“
Diplomarbeit (März 1994), Physikalisches Institut der Universität Heidelberg

[Per90] Donald W. Perkins
„Hochenergiephysik“
Addison-Wesley 1991 Bonn

[Rus94] Rudolf Rusnyak
Schaltpläne und persönliche Mitteilungen
Elektronikwerkstatt das Physikalisches Institut der Universität Heidelberg

[Sch94] Bernhard Schwab
Persönliche Mitteilungen
Dissertation in Vorbereitung
Physikalisches Institut der Universität Heidelberg, 1994 und 1995

[Tay88] B. G. Taylor
„The micron user manual“ und „The MacVEE hardware user manual“
beide CERN, ECP division (1988)

[Tut91] Jörg Tutas
„Myonen im H1-Detektor: Die Auslese der Streamerkammerdaten und ihre Verwendung in ausgewählten physikalischen Prozessen.“
Dissertation (1991), Physikalische Institute RWTH Aachen

[Tut94] Jörg Tutas
Persönliche Mitteilungen
Physikalisches Institut der Universität Heidelberg und DESY, 1994 und 1995

[Wer94] Marco Werner
„Test eines Prototypen der Rückwärts-Driftkammer (BDC) des H1-Detektors mit einem Elektronenstrahl. Bestimmung von Betriebsparametern mit der Gasmischung Argon/Isobutan/Ammoniak“
Diplomarbeit (Juli 1994), Physikalisches Institut der Universität Heidelberg

[Wil94] Rainer Wilhelm
„Aufbau eines Teststands zur Auslese von Testkammern für die Rückwärtsdriftkammer (BDC) des H1-Experiments und Bestimmung von Betriebsparametern mit verschiedenen Driftgasen“
Diplomarbeit (1994), Physikalisches Institut der Universität Heidelberg

[Wis93] „Wissenschaftlicher Jahresbericht 1993“
DESY 1993

[Wol94] Günter Wolf
„HERA Physics“
DESY 94-022; Februar 1994

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich denjenigen ganz herzlich danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonders danke ich Herrn Prof. F. Eisele für die Bereitstellung des Themas und die intensive Betreuung. In diesem Jahr der Diplomarbeit konnte ich viel bei ihm und in seiner Arbeitsgruppe lernen.

Ich danke Herrn Dr. P. Lennert und Herrn Dr. H. Rieseberg für die freundliche Unterstützung, den vielen Erläuterungen und die ständige Ansprechbereitschaft.

Bei Dr. M. Feuerstack, B. Schwab und Dr. J. Tutas bedanke ich mich für die Anleitungen, Ratschläge und Hilfestellungen zu wesentlichen Teilen der Arbeit.

Herrn R. Rusnyak danke ich für die Hilfe bei Problemen im elektronischen Bereich.

Danken möchte ich M. Hildebrandt und M. Werner für das Durchsehen der Arbeit und ihren nützlichen Anmerkungen.

Allen Mitarbeitern in unserer Arbeitsgruppe danke ich für die gute Zusammenarbeit und das angenehme und fruchtbare Arbeitsklima.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir das Studium der Physik ermöglicht und es mit großer Anteilnahme begleitet haben.

Erklärung:

Ich versichere, daß ich diese Arbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Heidelberg, den ....
(Unterschrift)