

Entwicklung eines kombinierten
Auslese- und Echtzeit-Triggersystems
zum Nachweis von
Elektronen/Positronen-Signaturen
in einem elektromagnetischen
Schauerdetektor

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften der
Justus-Liebig-Universität Gießen
Fachbereich 07
(Mathematik und Informatik, Physik, Geographie)

vorgelegt von
Markus Petri
aus Elz

II. Physikalisches Institut
der Justus-Liebig-Universität Gießen
August 2000

Dekan : Prof. Dr. A. Beutelspacher
I. Berichterstatter : Prof. Dr. W. Kühn
II. Berichterstatter : Prof. Dr. A. Müller

Tag der mündlichen Prüfung: 15.09.2000

Zusammenfassung

Das Dileptonenspektrometer HADES (**H**igh **A**cceptance **D**i**E**lectron **S**pectrometer) wird derzeit am Schwerionensynchrotron der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt aufgebaut und in Betrieb genommen. Das aus mehreren Teildetektoren aufgebaute Spektrometer besteht aus einem ringabbildenden Cherenkov-Detektor (RICH), einem elektromagnetischen Schauerdetektor (SHOWER) und einer Flugzeitwand (TOF) zur Teilchenidentifizierung sowie einem Magnetspektrometer zur Impulsbestimmung der geladenen Teilchen, bestehend aus Minidriftkammern (MDCs) und einem supraleitenden Magneten. Konzipiert für die Spektroskopie von Elektron-/Positron-Paaren (Dielektronen-Paare) im invarianten Massebereich bis $1.1 \text{ GeV}/c^2$ erlaubt das Spektrometer die Untersuchung von Schwerionenreaktionen sowie pion- und protoninduzierten Reaktionen. Zentrale experimentelle Fragestellungen sind dabei die Untersuchung der elektromagnetischen Struktur von Hadronen sowie medienbedingte Modifikationen von Hadroneneigenschaften.

Der Nachweis von Dielektronen aus einem elektromagnetischen Zerfall innerhalb eines von Hadronen dominierten Untergrundes erfordert neben einem hochselektiven Spektrometer ein Auslese- und Echtzeit-Triggersystem, das hohe Ereignis- und Datenraten verarbeiten kann. Zentrales Element des mehrstufigen HADES-Echtzeit-Triggersystems ist dabei der Second-Level-Trigger (LVL2-Trigger). Diese Triggerstufe lokalisiert Signaturen von Elektronen bzw. Positronen in den verschiedenen Teildetektoren des Spektrometers und selektiert Ereignisse mit Dielektronen in einem vorgegebenen invarianten Massebereich. Ziel dieser Ereignisselektion ist eine Reduktion der Ereignis- und Datenraten um einen Faktor 100.

In der vorliegenden Arbeit wird die Struktur sowie die technische Realisierung der entsprechenden Elemente des Auslese- und LVL2-Triggersystems für den HADES-Schauerdetektor beschrieben. Das kombinierte System besteht aus zwei 6U-VME-Einschubkarten pro Detektorsegment, die die Auslese sowie die gleichzeitige Analyse der digitalisierten Ladungswerte der segmentierten Kathodenfelder des Schauerdetektors ermöglichen. Die Echtzeit-Analyse im Triggersystem umfaßt dabei die Kalibration der Ladungswerte und das Erkennen von Signaturen elektromagnetischer Schauer in den drei Ebenen des Detektors, die aus jeweils 32×32 Kathodenfeldern bestehen. Die Analyseergebnisse der Triggerstufe werden mittels einer weiteren VME-Einschubkarte an die nachfolgenden Einheiten des LVL2-Triggers zur Bildung der LVL2-Triggerentscheidung weitergeleitet. Die Verarbeitung der zwischengespeicherten Daten im Auslesesystem erfolgt dann entsprechend der vom LVL2-Triggersystem

bereitgestellten Triggerentscheidung. Die pro Einschubkarte sowohl im Auslese- als auch im Triggerzweig zu verarbeitende Datenrate beträgt 180 MByte/s und erfordert insgesamt ca. 10^{10} prozessoräquivalente Operationen pro Sekunde. Die eigentliche Analyse der 1536 Kathodenfelder benötigt $6.4 \mu\text{s}$ bei einer maximalen Latenzzeit von $10 \mu\text{s}$.

Darüber hinaus wurde ein in Hardware implementierbarer Schauererkennungsalgorithmus entwickelt und mit Daten aus einer vollständigen Detektorsimulation getestet und optimiert.

Bei der technischen Realisierung der Aufgabenstellung wurden im großen Umfang programmierbare Logikbausteine (PLDs) eingesetzt, so daß eine Anpassung der Funktionalität der entwickelten Hardware an andere experimentelle Fragestellungen jederzeit möglich ist. Das hohe Maß an Flexibilität sowie die modulare Gestaltung lassen darüber hinaus den Einsatz der Einschubkarten in anderen Trigger- und Auslesesystemen denkbar erscheinen.

Die Beschreibung der Funktionalität der programmierbaren Logikbausteine erfolgt in der standardisierten Hochsprache VHDL (**V**HSIC¹ **H**ardware **D**escription **L**anguage), so daß eine vollständige funktionale Simulation sowie eine Timing-Simulation der vorliegenden Hardware gewährleistet ist.

1. Very High Speed Integrated Circuit

Inhaltsverzeichnis

1	<i>Einleitung und Motivation</i>	1
1.1	Struktur der Hadronen	1
1.1.1	Formfaktoren	1
1.1.2	Das Vektormesondominanzmodell	3
1.2	Leptonenpaare aus Schwerionenkollisionen	5
1.2.1	Hadronenmassen und chirale Symmetrie	8
1.2.2	Restauration der chiralen Symmetrie	9
1.3	Dileptonenspektroskopie mit HADES	10
2	<i>Das Dileptonen-Spektrometer HADES</i>	15
2.1	HADES im Überblick	15
2.2	Der ringabbildende Cherenkov-Detektor	18
2.3	Die Minidriftkammern	19
2.4	Die Flugzeitwand	20
2.5	Der Schauerdetektor	21
2.5.1	Das Detektorprinzip	24
2.5.2	Ergebnisse mit Elektronen- und Protonenstrahlen	26
3	<i>Das Trigger- und Auslesekonzept des Spektrometers</i>	29
3.1	Aufgabenstellung und Anforderung	29
3.2	Das mehrstufige Triggersystem	29
3.2.1	Die erste Triggerstufe	31
3.2.2	Die zweite Triggerstufe	32
3.2.3	Die dritte Triggerstufe	33
3.2.4	Die Triggereffizienz	34
3.3	Die Struktur des Auslesesystems	35
3.4	Das Triggerverteilungssystem	36
3.4.1	Die Module des Triggerverteilungssystems	38
3.4.2	Der Triggerbus	39

4	<i>Der Triggeralgorithmus zur Schauererkennung</i>	41
4.1	Aufgabenstellung	41
4.2	Das Hardware-Verfahren zur Schauererkennung	41
4.2.1	Datenkalibration	42
4.2.2	Datenanalyse	42
4.2.3	Technische Randbedingungen bei der Implementierung des Algorithmus	46
5	<i>Die Trigger- und Ausleseelektronik des HADES-Schauerdetektors</i>	49
5.1	Übersicht	49
5.2	Detector Trigger Unit und Fanout Board	51
5.3	Die Front-End-Elektronik	52
5.3.1	Das Front End Board	52
5.3.2	Das Readout Board	54
5.4	Die Image Processing Card	57
5.4.1	Das Hardware-Konzept	57
5.4.2	Die funktionalen Einheiten und Schnittstellen der Basiskarte	58
5.4.3	Die funktionalen Einheiten der Erweiterungskarte	66
5.4.4	Steuerungs- und Überwachungsfunktionen	68
5.5	Das Link Module	71
5.5.1	Das Hardware-Konzept	71
5.5.2	Die funktionalen Einheiten und Schnittstellen des Link Modules	72
6	<i>Ergebnisse und Ausblick</i>	77
6.1	Erste Tests mit Prototypen	77
6.1.1	Ergebnisse des Prototypentests	79
6.1.2	Systemoptimierung und Weiterentwicklung	80
6.2	Erste Labortests mit dem Gesamtsystem	81
6.3	Testexperiment mit dem Gesamtsystem	83
6.4	Ausblick	85
	<i>Abbildungsverzeichnis</i>	87
	<i>Glossar</i>	89
	<i>Literaturverzeichnis</i>	93

Das Verständnis und die theoretische Beschreibung der drei¹ fundamentalen Wechselwirkungen (Gravitation, elektroschwache Kraft und starke Kraft) ist eines der wesentlichen Ziele der modernen Physik. Die theoretische Beschreibung der elektroschwachen und der starken Kraft erfolgt dabei auf Basis von Eichfeldtheorien. Für die starke Kraft ist dies die Quantenchromodynamik (QCD). Die der QCD zugrundeliegenden Gleichungen sind mit heutigen Methoden jedoch nur für Spezialfälle lösbar.

Die Tatsache, daß sich fundamentale Größen wie Massen, magnetische Momente und Strukturfunktionen der Hadronen im Rahmen der QCD mit den verfügbaren Rechenmethoden nur eingeschränkt vorhersagen lassen, obwohl die zugrundeliegenden Feldgleichungen bekannt sind, eröffnet somit ein Spektrum interessanter experimenteller Fragestellungen. Eine wichtige Fragestellung ist dabei die Untersuchung von mediumbedingten Modifikationen der fundamentalen Größen der Hadronen. Einen möglichen experimentellen Zugang bietet dabei die Spektroskopie von Dielektronen-Paaren aus dem elektromagnetischen Zerfall der leichten Vektormesonen.

1.1 Struktur der Hadronen

Hadronen sind ausgedehnte Objekte, die aus Quarks und Gluonen bestehen. Eine Beschreibung der Struktur dieser Objekte durch Parameter wie magnetisches Moment, Formfaktor oder Polarisierbarkeit sollte deshalb in Analogie zur Beschreibung der Atomkerne möglich sein.

Die Untersuchung des elektromagnetischen Zerfalls von Hadronen sowie andere Formen der Hadron-Photon-Wechselwirkung sind dabei ein geeigneter Ansatzpunkt, um Informationen über die Hadronenstruktur zu erhalten.

1.1.1 Formfaktoren

Betrachtet man beispielsweise die Streuung von Elektronen im Coulomb-Feld eines massiven Teilchens mit einer ausgedehnten elektrischen Ladungsverteilung, so erfolgt

1. Unter Berücksichtigung der Vereinheitlichung von schwacher und elektromagnetischer Wechselwirkung zur elektroschwachen Wechselwirkung.

für kleine Impulsüberträge q^2 die Streuung unabhängig von der Struktur des Streuzentrums. Die Streuung erfolgt an einer punktförmigen Ladungsverteilung. Für große Impulsüberträge dringt das Elektron in die Ladungsverteilung ein. Für den differentiellen Wirkungsquerschnitt gilt:

$$\frac{d\sigma}{dq^2} = \left(\frac{d\sigma}{dq^2} \right)_{\text{Punkt}} [F(q^2)]^2$$

Die Funktion $F(q^2)$ wird als Formfaktor bezeichnet und entspricht im nicht-relativistischen Fall der Fourier-Transformierten der räumlichen Ladungsverteilung des Streuzentrums. Im Rahmen einer konsistenten relativistischen Beschreibung der Streuung eines Elektrons an einem Hadron endlicher Masse ist dieser einfache Zusammenhang zwischen Formfaktor und räumlicher Ladungsverteilung nicht mehr gewährleistet. Darüber hinaus muß die räumliche Verteilung des magnetischen Moments des Hadrons durch einen eigenen Formfaktor berücksichtigt werden. Trotz alledem enthalten die Formfaktoren auch weiterhin die vollständige elektromagnetische Struktur des Hadrons (z.B. den Radius der Ladungsverteilung).

In der Quantenelektrodynamik (QED), der Quantenfeldtheorie der elektromagnetischen Wechselwirkung, wird die eigentliche Wechselwirkung zwischen den Teilchen durch den Austausch virtueller Photonen beschrieben. Die Größe q^2 beschreibt dabei den Energie- und Impulsaustausch zwischen den wechselwirkenden Teilchen und wird als Viererimpulsübertrag bezeichnet. Für die elastische Elektronenstreuung ist $q^2 < 0$; der entsprechende Impulsübertrag ist raumartig.

Weitere Methoden zur Untersuchung von elektromagnetischen Formfaktoren sind die e^+e^- -Annihilation in Collider-Experimenten sowie der dileptonische Zerfall von Hadronen. Bei diesen Prozessen ist $q^2 > 0$; hier ist der entsprechende Impulsübertrag zeitartig. Abbildung 1.1 zeigt die entsprechenden Feynman-Graphen für die elastische Elektronenstreuung am Pion sowie für die $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ Annihilation.

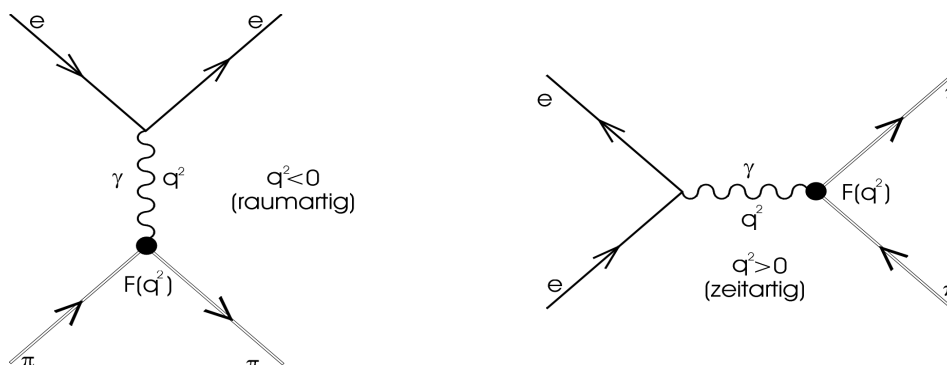


Abbildung 1.1: (Links) Feynman-Graph zur Elektron-Pion Streuung. Die Wechselwirkung wird durch einen 1-Photonenaustausch im raumartigen Impulsbereich beschrieben. (Rechts) Feynman-Graph zur $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ Annihilation. Der 1-Photonenaustausch erfolgt im zeitartigen Impulsbereich.

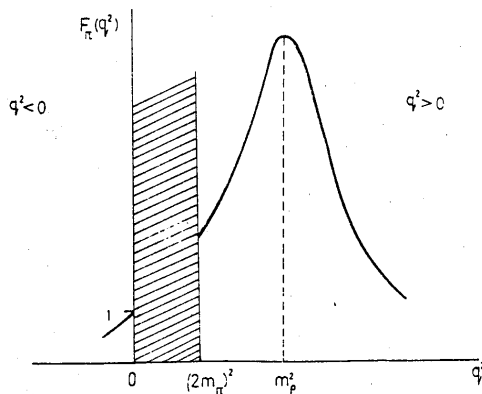


Abbildung 1.2: Qualitatives Verhalten des π^\pm -Formfaktors. Die schraffierte Fläche kennzeichnet den kinematisch verbotenen Bereich [Lan85].

Die Durchführung von Streu- und Annihilationsexperimenten ermöglicht somit die Bestimmung von Formfaktoren im gesamten physikalisch zugänglichen Bereich von q^2 . Abbildung 1.2 zeigt den durch Elektron-Pion-Streuung und e^+e^- -Annihilationsexperimente bestimmten qualitativen Verlauf des π^\pm -Formfaktors. Die Abnahme des elastischen Formfaktors für zunehmende Viererimpulsüberträge im raumartigen Bereich deutet auf die innere Struktur der π^\pm -Mesonen hin. Das heißt, das virtuelle Photon dringt in die Mesonen ein und wechselwirkt mit deren geladenen Konstituenten.

Ein hiervon abweichendes Verhalten zeigt sich im zeitartigen Impulsbereich, wo eine resonanzartige Überhöhung des Formfaktors im Bereich der quadratischen Ruhemasse des ρ -Mesons auftritt. Dieses Verhalten wird auch als Vektormesonen-Dominanz bezeichnet und wird durch das Vektormesondominanzmodell (VDM) beschrieben.

1.1.2 Das Vektormesondominanzmodell

Im Rahmen des Vektormesondominanzmodells [Sak69] erfolgt die Kopplung der Hadronen an virtuelle Photonen ($|q^2| \leq 1 \text{ GeV}^2/c^2$) durch ein intermediäres Vektormeson (siehe Abbildung 1.3). Die direkte Umwandlung des virtuellen Photons in ein Vektormeson ist auf Grund der identischen Quantenzahlen ($J^\pi = 1^-$) möglich.

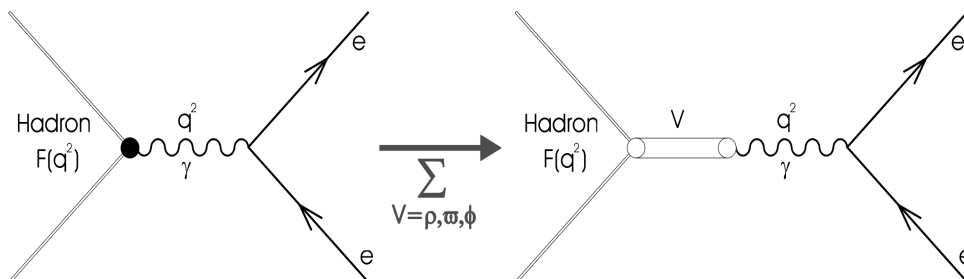


Abbildung 1.3: Im Bereich niedriger q^2 -Werte kann die Hadron-Photon-Wechselwirkung (links) durch den Austausch intermediärer Vektormesonen beschrieben werden (rechts).

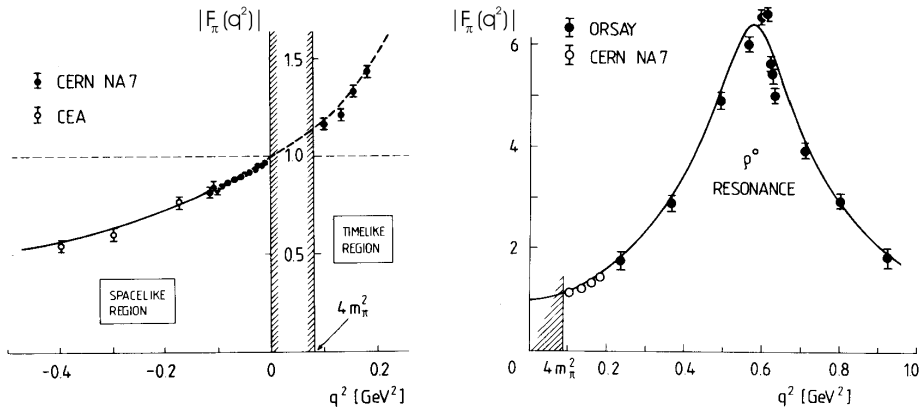


Abbildung 1.4: Pionenformfaktor im raumartigen Impulsbereich sowie eine Extrapolation des Formfaktors in den zeitartigen Bereich (links). Pionenformfaktor im zeitartigen Impulsbereich (rechts). Die eingezeichnete Kurve entspricht einer Beschreibung der Daten mit dem Vektormesondominanzmodell. Die schraffierte Fläche kennzeichnet den kinematisch verbotenen Bereich [Eri88].

Bei Energieüberträgen, die den Massen der Vektormesonen entsprechen, kommt es daher zu resonanzartigen Überhöhungen im Formfaktor. Der entsprechende Formfaktor wird beschrieben durch:

$$F_H(q^2) = \frac{M_V^2}{M_V^2 - q^2 - iM_V \Gamma_V(q^2)}$$

(mit: Γ_V = totale Vektormesonenbreite abhängig von q^2 ; M_V = Masse Vektormeson)

Das Modell ist sehr erfolgreich in der Beschreibung der elektromagnetischen Struktur des Pions. Einen Vergleich zwischen VDM basierten Rechnungen und experimentellen Daten aus Streu- ($\pi^\pm e^- \rightarrow \pi^\pm e^-$) bzw. Annihilationsexperimenten ($e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^-$) zeigt Abbildung 1.4.

Auf Grund der Erhaltung der C-Parität in der elektromagnetischen Wechselwirkung sind die in Abbildung 1.1 dargestellten Prozesse für neutralen Mesonen, z.B. π^0 oder η , verboten. Die komplexe interne Struktur der Mesonen manifestiert sich nun in sogenannten Konversionsprozessen, in denen ein neutrales Meson A in ein neutrales Teilchen B mit anderer C-Parität zerfällt, so daß elektromagnetische Prozesse der Art $A \rightarrow B \gamma^* \rightarrow B e^+ e^-$ (Dalitz-Zerfall) möglich sind (siehe auch Abbildung 1.5) Die Produktionswahrscheinlichkeit eines Leptonenpaares mit Masse m_{ee}^2 ist dabei proportional der Emissionswahrscheinlichkeit eines virtuellen Photons mit dem zeitartigen Viererimpuls $q^2 = m_{ee}^2$. Die Emissionswahrscheinlichkeit wird jedoch bestimmt von der elektromagnetischen Struktur am Vertex, die durch den Übergangsformfaktor $F_{AB}(q^2)$ beschrieben wird.

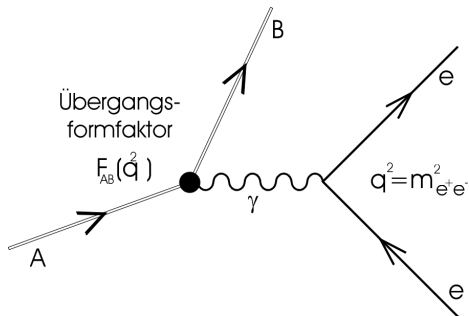


Abbildung 1.5: Feynman-Graph zum Zerfall eines neutralen Mesons A über ein virtuelles Photon in ein Leptonenpaar.

Das Vektormesondominanzmodell ist in der Lage, den η -Übergangsformfaktor zu beschreiben. Die gemessenen Werte für den Übergangsformfaktor des ω -Mesons können jedoch im Rahmen des Modells nicht reproduziert werden (siehe Abbildung 1.6). Die in Abbildung 1.6 eingezeichneten Datenpunkte entsprechen experimentellen Daten aus der Reaktion $\omega \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-$, die am IHEP mit dem Leptonen-G-Spektrometer erhalten wurden [Bus78]. Die Kurven 2 bis 4 sind Vorhersagen verschiedener Modelle. Eine starke Abweichung von den Vorhersagen des VDMs zeigt sich für höhere q^2 -Werte, das heißt, die zum elektromagnetischen Formfaktor proportionale Amplitude des Prozesses wird stark unterschätzt.

Die genaue Kenntnis der Formfaktoren ist jedoch nicht nur entscheidend für das Verständnis der Hadronen, sondern auch notwendig für das quantitative Verständnis von Dileptonenmassenspektren aus relativistischen Schwerionenkollisionen, wie im folgenden Kapitel erläutert wird.

1.2 Leptonenpaare aus Schwerionenkollisionen

Die Spektroskopie von Leptonenpaaren aus dem elektromagnetischen Zerfall der leichten Vektormesonen ρ , ω , und ϕ ermöglicht den experimentellen Zugang zur Untersuchung der Eigenschaften von Hadronen in heißer und dichter Kernmaterie. Ein

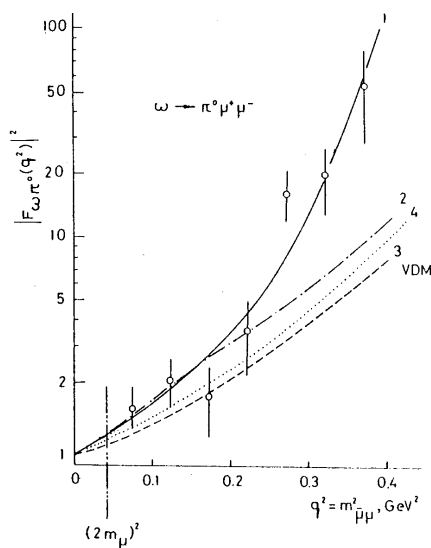


Abbildung 1.6: Übergangsformfaktor für den $\omega \pi^0$ -Vertex. Die Punkte sind experimentelle Werte, die mit Hilfe einer Polapproximation gefittet wurden. Kurve 3 wurde mit VDM berechnet [Lan85].

Meson	Masse [MeV/c ²]	Breite [MeV/c ²]	Lebensdauer [fm/c]	Dominanter Zerfall	Verzweigungsverhältnis e ⁺ e ⁻
ρ^0	770	152	1.3	$\pi^+\pi^-$ (~100%)	$4.4 \cdot 10^{-5}$
ω	783	8.43	23.4	$\pi^+\pi^-\pi^0$ (89%)	$7.2 \cdot 10^{-5}$
ϕ	1019	4.43	44.4	K^+K^- (49%)	$3.1 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 1.1: Eigenschaften der leichten neutralen Vektormesonen ρ , ω und ϕ .

entscheidender Vorteil der leptonischen Zerfallsprodukte ist dabei, daß sie keiner starken Endzustandswechselwirkung unterliegen, d.h. einen ungestörten Einblick in die hadronische Materie ermöglichen. Die Analyse entsprechender Experimente bzw. experimenteller Daten erfordert jedoch ein genaues Verständnis der einzelnen Produktionsprozesse, die zu einem Dileptonenspektrum beitragen. Dieses sind neben den relevanten leptonischen Zerfällen der Vektormesonen auch semileptonische Prozesse.

Entsprechende Dileptonenspektren aus relativistischen und ultrarelativistischen Kern-Kern-Kollisionen wurden in der Vergangenheit von mehreren Experimenten aufgenommen. Dimyonenspektren wurden am CERN-SPS von HELIOS [Ang98] und NA50 aufgenommen, Dielektronenspektren von CERES am CERN-SPS und vom DLS am BEVALAC (Berkeley, USA).

Das DLS-Experiment (**Di**Lepton **S**pectrometer) erlaubt den Nachweis von Elektron-Positron-Paaren niedriger invarianter Masse ($0.1 \text{ GeV}/c^2 < M_{\text{inv}} < 1 \text{ GeV}/c^2$) in Proton-Kern- und Kern-Kern-Kollisionen bis 5 AGeV. Hierfür besitzt das Spektrometer zwei Detektorarme, die unter 40° zur Strahlrichtung angeordnet sind und damit den Bereich mittlerer Rapidität abdecken (siehe Abbildung 1.7). Die einzelnen Detektorarme bestehen aus Driftkammern, Szintillator-Hodoskopen sowie Schwellencherenkov-Detektoren jeweils vor und hinter einem Dipolmagneten.

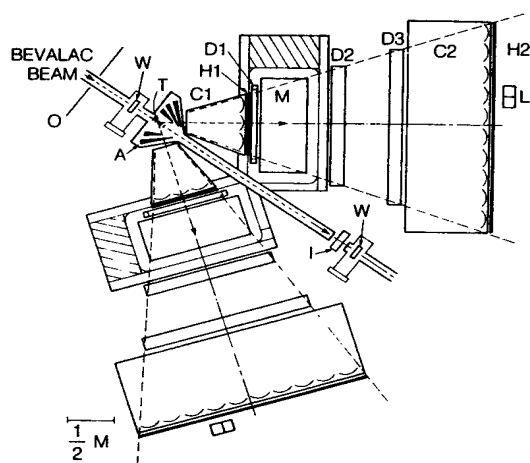


Abbildung 1.7: Aufsicht auf das DLS. Das Spektrometer besitzt zwei Detektorarme, die aus Driftkammern (D), Hodoskop (H) und Schwellencherenkov-Detektoren (C) vor und hinter einem Dipolmagneten (M) bestehen [Yeg90].

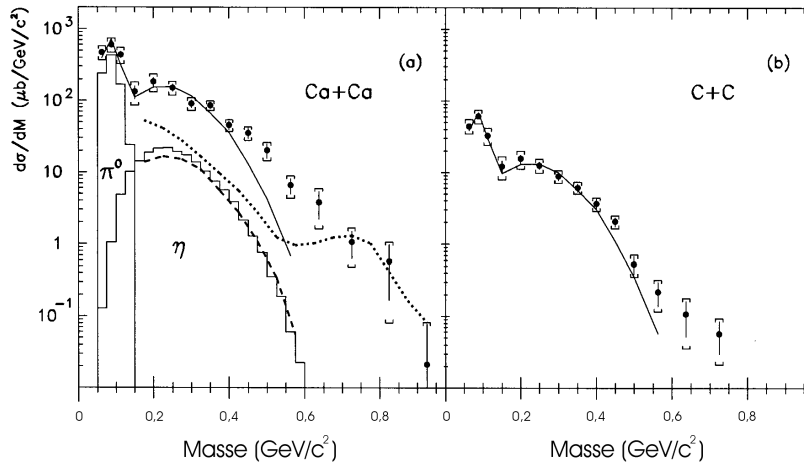


Abbildung 1.8: Mit dem DLS gemessene Dileptonenspektren für die Reaktionen $Ca+Ca$ bzw. $C+C$ bei 1 AGeV. Die durchgezogene Kurve ist ein Fit an die Daten bei niedrigen Massen unter Berücksichtigung der bekannten Dileptonenquellen. Die gepunktete Kurve ist eine BUU-Rechnung. Die Histogramme zeigen eine Abschätzung der zu erwartenden π^0 - und η -Beiträge basierend auf TAPS-Messungen ([Ber94], [Sch94]) und einem isotropen thermischen Modell [Por97].

Untersucht wurden die Dileptonenproduktion in Proton-Proton- und Proton-Deuteron-Kollisionen zwischen 1.05 - 4.9 GeV sowie Kern-Kern-Kollisionen leichter Systeme (bis $Ca + Ca$ bei 1.05 AGeV). Ein Vergleich der bestimmten Paarraten aus $Ca + Ca$ und $C + C$ -Kollisionen zeigt einen signifikanten Dileptonenüberschuß im invariante Massebereich $M_{inv} > 0.5 \text{ GeV}/c^2$ [Por97]. Dieser Überschuß wird von Modellen unter Verwendung der bekannten Dileptonenquellen nicht erklärt, Pionenannihilation leistet bei BEVALAC-Energien keinen hinreichenden Beitrag zur Erklärung, auch eine Begründung durch fallende Mesonenmassen ist im DLS-Fall umstritten [Bra99].

Limitiert wird die Leistungsfähigkeit des Spektrometers vor allem durch die geringe geometrische Akzeptanz sowie die geringe Massenauflösung von ca. 12 %, die eine Untersuchung der bereits erwähnten Mediumeffekte der leichten Vektormesonen nicht erlaubt.

Abbildung 1.9 zeigt die Ergebnisse der CERES-Kollaboration zur Produktion von e^+e^- -Paaren in Pb-Au-Kollisionen bei 158 AGeV [Len98]. Im invariante Massebereich kleiner $500 \text{ MeV}/c^2$ wird das Dileptonenspektrum durch den Dalitz-Zerfall von π^0 , η , η' und ω dominiert, wohingegen der invariante Massebereich oberhalb $500 \text{ MeV}/c^2$ durch den leptonen Zerfall der leichten Vektormesonen ρ , ω , und ϕ bestimmt wird.

Die experimentellen Daten zeigen einen signifikanten Überschuß an e^+e^- -Paaren, der bei $200 \text{ MeV}/c^2$ einsetzt und am stärksten im Massebereich zwischen der doppelten Pionenmasse und ρ/ω -Resonanz ausgeprägt ist. Eine naheliegende Deutung des Überschusses durch verstärkte Pionen-Annihilation ist jedoch nicht quantitativ konsistent mit den experimentellen Daten [Rap99]. Der gemessene Dielektronen-

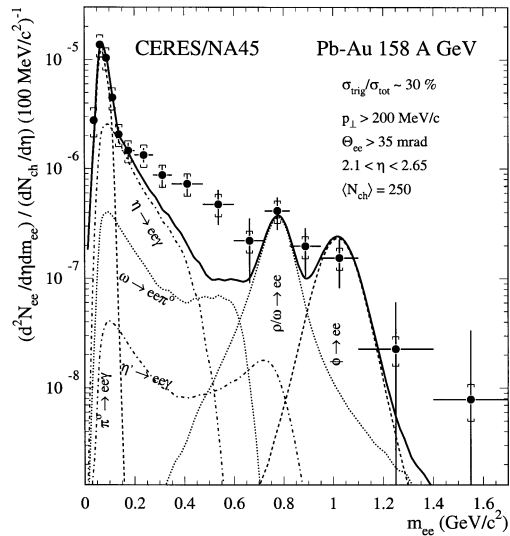


Abbildung 1.9: Invariantes e^+e^- -Massenspektrum aus Pb-Au Kollisionen bei 158 A GeV. Verglichen werden die Daten mit der erwarteten Paarrate [Len98].

überschuß läßt sich theoretisch erklären, wenn man eine Modifikation der Mesoneneigenschaften, wie z.B. der Mesonenmasse in dichter Kernmaterie, annimmt ([Cas98], [Wam98]). Solche Modifikationen werden als Signale der Wiederherstellung der chiralen Symmetrie vorgeschlagen.

1.2.1 Hadronenmassen und chirale Symmetrie

Im asymptotischen Limit masseloser Quarks ist die Chiralität eine Erhaltungsgröße in der Quantenchromodynamik. Dies bedeutet, daß die Helizität, d.h. die Projektion des Spins auf den Impulsvektor, von links- und rechtshändigen Quarks einzeln erhalten ist. Die Berücksichtigung der experimentell beobachtbaren Massen der von Gluonen- und Quarkpaarwolken befreiten Stromquarks von [Gas82]

$$m_u = (5 \pm 2) \frac{MeV}{c^2} \quad m_d = (9 \pm 3) \frac{MeV}{c^2}$$

bewirkt eine explizite Brechung der chiralen Symmetrie, da nun bereits die Lagrangefunktion nicht mehr invariant unter der entsprechenden Transformation ist.

Darüber hinaus ist die chirale Symmetrie im Vakuum durch einen nichtverschwindenden Erwartungswert für die Dichte virtueller Quark-Antiquark-Paare $\langle \bar{q}q \rangle$ spontan gebrochen. Aus der Analyse experimenteller Daten der Mesonenspektroskopie kann dieser Erwartungswert, der auch als chirales Kondensat bzw. Quarkkondensat bezeichnet wird, bestimmt werden [Shi79]:

$$\langle \bar{q}q \rangle \approx - \left\{ (230 \pm 25) \frac{MeV}{\hbar c} \right\}^3 = -1,6 fm^{-3}$$

Im Rahmen des Nambu- und Jona-Lasinio-Modells existiert eine Wechselwirkung der Quarks mit dem chiralen Kondensat [Nam61]. Dies bewirkt die Erzeugung einer

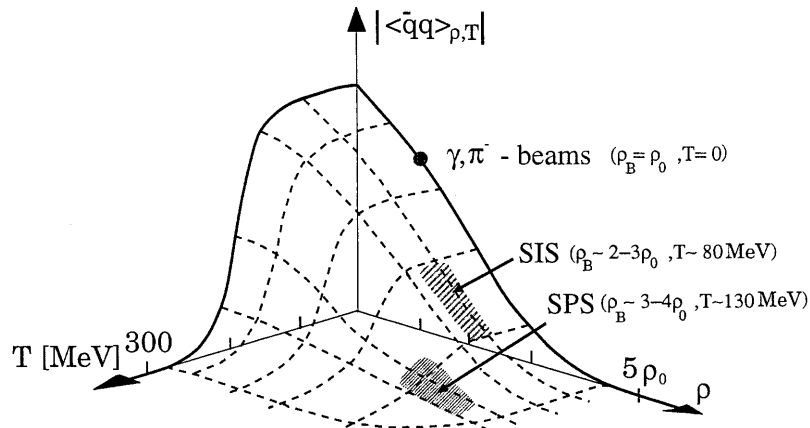


Abbildung 1.10: Erwartungswert des chiralen Kondensats als Funktion der Nukleonendichte ρ in Einheiten der Grundzustandsdichte von Kernmaterie ($\rho_0 = 0,17 \text{ fm}^{-3}$) und der Temperatur T . Die an verschiedenen Beschleunigern sowie mit verschiedenen Strahlen erreichbaren (ρ, T) -Wertepaare sind angedeutet [Wei94].

dynamischen Quarkmasse, die mit der Konstituentenquarkmasse identifiziert wird. Für die aus Quarks aufgebauten Nukleonen wird ein linearer Zusammenhang zwischen der Nukleonmasse und dem Vakuumerwartungswert des Quarkkondensats erwartet.

1.2.2 Restauration der chiralen Symmetrie

Mit der Abnahme des Absolutbetrags des Vakuumerwartungswerts der virtuellen Quark-Antiquark-Paare wird eine Wiederherstellung der chiralen Symmetrie erwartet. Eine theoretische Vorhersage der Abhängigkeit des chiralen Kondensats von Dichte und Temperatur auf Basis des Nambu- und Jona-Lasinio-Modells ist in Abbildung 1.10 dargestellt. Die Abbildung zeigt, daß Modifikationen des chiralen Kondensats in einem weiten Bereich von Temperaturen und Dichten stattfinden sollten [Wei94].

Im Gegensatz zur Temperatur, die bis 150 MeV keinen signifikanten Einfluß auf den Erwartungswert des Kondensats zeigt, besteht ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Dichte und dem Kondensat. Danach wird das chirale Kondensat schon innerhalb normaler Kernmaterie ($\rho = \rho_0$) um etwa 25 % reduziert. Eine vollständige Restauration der chiralen Symmetrie erfolgt in diesem Modell bei $\rho \approx 5 \rho_0$. Bei Baryondichten von 2-3 ρ_0 , die in relativistischen Schwerionenstößen bei SIS-Energien erreicht werden, sollte das Kondensat bereits um mehr als 60 % reduziert sein. Es stellt sich nun die Frage, inwieweit diese Verringerung des chiralen Kondensats eine Modifikation der Hadronenmassen hervorruft, d.h. ob der bereits erwähnte lineare Zusammenhang für die Nukleonenmassen auch für die Vektormesonmassen gilt.

Im Rahmen der verschiedenen Modelle wird eine unterschiedlich starke Reduktion der Mesonenmassen M_M^* in Kernmaterie im Vergleich zur Masse im Vakuum M_M vorhergesagt. In einem auf QCD-Symmetrien basierenden Modell erwarten Brown und

Rho eine Skalierung der Massen der leichten Vektormesonen mit der dritten Wurzel des chiralen Kondensats [Bro91]:

$$\frac{M_M^*}{M_M} = \left(\frac{\langle \bar{q}q \rangle_\rho}{\langle \bar{q}q \rangle_0} \right)^{1/3}$$

Für die Grundzustandsdichte $\rho = \rho_0$ von Kernmaterie würde dies bereits zu einer Verringerung der Mesonenmassen von ca. 9 % führen. Eine nahezu doppelt so starke Verringerung der Mesonenmasse liefert das Modell von Hatsuda [Hat92], in dem folgende Skalierung der Mesonenmassen vorhergesagt wird.

$$\frac{M_M^*}{M_M} = \left(1 - \alpha \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \right)$$

Der Parameter α ist hier 0.18, so daß eine Massenverschiebung von 18 % für die Grundzustandsdichte ρ_0 beobachtbar sein sollte.

1.3 Dileptonenspektroskopie mit HADES

Experimente mit Kern-Kern-Stößen bei SIS-Energie erlauben die Erzeugung von Vektormesonen in Kernmaterie mit einer maximalen Baryondichte von 2-3 ρ_0 und einer Temperatur von etwas 80 MeV (siehe Abbildung 1.10).

Zum Nachweis der in diesen Kollisionen produzierten Dielektronen wurde im Rahmen einer internationalen Kollaboration das Dielektronen-Spektrometer HADES (**H**igh **A**cceptance **D**i**E**lektron **S**pectrometer) konzipiert und realisiert (siehe Abbildung 1.11). Im Vergleich zum DLS besitzt HADES für e^+e^- -Paare eine um zwei Größenordnungen höhere geometrische Akzeptanz sowie eine wesentlich bessere Massenauflösung von etwa 1 % (σ) im invarianten Massebereich bis 1 GeV/c² (DLS: 12 %). Hierdurch wird

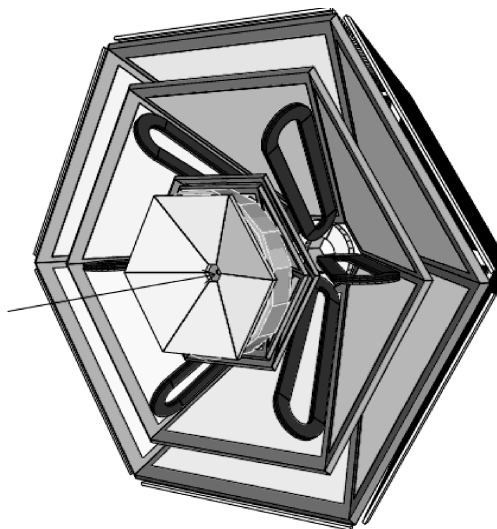


Abbildung 1.11: Schematische 3D-Ansicht des HADES-Spektrometers. Erkennbar ist die sechsfache azimutale Symmetrie der einzelnen Detektorkomponenten sowie die wesentlich größere geometrische Akzeptanz im Vergleich zum DLS. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Komponenten erfolgt in Kapitel 2.

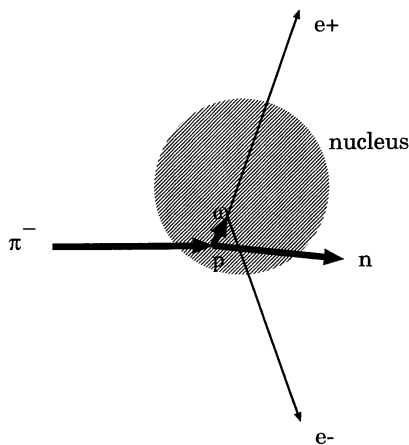


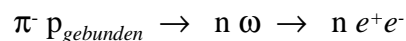
Abbildung 1.12: Schematische Darstellung der Erzeugung eines in Ruhe befindlichen ω -Mesons in einem Kern (nucleus).

eine Trennung von ρ - und ω -Mesonen in der Massenverteilung möglich. Darüber hinaus ist das Spektrometer für hohe Kollisionsraten von bis zu 10^6 Kern-Kern-Kollisionen pro Sekunde und hohe Multiplizitäten von bis zu 200 geladenen Teilchen in einer Kollision konzipiert, so daß Kollisionssysteme bis Au+Au bei 1.5 AGeV untersucht werden können.

Neben der Untersuchung von Mediummodifikationen bei den höchsten am SIS erreichbaren Dichten umfaßt das Experimentprogramm die Untersuchung von pion- und protoninduzierten Reaktionen, die im folgenden kurz skizziert werden sollen:

Die bei SIS-Energien in Kern-Kern-Kollision gebildete Phase hoher Baryondichte existiert jedoch nur für einen Zeitraum von 10-15 fm/c, so daß nur die kurzlebigen ρ -Mesonen noch in der eigentlichen Kollisionszone zerfallen. ω - und ϕ -Mesonen zerfallen zum größten Teil erst in der Expansionsphase des Systems, das heißt, die Spektroskopie der leptonischen Zerfallsprodukte dieser Mesonen stellt ein zeitliches und räumliches Integral über einen dynamischen Prozeß dar. In diesem Zusammenhang ist jedoch zu berücksichtigen, daß auf Grund der Wechselwirkung mit dem hadronischen Medium eine deutliche Verkürzung der Lebensdauer des ω -Mesons im Medium vorhergesagt wird [Kli97].

Eine Möglichkeit, sogenannte In-Medium-Effekte bei den langlebigen Mesonen zu beobachten, ist deren nahezu rückstoßfreie Produktion innerhalb eines Kerns. Die entsprechenden Parameter der umgebenden hadronischen Materie sind dabei $\rho = \rho_0$ und $T = 0$ MeV. Ein Beispiel hierfür ist die pioninduzierte Produktion eines ω -Mesons in einem Kern gemäß¹:



Eine schematische Darstellung der Reaktion zeigt Abbildung 1.12. Der Nachweis der beiden Leptonen im HADES-Spektrometer erfordert jedoch die Erzeugung vom ω -

1. Neben der pion- ist auch die protoninduzierte ω -Mesonenproduktion im Kern möglich.

Mesonen mit einem gewissen Impuls in Vorwärtsrichtung. Die deutliche Verkürzung der ω -Lebensdauer sollte jedoch gewährleisten, daß der überwiegende Teil dieser ω -Mesonen noch im Kern zerfällt.

Entsprechende Reaktionen sind durch die Verfügbarkeit von π^\pm -Strahlen an der GSI seit 1998 möglich. Daneben erlauben pion- bzw. protoninduzierte Reaktionen die systematische Untersuchung der verschiedenen Dileptonenquellen, die zum Dileptonenspektrum einer Kern-Kern-Kollision beitragen. Von besonderem Interesse sind dabei die das Spektrum bis 500 MeV/c² dominierenden Dalitz-Zerfälle von η -Mesonen und Δ -Resonanzen sowie pn-Bremsstrahlungsprozesse. Weiterhin erlaubt die Untersuchung des Dalitz-Zerfalls der neutralen Mesonen die Bestimmung der elektromagnetischen Formfaktoren dieser Mesonen im zeitartigen Bereich.

Eine Möglichkeit, mit dem Dileptonenspektrometer HADES bei GSI den ω -Übergangsformfaktor zu bestimmen, ist z. B. die pioninduzierte Reaktion:

$$\pi^- p \rightarrow n \omega \rightarrow n \pi^0 e^+ e^- \rightarrow n \gamma \gamma e^+ e^-$$

Der Nachweis der entsprechenden Neutronen kann dabei mit dem LAND¹-Spektrometer erfolgen [Bla92]. Für den Nachweis der beiden Photonen wird ein Kalorimeter benötigt (z. B. TAPS² [Nov91]). Weitere Möglichkeiten, den ω -Übergangsformfaktor mit HADES zu bestimmen, sind die proton- bzw. pioninduzierte Reaktion:

$$\begin{aligned} p p &\rightarrow p p \omega \rightarrow p p \pi^0 e^+ e^- \rightarrow p p \gamma \gamma e^+ e^- \\ \pi^+ p &\rightarrow \pi^+ p \omega \rightarrow \pi^+ p \pi^0 e^+ e^- \rightarrow \pi^+ p \gamma \gamma e^+ e^- \end{aligned}$$

Auch hier erfolgt der Nachweis der geladenen Teilchen im Ausgangskanal mit dem Dileptonenspektrometer HADES. Die beiden Photonen werden jedoch nur indirekt über eine Bestimmung der fehlenden Masse des π^0 -Mesons nachgewiesen. Der Vorteil der pioninduzierten Reaktion ist dabei der wesentlich höhere Querschnitt von bis zu 2.5 mb bei einem Strahlimpuls von 2.4 GeV/c [Lan02] und der wesentlich geringere kombinatorische Untergrund.

Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Teildetektoren des HADES-Spektrometers erfolgt im nachfolgenden Kapitel. Der Nachweis von Dileptonen innerhalb eines dominierenden hadronischen Untergrunds erfordert neben einem hochselektiven Spektrometer ein effizientes Triggersystem, das hohe Ereignisraten sowie hohe Teilchenmultiplizitäten in Echtzeit verarbeiten kann. Kapitel 3 beschreibt die Anforderungen sowie die Struktur des HADES-Trigger- und Auslesesystems. Im Anschluß daran wird der Hardware-Triggeralgorithmus zur Erkennung

1. Large Area Neutron Detector
2. Two Arm Photon Spectrometer

elektromagnetischer Signaturen im HADES-Schauerdetektor vorgestellt. Die für den Schauerdetektor entwickelte Trigger- und Ausleseelektronik wird in Kapitel 5 beschrieben. Im abschließenden Kapitel 6 werden die Ergebnisse und Erfahrungen aus den bisherigen HADES-Teststrahlzeiten vorgestellt und ein Ausblick auf weitere Entwicklungen gegeben.

2.1 HADES im Überblick

Die in der Einleitung skizzierte physikalische Zielsetzung des HADES-Projekts erfordert ein hoch selektives Detektorsystem zur Dileptonenspektroskopie, das den Nachweis des stark unterdrückten elektromagnetischen Zerfalls der Vektormesonen in Dileptonenpaare innerhalb eines von Hadronen dominierten Untergrundes erlaubt.

Das High-Acceptance-Di-Electron-Spektrometer (HADES), welches zur Zeit am Schwerionensynchrotron (SIS) der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt (GSI) in Betrieb genommen wird, ist so konzipiert, daß dieser schwierige experimentelle Zugang ermöglicht wird. Dieses auch als Detektorsystem der zweiten Generation bezeichnete Spektrometer zeichnet sich durch seine große geometrische Akzeptanz (volle Abdeckung des Azimuts bei einer Polarwinkelakzeptanz von 18° bis 85°), gute Massenauflösung sowie durch eine sehr hohe Zählratenfestigkeit (10^6 Ereignisse/s) aus. Abbildung 2.1 zeigt eine schematische Darstellung des Spektrometers, die die wichtigsten Komponenten beinhaltet und deren relative Anordnung bzgl. der Strahlachse verdeutlicht.

Der eigentliche Nachweis der Elektronen bzw. Positronen erfolgt durch mehrere unabhängige Detektoren, die in einer hexagonalen Symmetrie jeweils um die Strahlachse angeordnet sind (siehe Abbildung 1.11). Jeder einzelne Detektor ist dabei in sechs Segmente unterteilt, die einen azimutalen Winkelbereich von 60° abdecken.

Zentrale Detektorkomponente ist ein hadronenblinder ringabbildender Cherenkov-Detektor (RICH)¹, in dem die Elektronen bzw. Positronen über ihre ultraviolette Cherenkov-Strahlung nachgewiesen werden. Ergänzt wird diese Detektorkomponente durch eine Flugzeitwand (TOF)², die eine Teilchendiskriminierung via Flugzeitmessung ermöglicht sowie einem Schauerdetektor (SHOWER), der eine Elektronen/Positronen-Identifikation durch den Nachweis elektromagnetischer Schauer ermöglicht. Gleichzeitig dient die Flugzeitwand der Auswahl zentraler Ereignisse durch die Ermittlung der Multiplizität der geladenen Teilchen und damit als schnelle erste Triggerstufe des Detektorsystems [Sal95].

1. Ring Imaging Cherenkov Counter

2. Time of Flight

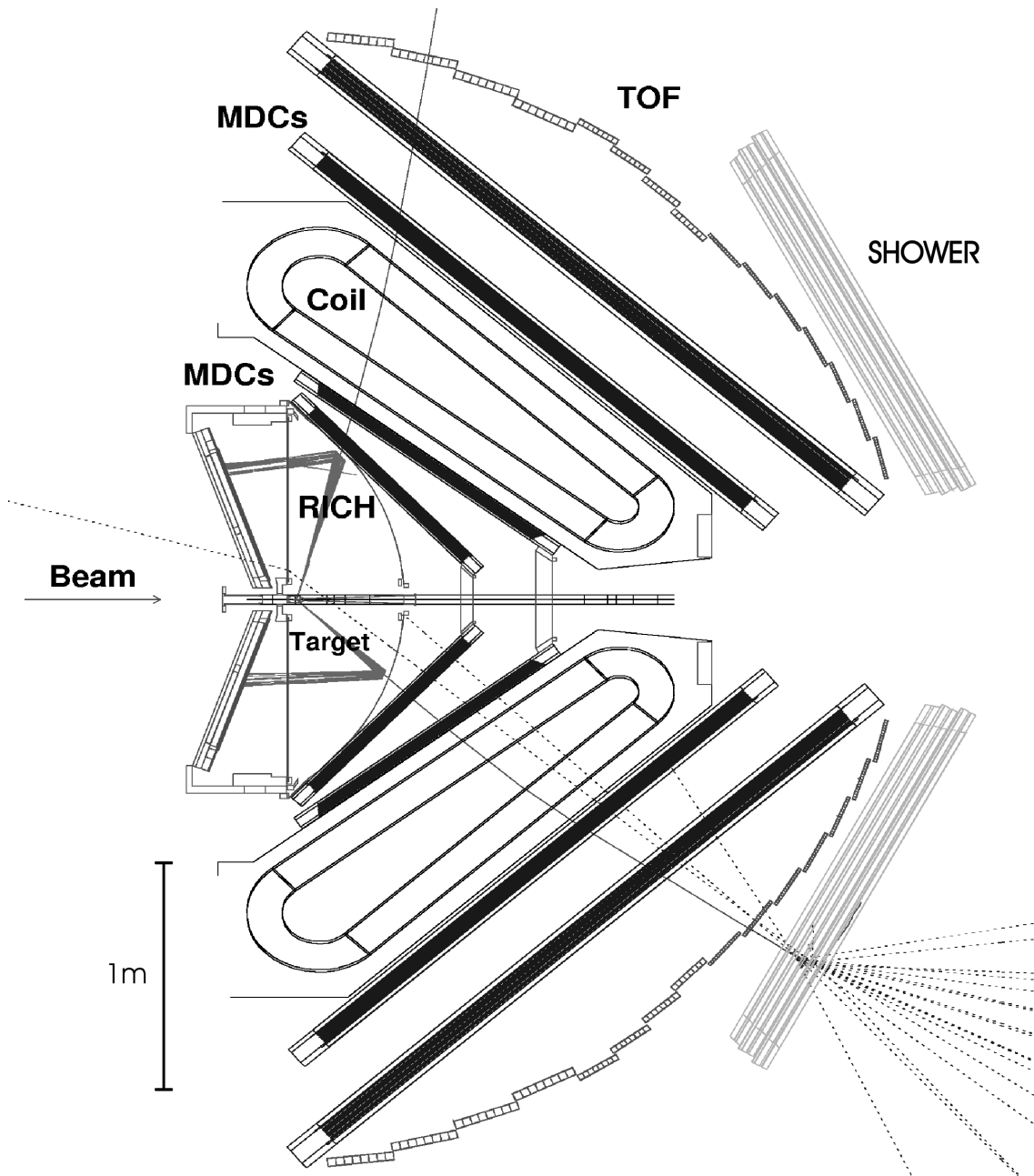


Abbildung 2.1: Querschnitt durch das HADES-Detektorsystem. Das Detektorsystem besteht aus einem ringabbildenden Cherenkov-Detektor (RICH), der als zentrale Komponente das Target umgibt. Weiter außen befindet sich ein aus sechs supraleitenden Spulen (COIL) und jeweils zwei vor und hinter dem Magnetfeld positionierten Mini-Drift-Kammern (MDCs) bestehendes Magnetspektrometer zur Impulsbestimmung. Das Detektorsystem wird komplettiert durch eine Flugzeitwand (TOF) sowie einen Schauerdetektor (SHOWER). Die beiden eingezeichneten Trajektorien entsprechen einem Elektron-/Positron-Paar aus einem simulierten ω -Zerfall. Das Positron wird zur Strahlachse abgelenkt und erzeugt einen elektromagnetischen Schauer im Bleikonverter des Schauerdetektors. Das Elektron durchfliegt die Flugzeitwand [Had94].

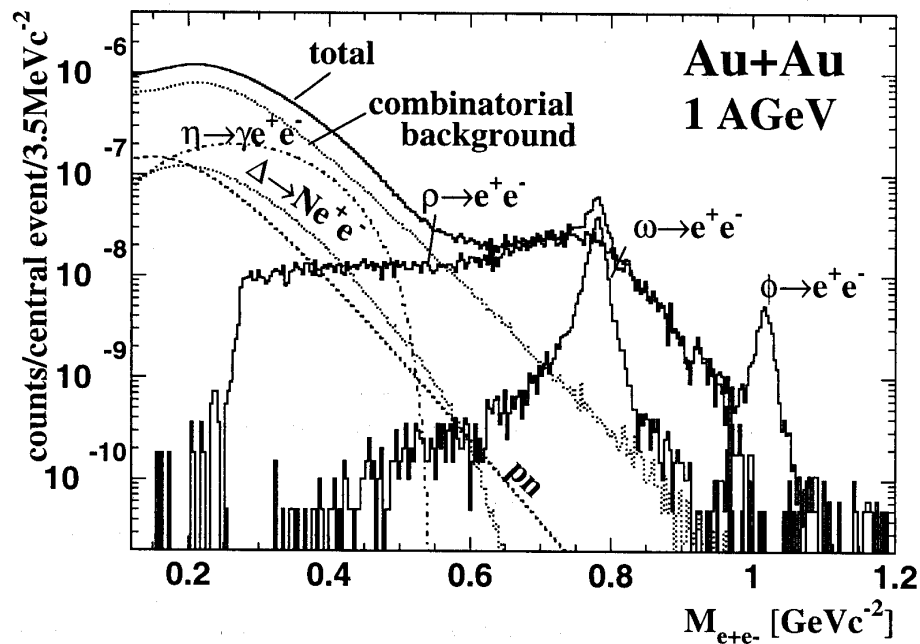


Abbildung 2.2: Simuliertes Dileptonenspektrum für zentrale Au+Au-Kollisionen bei 1 AGeV unter Berücksichtigung der vollständigen Spektrometereigenschaften. Man erkennt, daß das invariante Massenspektrum im Bereich $m_{inv} > 500 \text{ MeV}/c^2$ vollständig durch den leptonenischen Zerfall der leichten Vektormesonen ρ , ω und ϕ dominiert ist, während unterhalb dieser Schwelle primär kontinuierliche Quellen zum Massenspektrum beitragen [Sch95].

Die für die Separation der leichten Vektormesonen ρ und ω notwendige Massenauflösung von $\sigma_m \leq 10 \text{ MeV}/c^2$ und die daraus resultierende minimale Impulsauflösung von einem Prozent wird durch ein Magnetspektrometer erreicht, das aus jeweils zwei Lagen von Mini-Drift-Kammern (MDCs)¹ vor und hinter einem mit supraleitenden Magnetspulen (COIL) erzeugten toroidalen Magnetfeld besteht.

Ein durch Monte-Carlo-Simulationen des vollständigen Spektrometers erhaltenes invariantes Massenspektrum aus zentralen Au+Au-Kollisionen bei einer Strahlenergie von 1 AGeV zeigt Abbildung 2.2. Erkennbar ist vor allem die mögliche Trennung der ρ/ω -Signale.

Die folgenden Kapitel stellen den Aufbau sowie die Funktion der einzelnen Detektorkomponenten nach Systemen gegliedert vor. Die Darstellung der Funktionsweise der einzelnen Komponenten ist notwendig, um die hierauf aufbauenden Konzepte und Elemente des Auslese- und Triggersystems motivieren zu können. Einen besonders breiten Raum nimmt dabei die Beschreibung des Schauerdetektors ein, für den im Rahmen dieser Arbeit ein kombiniertes Auslese- und Triggersystem entwickelt wurde.

1. Mini Drift Chambers

2.2 Der ringabbildende Cherenkov-Detektor

Im Gegensatz zu einem Cherenkov-Schwellendetektor wird bei einem ringabbildenden Cherenkov-Detektor das in einem Lichtkegel emittierte Cherenkov-Licht auf einen ortsempfindlichen Detektor als Ring abgebildet. Ein Cherenkov-Lichtkegel entsteht immer dann, wenn ein geladenes Teilchen ein Dielektrikum durchquert, in dem die Geschwindigkeit β_{Part} des Teilchens die Phasengeschwindigkeit β_{Thres} elektromagnetischer Felder in diesem Medium übersteigt [Tam37].

$$\beta_{Part} > \beta_{Thres} = \frac{1}{n(\omega)} = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma_{thr}^2}}$$

(n : Brechungsindex des Dielektrikums; ω : Frequenz des Lichts; γ_{thr} : Lorentzfaktor)

Der eigentliche Öffnungswinkel θ_C des Lichtkegels, unter dem das Cherenkov-Licht rotationssymmetrisch zur Bewegungsrichtung des Teilchens emittiert wird, ist dabei eine Funktion der Geschwindigkeit des Teilchens.

$$\cos(\theta_C) = \frac{1}{n(\omega) \cdot \beta_{Part}}$$

Der ringabbildende Cherenkov-Detektor des HADES-Spektrometers [Zei99] besteht im wesentlichen aus einem gasförmigen Radiator, der das segmentierte Target im gesamten geometrischen Akzeptanzbereich des Spektrometers umgibt, einem sphärischen Spiegel (Durchmesser $\varnothing = 145$ cm, Krümmungsradius $R = 87$ cm) und einem unter Rückwärtswinkeln installierten UV-Photonendetektor, auf den das Cherenkov-Licht fokussiert wird. Einen Querschnitt durch den Detektor zeigt Abbildung 2.3.

Als Radiatorgas wird Perfluorbutan (C_4F_{10}) verwendet. Dieses Gas zeichnet sich durch sein gutes Transmissionsverhalten im VUV-Bereich sowie einen günstigen Lorentzfaktor von $\gamma_{thr} = 18$ aus, so daß der RICH insensitiv für die bei SIS-Energien entstehenden geladenen Hadronen ist und im wesentlichen nur Elektronen bzw. Positronen die Cherenkov-Schwelle überschreiten. Diese emittieren im für HADES relevanten Impulsbereich von $p > 100$ MeV/c Cherenkov-Licht asymptotisch unter einem Öffnungswinkel von $\theta_C = 3.18^\circ$, woraus Ringe mit einem konstanten Durchmesser von 5 cm im Photonendetektor resultieren.

Bei dem Photonendetektor handelt es sich um eine Vieldrahtproportionalkammer (MWPC)¹ mit segmentierter CsI-Photokathode und einem CaF_2 -Fenster, das das Radiatorgas vom Gas des Photonendetektors trennt, gleichzeitig aber eine gute

1. Multi-wire Proportional Chamber

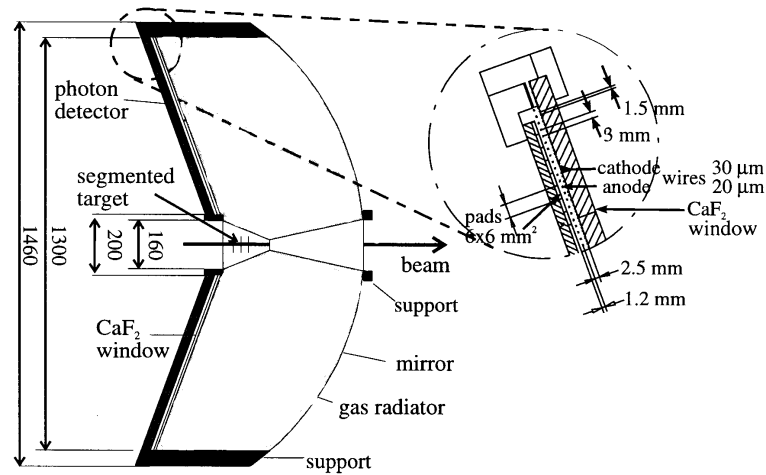


Abbildung 2.3: Schnitt durch den HADES-RICH (links) sowie eine Detailzeichnung des Photonendetektors (rechts). Alle angegebenen Maße ohne Einheiten sind in mm.

Transmission im VUV-Bereich garantiert [Ger96]. Die auf der Photokathode durch Cherenkov-Photonen ausgelösten Photoelektronen werden in der MWPC um einem Faktor 10^5 verstärkt und induzieren dabei elektrische Ladungen auf der Photokathode. Diese ist in 6560 Felder mit einer konstanten Breite von 6.6 mm und einer von der Feldposition abhängigen Höhe von 4.5 - 7.0 mm unterteilt, so daß eine Kompensation der durch Abbildungsfehler verursachten zunehmenden Exzentrizität der Cherenkov-Ringe für zunehmende polare Winkel erreicht wird.

Die Ladungsinformation der einzelnen Kathodenfelder wird ausgelesen und als Ortsinformation zur Ringrekonstruktion benutzt.

2.3 Die Minidriftkammern

Zusammen mit den sechs supraleitenden Spulen bilden die insgesamt 24 Driftkammern des Detektorsystems das Magnetspektrometer von HADES. Das von den Spulen erzeugte Magnetfeld hat eine toroidale Feldgeometrie, die es ermöglicht, die Region des RICH nahezu feldfrei zu halten. Die jeweils zwei Ebenen von Minidriftkammern vor und hinter dem eigentlichen Magnetfeldbereich erlauben die Rekonstruktion der Teilchenbahnen zwischen den einzelnen MDC-Ebenen. Aus der Ablenkung im bekannten Magnetfeld können dann die Teilchenimpulse bestimmt und im Falle von Leptonen zur Bestimmung der invarianten Masse benutzt werden. Unter Vernachlässigung der Ruhemasse der Elektronen/Positronen ergibt sich:

$$m_{inv} \cong 2 \sin\left(\frac{\alpha_{ab}}{2}\right) \sqrt{p_a \times p_b}$$

(α_{ab} : Laboröffnungswinkel zwischen den beiden Leptonen, $p_{a,b}$ Impuls der Leptonen)

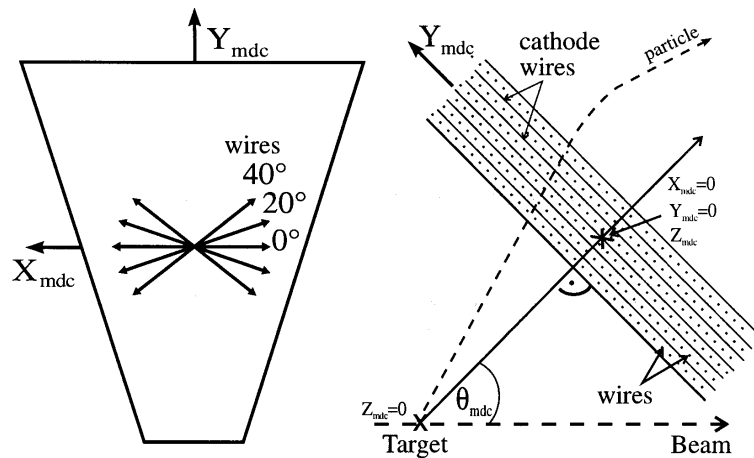


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung einer HADES-Driftkammer. (links) Die sechs Signaldrahtebenen nehmen vom Target aus gesehen die in der Skizze angegebenen Winkel ein. (rechts) Orientierung der Kammer bzgl. der Strahlachse.

Zur eindeutigen Rekonstruktion des Durchgangsortes durch die Kammer sind mindestens drei Driftzeiten aus Ebenen mit unterschiedlicher Orientierung der Signaldrähte zueinander notwendig. Um die Wahrscheinlichkeit von Doppeltreffern innerhalb der Doppelpulsauflösung einer Driftzelle zu minimieren, sind drei weitere Signaldrahtebenen in den HADES-Driftkammern realisiert (siehe Abbildung 2.4). Diese zusätzlichen Ebenen gewährleisten, daß selbst im Falle einer zentralen 1 AGeV Au+Au-Kollision mit 98% Sicherheit immer drei korrespondierende Driftzellen in verschiedenen Ebenen zu finden sind, durch die jeweils nur ein einziges geladenes Teilchen geflogen ist. Zwischen den Signaldrahtebenen liegen jeweils um 90 Grad gegen die Horizontale gedrehte Kathodendrahtebenen. Damit ergeben sich pro Kammer insgesamt 13 Drahtebenen [Gab98].

Neben der redundanten Bestimmung des Teilchenorts wurde zur Optimierung der Ortsrekonstruktion der Drahtabstand bzw. die eigentliche Größe der Driftzellen an die zu erwartende Teilchenmultiplizität angepaßt, so daß im Mittel nur 0.1-0.2 geladene Teilchen pro Driftzelle für eine zentrale 1 AGeV Au+Au-Kollision erwartet werden. Darüber hinaus sind die Driftzellen in ihren Abmessungen so gewählt, daß ihre Totzeit unter $10 \mu\text{s}$ liegt und die einzelnen Kammern eine gleichbleibende Granularität in allen vier Ebenen besitzen. Die Größe der einzelnen Driftzellen beträgt $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ für die innerste und $10 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ für die äußerste Kammerebene, woher die Bezeichnung „Mini“-Driftkammer resultiert. Die mit den Kammern erreichbare Ortsauflösung beträgt $\sigma_y = 35\text{--}50 \mu\text{m}$ in polarer und $\sigma_x = 85\text{--}125 \mu\text{m}$ in azimuthaler Richtung.

2.4 Die Flugzeitwand

Die Flugzeitwand besteht aus 1056 einzelnen Plastikszintillatorstreifen (BC408), die senkrecht orientiert um die Strahlachse angeordnet sind und einen polaren

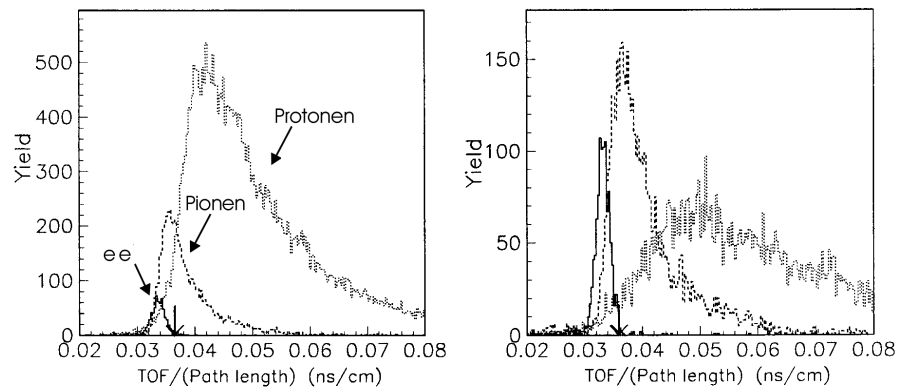


Abbildung 2.5: Auf die Entfernung zum Target normierte Teilchenflugzeiten in zentralen Au+Au-Kollision im polaren Winkelbereich $\vartheta < 45^\circ$ (links) sowie $\vartheta > 45^\circ$ (rechts). Der senkrechte Pfeil markiert das in der Simulation verwendete Flugzeitfenster. Zur Verdeutlichung wurde das Leptonensignal künstlich erhöht [Gar93].

Winkelbereich von $18^\circ < \vartheta < 85^\circ$ abdecken. Die Dimensionen der Streifen sind an die erwarteten Teilchenmultiplizitäten angepaßt. Sie betragen $40 \times 0.9 \times 0.9 \text{ cm}^3$ bei minimalen Polarwinkelwerten und bis zu $242 \times 5 \times 3 \text{ cm}^3$ bei maximalen Polarwinkelwerten. Die Doppeltrefferwahrscheinlichkeit wurde damit für den Fall einer zentralen Au+Au-Kollision auf einen Wert kleiner 20 % reduziert.

Die Szintillatorstreifen werden an beiden Enden über Lichtwellenleiter mit Photomultipliern ausgelesen. Dies ermöglicht einerseits eine Bestimmung der Teilchenflugzeit andererseits ist aus der Differenz der beiden Signallaufzeiten eine Ortsbestimmung entlang der Streifen möglich.

Ein Vergleich der zu erwartenden Protonen- und Pionenflugzeiten mit den Dielektronenflugzeiten für den Fall zentraler Au+Au-Kollisionen unter Berücksichtigung einer maximalen Zeitauflösung von 200 ps zeigt jedoch stark überlappende Flugzeiten im polaren Winkelbereich mit $\vartheta < 45^\circ$ (siehe Abbildung 2.5). Bei der Wahl eines Flugzeitfensters, welches eine Dielektroneneffizienz von 95% gewährleistet, fallen bei einer zentralen Au+Au-Kollision etwa 22 Hadronen in den Flugzeitbereich der Leptonen, so daß in diesem polaren Winkelbereich die Flugzeit als effektiver Leptonentrigger nicht geeignet ist.

Ein hiervon abweichendes Verhalten zeigt sich im polaren Winkelbereich $\vartheta > 45^\circ$, wo auf Grund der Zunahme der Hadronenflugzeiten eine Verwendung der Flugzeit im Leptonentrigger möglich ist. In diesem Bereich sind nur noch sechs Hadronen pro zentraler Kollision im Leptonenflugzeitfenster vorzufinden.

2.5 Der Schauerdetektor

Zur Verbesserung der Leptonenidentifizierung im polaren Winkelbereich $\vartheta < 45^\circ$ befindet sich hinter der Flugzeitwand der Schauerdetektor (siehe Abbildung 2.1). Diese

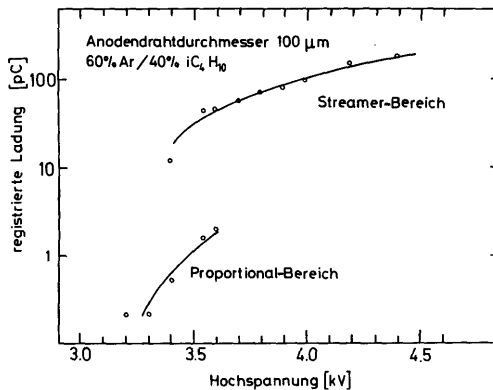


Abbildung 2.7: Registrierte Ladung einer Drahtkammer als Funktion der Signaldrahtspannung. Im Bereich um 3.5 kV ist der diskontinuierliche Übergang vom Proportional- zum Streamer-Modus bei Koexistenz der beiden Mechanismen in einem kleinen Überlappbereich zu erkennen [Bau84].

3.0 cm in den unteren Reihen, so daß die Wahrscheinlichkeit von Doppeltreffern bei einer zentralen 1 AGeV Au + Au-Kollision bei gleichzeitiger Einhaltung einer sinnvollen Ladungsintegrationsfläche auf einen Wert von unter 2 % minimiert werden konnte.

Die einzelnen Kammern sind mit einem Argon/Isobutan/Heptan-Gasgemisch im Verhältnis 0.33/0.65/0.02 gefüllt und werden bei einer Spannung von etwa 3200V (Signaldrähte: 3200 V, Felddrähte: 0 V) im sogenannten Self-Quenching-Streamer-Modus (SQS-Modus) betrieben [Ale80, Ata82]. Dieser Operationsbereich der Kammer entwickelt sich aus dem Proportional-Modus durch einen diskontinuierlichen Übergang, in dem beide Entladungsmechanismen für einen schmalen Überlappbereich koexistieren (Abbildung 2.7).

Beiden Modi gemein ist, daß die von einem einfallenden Teilchen im Gas erzeugten Ladungsträgerpaare (Primärionisation) zunächst durch das anliegende elektrische Feld separiert werden. Die Elektronen driften dabei zu den Zähldrähten (Anoden), d.h. in Bereiche sehr hoher Feldstärken ($1/r$ -Abhängigkeit des elektrischen Feldes). Wenn die Elektronen zwischen zwei Stößen, also auf ihrer freien Weglänge, genügend Energie aus dem Feld aufnehmen können, um ihrerseits zu ionisieren, kommt es zur Gasverstärkung.

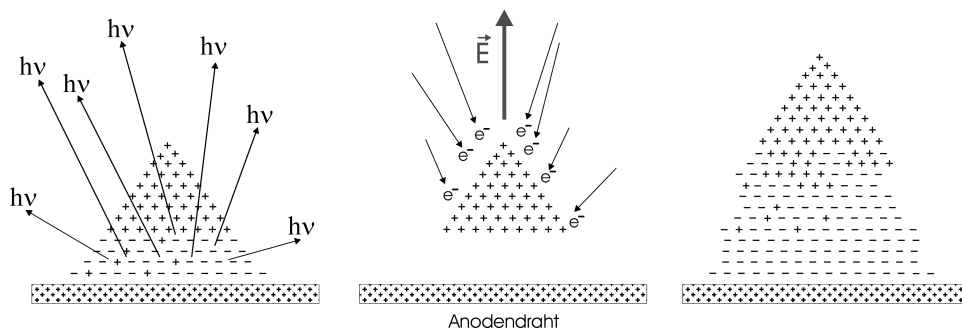


Abbildung 2.8: Illustration einer Streamerentladung an einem Anodendraht. Die durch Rekombination entstehenden Photonen erzeugen durch Photoeffekt in unmittelbarer Nähe der Lawine neue Elektronen, die den Ausgangspunkt weiterer Lawinen zwischen der Spitze der Raumladungswolke und der Kathode bilden und mit der ursprünglichen verschmelzen.

Der Proportionalbereich ist dadurch gekennzeichnet, daß der Gasverstärkungsfaktor für eine feste Spannung konstant ist, d.h. das gemessene Ladungssignal proportional zur Primäriodisation ist. Der eigentliche Verstärkungsfaktor steigt jedoch exponentiell mit der angelegten Spannung. Mit dem Erreichen sehr hoher lokaler Raumladungsdichten in der Nähe des Signaldrahts erfolgt jedoch eine lokale Kompensation des elektrischen Felds der Kammer und somit eine Verringerung der Gasverstärkung. In diesen Bereichen reduzierter Feldstärke ist eine Rekombination von Gasionen und Elektronen möglich, die die Erzeugung von Photonen bewirken. Diese werden in der unmittelbaren Nähe der Lawine über Photoeffekt wieder absorbiert und bilden den Ausgangspunkt neuer Lawinen, die zwischen der Spitze der Raumladungswolke und der Kathode entstehen und mit der ursprünglichen Lawine verschmelzen (siehe Abbildung 2.8). Das Anwachsen des Streamers erfolgt dabei ausschließlich in Richtung der Kathode. Der Ladungszuwachs des Streamers kommt durch die Abnahme der Rekombinationsprozesse in der Nähe der Kathode selbständig zum Erliegen (Self-Quenching) [Ata82].

Diese als Streamer bezeichneten Entladungsvorgänge erzeugen eine elektrische Ladung, die unabhängig von der Primäriodisation ist, d.h. pro Teilchendurchgang wird näherungsweise die gleiche Ladungsmenge erzeugt. Das in den Kammern gemessene Ladungssignal ist somit ein Maß für die Anzahl der einfallenden Teilchen.

2.5.1 Das Detektorprinzip

Hochenergetische geladene Teilchen erfahren bei ihrem Durchgang durch Materie neben dem Energieverlust durch Ionisation [Bet30] einen Energieverlust durch die Wechselwirkung mit dem Coulombfeld der Kerne der durchdrungenen Materie. Hierbei werden die Teilchen im Kern-Coulombfeld abgebremst und ein Teil der kinetischen Energie der Teilchen wird in Form von Photonen (Bremsstrahlung) abgestrahlt. Im Gegensatz zum Energieverlust durch Ionisation, der näherungsweise durch

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2 m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

wobei:

- A, Z - Massenzahl, Kernladungszahl des Absorbers
- z - Ladung des einfallenden Teilchens
- m_e - Elektronenmasse
- r_e - klassischer Elektronenradius ($r_e=2,8$ fm)
- N_A - Avogadro-Zahl
- δ - absorberspezifische Ionisationskonstante

beschrieben wird¹, ist der Energieverlust durch Bremsstrahlung proportional zur Energie E und umgekehrt proportional zum Massequadrat m^2 des einfallenden Teilchens und kann für hohe Energie durch

$$-\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A r_e^2 \frac{Z^2}{A} \cdot z^2 \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{m c^2} \right)^2 E \ln \frac{183}{Z^{1/3}}$$

wobei:

α - Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante

beschrieben werden. Daher ist der Energieverlust durch Bremsstrahlung für Pionen und Protonen im Vergleich zu Elektronen vernachlässigbar.

Die Energie, bei der diese beiden Energieverlustmechanismen für Elektronen gleich sind, nennt man kritische Energie E_C . Für schwere Elemente mit einer Kernladungszahl $Z > 12$ ist folgende Näherung möglich:

$$E_C = \frac{550 \text{ MeV}}{Z}$$

Für Blei ($Z = 82$) überwiegt der Bremsstrahlungsanteil bereits bei einer Energie von nur 7 MeV.

Besitzen die so erzeugten Photonen eine Energie oberhalb von 1.02 MeV, so besteht die Möglichkeit, daß sie im Feld eines Kerns ein Elektron-Positron-Paar erzeugen. Die Schwelle ist durch die doppelte Ruhemasse dieser Teilchen von jeweils 511 keV bestimmt. Ein elektromagnetischer Schauer entsteht nun durch die aufeinanderfolgenden Prozesse von Bremsstrahlung und Elektron-Positron-Paarbildung.

Die eigentliche Identifizierung von Elektronen bzw. Positronen im hadronischen Untergrund erfolgt im Schauerdetektor durch den Nachweis elektromagnetischer Schauer. Diese entstehen in den Bleikonvertern und können über eine Zunahme der geladenen Teilchen über die drei Drahtkammern hinweg erkannt werden. Auf die Anzahl der geladenen Teilchen kann auf Grund des SQS-Modus direkt aus der induzierten Ladung in den einzelnen Drahtkammern geschlossen werden. Das entsprechende Ladungsintegral wird dabei in allen drei Drahtkammern über eine Region gebildet, die durch die laterale Ausbreitung der elektromagnetischen Schauer bestimmt wird.

1. Die angegebene Gleichung für den mittleren Energieverlust pro Wegeinheit durch Ionisation muß im Falle von Elektronen wegen der Gleichheit der Massen der Stoßpartner leicht modifiziert werden, bleibt in ihrer Grundstruktur jedoch erhalten.

Eine Abschätzung der durch Vielfachstreuung hervorgerufenen lateralen Ausbreitung ist durch den Moliere-Radius R_M möglich:

$$R_M = \frac{21 \text{ MeV}}{E_C} X_0$$

Dieser besagt, daß 95 % der erzeugten Teilchen in einem Zylinder mit Radius $2 R_M$ um die Schauerachse enthalten sind. Unter Berücksichtigung der Schauerdetektor spezifischen Abmessungen muß das Ladungsintegral zur Teilchenzahlbestimmung über eine 3×3 große Padregion gebildet werden.

Für die Anwendung dieses Verfahrens zur Leptonenidentifizierung ist die Unempfindlichkeit der Vieldrahtkammern im SQS-Modus von der Primärionisation von entscheidender Bedeutung, da ein großer Teil der in Schwerionenkollisionen bei SIS-Energien erzeugten Protonen nicht minimal ionisierend ist und durch Energieverlust im Bleikonverter in den nachfolgenden Kammern eine erhöhte Primärionisation auslöst.

2.5.2 Ergebnisse mit Elektronen- und Protonenstrahlen

Ein Prototyp des Schauerdetektors, bestehend aus zwei Vieldrahtkammern (Preshower und Postshower-I) einer Größe von $40 \times 40 \text{ cm}^2$ mit 11 Padzeilen und 11 Padspalten separiert durch einen Bleikonverter mit einer Dicke von zwei Strahlungslängen, wurde einem kontinuierlichen Elektronenstrahl von 850 MeV am MAMI-Beschleuniger¹ in Mainz sowie einem 2.1 GeV Protonenstrahl am Fragmentseparator (FRS) der GSI ausgesetzt².

Die dabei erhaltenen Ladungssummenverteilungen in der Vieldrahtkammer vor (Preshower) und hinter dem Bleikonverter (Postshower-I) sind in Abbildung 2.9 dargestellt. Im Falle des Elektronenstrahls ist durch die Ausbildung elektromagnetischer Schauer im Bleikonverter ein starker Ladungszuwachs im Postshower-I-Detektor erkennbar, wohingegen im Falle des Protonenstrahls die Ladungsverteilung in beiden Kammern nahezu identisch ist.

Durch eine Analyse der induzierten Ladung in den beiden Ebenen des Detektors, d.h. einen Vergleich der in beiden Kammern gebildeten Ladungssumme über jeweils neun Kathodenfelder konnte eine Einzelelektronennachweiseffizienz von 82 % erreicht werden. Eine Ausweitung des Integrationsgebietes auf 25 Kathodenfelder erbrachte eine Erhöhung der Nachweiseffizienz von nur 5 % [Had98].

1. Mainzer Mikrotron

2. Die Drahtkammerauslese während dieser Testexperiment erfolgt mit konventioneller NIM- (Fast Amplifier) bzw. CAMAC-Elektronik (Le-Croy 4418 QDC)

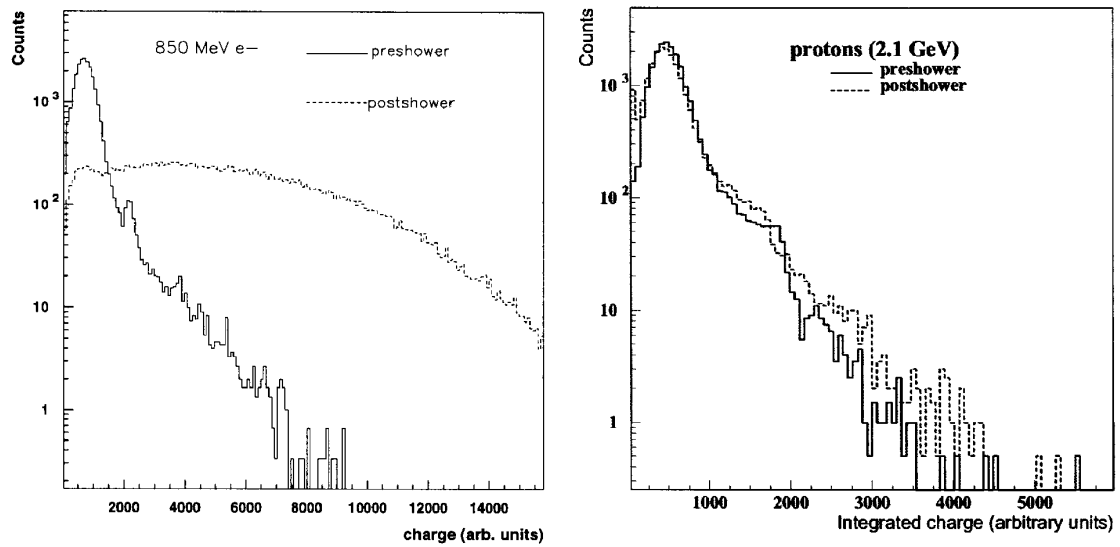


Abbildung 2.9: Ladungssummenverteilung, die mit einem Prototypen des Schauerdetektors an einem 0.85 GeV Elektronenstrahl (links) bzw. 2.1 GeV Protonenstrahl (rechts) erhalten wurde. Die Ladungssumme wurde dabei jeweils über eine 3 x 3 große Padregion gebildet. Für Elektronen ist ein eindeutiger Unterschied zwischen Preshower- und Postshower-I-Ladungsspektrum sichtbar [Had98].

3.1 Aufgabenstellung und Anforderung

Die geringe Produktionswahrscheinlichkeit von nur $3 \cdot 10^{-6}$ Dileptonenpaaren im invarianten Massebereich der leichten Vektormesonen ρ , ω und ϕ in einer zentralen 1 AGeV Au+Au Kollision [Win93] erfordert, daß das HADES-Spektrometer zum Erhalt einer hinreichenden Statistik bei hohen Ereignisraten betrieben werden muß. Infolgedessen ist das Trigger- und Auslesekonzept auf eine maximale Ereignisrate von 10^6 Ereignissen/s ausgelegt, die durch die Verwendung eines segmentierten Targets mit einer Wechselwirkungslänge von einem Prozent bei einer Strahlintensität des SIS Schwerionenstrahls von 10^8 Teilchen/s erreicht werden kann.

Unter Berücksichtigung der etwa 10^5 auszulesenden Kanäle im ganzen Spektrometer, einer für die einzelnen Detektorsysteme beabsichtigten Digitalisierungsbreite der analogen Detektorsignale sowie unter Vernachlässigung der Totzeit des Systems würde sich eine Rohdatenrate von 30 GByte/s ergeben, die eine erfolgreiche Durchführung des Experiments verhindern würde. Die Entwicklung eines hochselektiven Echtzeit-Triggersystems ist also von entscheidender Bedeutung für die Realisierung des Experiments. Die zentrale Aufgabenstellung des Triggersystems ist somit die Selektion von physikalisch relevanten Dielektronenereignissen in zentralen Schwerionenkollisionen und damit einhergehend eine minimale Reduktion des Rohdatenvolumens um mehrere Größenordnungen.

Abbildung 3.1 zeigt eine schematische Darstellung des Trigger- und Auslesesystems. Die Entscheidung, ob Rohdaten eines Ereignisses physikalisch relevante Informationen enthalten und somit für die spätere Offline-Analyse auf Datenträger gespeichert werden sollen, wird in einem mehrstufigen Triggerprozeß bestimmt. Die während der Datenanalyse in den beiden letzten Stufen des Triggersystems notwendige Zwischenspeicherung der Detektordaten erfolgt in einem zweistufigen Speichersystem, bestehend aus der sogenannten First-Level-Pipe (LVL1-Pipe) und Second-Level-Pipe (LVL2-Pipe).

3.2 Das mehrstufige Triggersystem

Das HADES-Triggersystem umfaßt drei Triggerstufen, die in Echtzeit eine Analyse der Detektordaten und damit einhergehend eine Selektion physikalisch relevanter Ereignisse

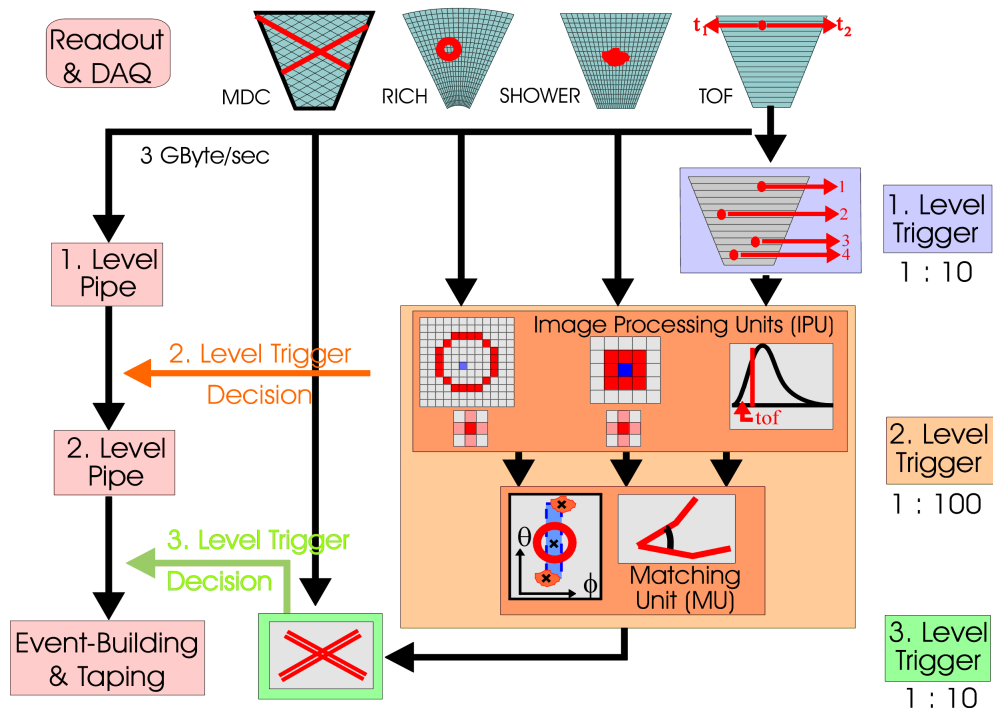


Abbildung 3.1: Das Trigger- und Auslesesystem im Überblick: Die Datenreduktion erfolgt in den drei Stufen (1st/2nd/3rd Level Trigger). Mit einer maximalen Datenreduktionsrate von 1:100 leistet dabei die zweite Stufe des Triggersystems, die aus den sogenannten Image Processing Units gebildet wird, den Hauptanteil. Das Auslesesystem enthält einen zweistufigen Datenspeicher, der die Detektordaten während der Datenanalyse im LVL2- bzw. LVL3-Trigger speichert.

durchführen. Hierdurch wird eine sukzessive Reduktion der Daten erreicht, die eine Anwendung immer komplexerer Triggeralgorithmen in den einzelnen Triggerstufen ermöglicht.

Die nachfolgenden Unterkapitel beschreiben die Funktion bzw. Aufgabenstellung der einzelnen Triggerstufen in Experimenten, deren Zielsetzung die Untersuchung von Dielektronen in zentralen Schwerionenkollisionen ist. Die in diesem Zusammenhang verwendeten Zahlen bzw. Parameter beziehen sich auf das Kollisionssystem Au+Au bei 1 AGeV, das mit ca. 200 geladenen Teilchen die maximale Forderung an das System definiert. Eine Anpassung des Triggerkonzepts bzw. Triggersystems an andere experimentelle Fragestellungen ist auf Grund des modularen Designs des Triggers sowie der großen Flexibilität der zweiten Triggerstufe bedingt durch die sehr intensive Verwendung programmierbarer Hardware jederzeit möglich.

3.2.1 Die erste Triggerstufe

Die erste Stufe des Triggers (1st Level Trigger bzw. LVL1-Trigger) dient der Selektion zentraler Reaktionen durch eine Bestimmung der Multiplizität der geladenen Teilchen. Physikalische Grundlage für diesen Reaktionstrigger ist, daß mit abnehmendem Stoßparameter b die Anzahl der an einer Kollision teilnehmenden Nukleonen A_{part} zunimmt, d.h. die Anzahl der in den ganzen Raumwinkelbereich emittierten Teilchen steigt. Eine für das symmetrische System Au+Au geeignete Parametrisierung für die an der Reaktion teilnehmenden Nukleonen ist [Hae95]:

$$A_{part} = N_0 e^{-\left(\frac{b}{b_0}\right)^2}$$

wobei: $N_0 = 2 \cdot A_{Au}$; $b_0 = 7.75 \text{ fm}$

Die Anzahl der entstehenden geladenen Protonen sowie Pionen steht in einem direkten Zusammenhang mit A_{part} [Hae95]:

- Protonen : $\approx 0.42 A_{part}$
- negative Pionen : $\approx 0.036 A_{part}$
- positive Pionen : $\approx 0.019 A_{part}$

Die eigentliche Bestimmung der Multiplizität der geladenen Teilchen erfolgt mit Hilfe der Szintillatoren der Flugzeitwand. Hierfür werden die analogen Ausgangssignale der Flugzeitwand an die Multiplicity Trigger Unit (MTU) übertragen, die die einzelnen Signale diskriminiert und zur Bildung analoger Signalsummen (Sektorsummen, Gesamtsumme) benutzt [Koe99]. Ein abschließender Vergleich mit entsprechenden Schwellen erzeugt den LVL1-Trigger.

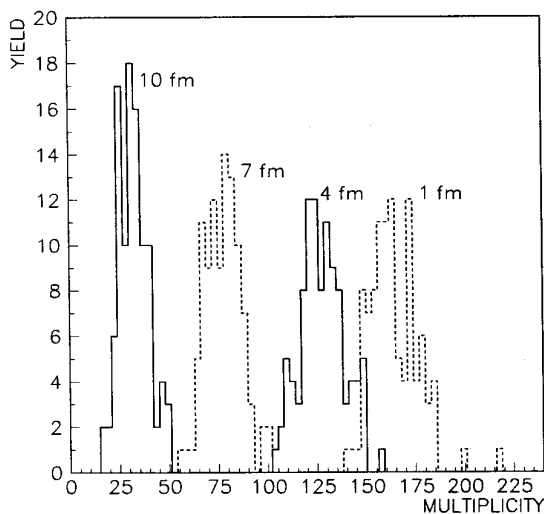


Abbildung 3.2: Simulierte Verteilung der Multiplizität geladener Teilchen in den Szintillatoren der Flugzeitwand pro Au+Au-Kollision (1 AGeV) für verschiedene Stoßparameter [Gar95].

Die erreichbare Multiplizitätsauflösung ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Bei einer Beschränkung auf zentrale Kollisionen mit einem maximalen Stoßparameter von $b \leq 4\text{fm}$ ergibt sich eine Reduktion der Ereignisrate um einen Faktor 10, was zu 10^5 Ereignissen/s am Ausgang dieser Triggerstufe führt.

3.2.2 Die zweite Triggerstufe

Die zweite Stufe des Triggers (2nd Level Trigger bzw. LVL2-Trigger) dient der Bestimmung von Ereignissen, die Dileptonenkandidaten (e^+e^- -Paare) enthalten. In einem ersten Schritt werden hierfür die Daten mit positiver LVL1-Entscheidung aus dem Cherenkov-Detektor, der Flugzeitwand und dem Schauerdetektor unabhängig voneinander in speziellen Triggerprozessoren (IPUs)¹ auf Leptonensignaturen hin analysiert.

Im Falle der RICH- und SHOWER-IPU bedeutet dies die Analyse der digitalisierten Ladungsinformationen der segmentierten Kathodenflächen der Vieldrahtkammern nach Ringmustern ([Leh99], [Leh00]) bzw. Ladungsmustern elektromagnetischer Schauer. Die Aufgabenstellung der TOF-IPU ist die Selektion von potentiellen Leptonenkandidaten mit Hilfe der Teilchenflugzeit unter Verwendung der ADC²- und TDC³-Werte der einzelnen Szintillatorstreifen. Die ADC-Werte werden dabei für eine Echtzeit-Walkkorrektur⁴ der TDC-Stopsignale verwendet. Die Ergebnisse der drei Image Processing Units, d.h. die Positionsinformationen möglicher Leptonenkandidaten, werden für den nächsten Schritt der Datenverarbeitung an die Matching Unit (MU) weitergeleitet. Hier findet eine Überprüfung der Korrelation der Ringpositionen im RICH mit den Positionen der Leptonensignaturen in der Flugzeitwand und im Schauerdetektor statt. Ein Leptonenkandidat liegt vor, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- 1.) In einer Ringumgebung mit einem Öffnungswinkel von $\alpha < 30^\circ$ darf sich im RICH kein weiterer Ring befinden, da solch ein Ringpaar mit sehr großer Wahrscheinlichkeit aus einem Untergrundprozeß (π_0 -Dalitz-Zerfalls oder externe Konversion) stammt.
- 2.) Eine Korrelation der Ringposition mit Positionsinformationen der Flugzeitwand bzw. des Schauerdetektors unter Berücksichtigung der Ablenkung der Leptonen im Magnetfeld muß möglich sein. Die durch

1. Image Processing Units: Dieser historisch gewachsene Sammelbegriff für die verschiedenen Triggerprozessoren ist irreführend, da die Funktionalität der IPUs sich auf reine Mustererkennung (RICH, SHOWER) bzw. auf die Berechnungen von Teilchenflugzeit (TOF) beschränkt.

2. Analog-to-digital Converter

3. Time-to-digital Converter

4. Kompensation des Einflusses der Eingangsamplitude und Anstiegszeit auf das Diskriminator-Zeit-Signal.

das Magnetfeld bedingte Ablenkung erfolgt dabei ausschließlich in polarer Richtung. Die zulässige Polarwinkeldifferenz $\Delta\vartheta$ wird durch die geforderte Impulsbedingung definiert. In azimuthaler Richtung wird die zulässige Ablenkung $\Delta\phi$ durch das Auflösungsvermögen der Detektoren bestimmt.

Verbleiben nach diesen beiden Analyseschritten noch mindestens zwei Leptonenkandidaten, so erfolgt eine Kombination von Leptonenkandidaten mit entgegengesetzter polarer Krümmung zur Bestimmung der invarianten Masse M_{inv} . Ein positiver LVL2-Trigger wird erzeugt, wenn die ermittelte invariante Masse M_{inv} in einem festzulegenden Massefenster liegt. Die in dieser Stufe des Triggers maximal erreichbare Reduktion der Ereignisrate beträgt 1:100 [Sch95], was zu 10^3 Ereignisse/s am Ausgang dieser Stufe führt.

Unter Berücksichtigung der LVL1-Ereignisrate ergibt sich somit eine maximale Entscheidungszeit von nur $10\ \mu\text{s}$ für die dargestellte Aufgabenstellung dieser zweiten Stufe des Triggersystems. Darüber hinaus soll die Latenzzeit t_{Lat} der zweiten Triggerstufe einen maximalen Wert von $200\ \mu\text{s}$ nicht überschreiten, so daß eine Beschränkung der Speichertiefe der einzelnen Auslesespeicher auf 20 Ereignisse möglich ist. Ereignisse bzw. Ereignissequenzen, die ein Überschreiten der maximalen Latenzzeit hervorrufen, führen jedoch nicht zu einem Datenverlust im Auslesesystem, sondern bewirken das Anhalten der Datenaufnahmen und damit einhergehend eine Erhöhung der Totzeit.

Die technische Realisierung dieser komplexen Aufgabenstellung für die ca. 60000 zu analysierenden Detektorkanäle (vgl. Tabelle 3.2) erforderte die Entwicklung spezieller Prozessoren, die neben einer massiven parallelen Verarbeitung der Rohdaten auch die Implementierung von Algorithmen mit Pipeline-Architektur erlauben. Die von der gesamten Triggerstufe bereitgestellte Rechenleistung kann mit ca. $3,0 \cdot 10^{12}$ prozessoräquivalenten Rechenoperationen pro Sekunde abgeschätzt werden. Die zu verarbeitende Datenrate beträgt ca. 3 GByte/s.

3.2.3 Die dritte Triggerstufe

Die dritte Stufe des Triggersystems (3rd Level Trigger bzw. LVL3-Trigger) kombiniert die Ergebnisse der zweiten Triggerstufe mit den Informationen der Driftkammern zur Identifizierung von Leptonenkandidaten, die durch die Kombination von Signalen verschiedener Teilchen erzeugt wurden. Die Positionen im RICH und TOF bzw. SHOWER definieren dabei Suchbereiche auf dem inneren bzw. äußeren Driftkammerpaar, die auf ihre Korrelation mit den Leptonenkandidaten überprüft werden.

Ein Beispiel für ein falsch getriggertes Lepton, das durch die Verwendung der Driftkammerinformation verworfen werden kann, zeigt Abbildung 3.3. Ein Leptonenpaar aus einem Untergrundprozeß erzeugt im Cherenkov-Detektor einen Ring.

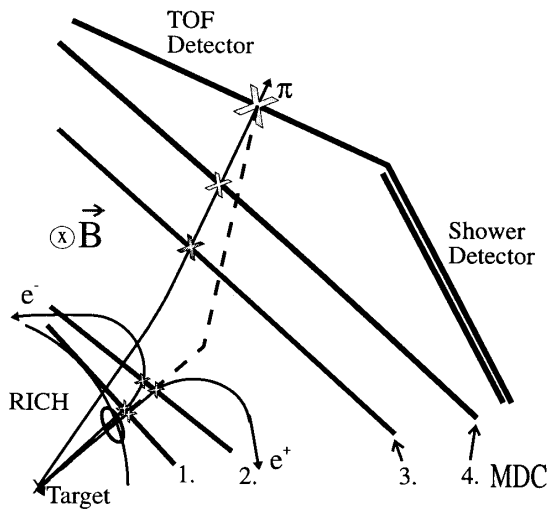


Abbildung 3.3: Beispiel für ein falsch im LVL2-Trigger identifiziertes Lepton. Ein Elektron/Positron Paar aus einem Untergrundprozeß erzeugt einen Ring im RICH, der mit einem hochenergetischen Pion kombiniert wird. Die gestrichelte Linie zeigt die vom LVL3-Trigger geforderte Teilchenbahn in den MDC-Ebenen 1 bis 4.

Bedingt durch die starke Ablenkung im Magnetfeld erreichen die niederenergetischen Leptonen die äußeren Detektorkomponenten nicht. Ein in der Reaktion erzeugtes hochenergetisches Pion, das die Flugzeitwand trifft, fällt innerhalb des Flugzeitfensters für die Leptonen und erfüllt zusammen mit dem Ring im RICH die Triggerbedingung für Leptonen in der zweiten Triggerstufe des Triggersystems. Eine einfache Spurrekonstruktion unter Verwendung der angesprochenen Drähte in den Driftkammern zeigt jedoch, daß dieses Ereignis nicht auf ein einziges Teilchen zurückzuführen ist. Im Gegensatz zur ersten und zweiten Stufe des Triggersystems erlauben die moderaten technischen Parameter bzgl. Datenvolumen und -verarbeitungszeit der dritten Stufe eine Implementierung des Triggeralgorithmus in Standardprozessoren (z.B. Pentium-III).

Mit diesem Verfahren kann eine weitere Reduktion der Ereignisrate um einen Faktor 10 erreicht werden. Die Ereignisrate am Ausgang der letzten Triggerstufe beträgt somit 10^2 Ereignisse/s.

3.2.4 Die Triggereffizienz

Eine durch Simulationen der Hardwarealgorithmen erhaltene Übersicht der Elektron/Positron-Nachweiseffizienz in den einzelnen Stufen des Triggersystems zeigt Tabelle 3.1. Neben der Nachweiseffizienz ist die Anzahl der falsch identifizierten Elektronen/Positronen für das Triggersystem von entscheidender Bedeutung, weil ein zu hoher Wert die Selektionsfähigkeit für Dileptonenereignisse mindert. Wesentliche Ursachen für Fehlidentifikationen sind Ereignisklassen, die durch die primitiven Hardwarealgorithmen nicht separiert werden können sowie apparative Limitierungen in den einzelnen Teildetektoren:

RICH: Die wesentlichen Quellen für Untergrundsignale im Photonendetektor sind Szintillationslicht im Radiator, Cherenkov-Licht durch Hadronen im CaF_2 -Fenster sowie Cherenkov-Licht durch Delta-Elektronen, die im Radiator entstehen. Daneben existieren Untergrundquellen, die echte Cherenkov-Ringe im Detektor

Detektor- komponente	Polarwinkel- bereich	Effizienz		Falsch identifizierte Kandidaten/Ereignis
		0,1-0,3 GeV/c ⁻	0,5-0,8 GeV/c ⁻	
RICH	18°-85°	80%	90%	0,5
TOF	45°-85°	35%	85%	6
SHOWER	18°-45°	35%	85%	12

Tabelle 3.1: Übersicht der Elektron/Positron-Nachweiseffizienz und Anzahl der falsch identifizierten Kandidaten pro zentraler Au+Au-Kollision (1 AGeV) in den einzelnen Detektorsystemen [Sch95].

erzeugen. Hierbei handelt es sich um Elektronen aus dem π^0 -Dalitz-Zerfall und Elektronen aus externer Paarkonversion im Target und Radiator.

TOF: Die begrenzte Zeitauflösung der Flugzeitwand verhindert eine effektive Diskriminierung von Hadronen und Elektronen/Positronen im polaren Winkelbereich $\vartheta < 45^\circ$ (siehe auch Abbildung 2.5). Vor allem schnelle Pionen können hier in das Flugzeitfenster der Elektronen fallen.

SHOWER: Eine wesentliche Quelle für Fehlidentifikationen im Schauerdetektor sind elektronenähnliche Signaturen, die durch Doppeltreffer hervorgerufen werden (z. B. ein Photon und ein Proton). Darüber hinaus ist ein signifikanter Abfall der Elektron/Positron-Nachweiseffizienz für Impulse unterhalb von 0.4 GeV/c zu beobachten, der durch eine starke Abnahme der Schauerwahrscheinlichkeit in diesem Impulsbereich verursacht ist.

Die geforderte Korrelation der Elektron/Positron-Kandidaten aus dem RICH mit den Kandidaten aus TOF und SHOWER in der Matching Unit führt zu einer Reduktion der Gesamtfehlerrate und ermöglicht die in der zweiten Triggerstufe angestrebte Reduktion der Ereignisrate um einen Faktor 100.

3.3 Die Struktur des Auslesesystems

Die eigentliche Datennahme im HADES Spektrometer (siehe Abbildung 3.1) erfolgt durch ein zweistufiges Auslesesystem, das aus der LVL1-Pipe und der LVL2-Pipe zur Zwischenspeicherung der Rohdaten besteht. Dabei handelt es sich um eine Vielzahl von lokalen Datenspeichern in den einzelnen Detektorsystemen, die über das ganze Spektrometer verteilt sind, dezentral verwaltet werden. Im Gegensatz zur LVL1-Pipe, die keiner Spezifikation bzgl. der technischen Umsetzung unterliegt, muß die Second-Level-Pipe in einem via VMEbus-Zugriff adressierbaren Speicher implementiert sein.

Nach Erzeugung eines positiven LVL1-Triggers durch die erste Stufe des Triggersystems werden die Daten der einzelnen Detektorsysteme in die lokalen

Detektorkomponente	Anzahl Kanäle	Datenrate nach		
		LVL1-Trigger [MByte/s]	LVL2-Trigger [MByte/s]	LVL3-Trigger [MByte/s]
RICH	39360	1000	12	1,2
MDC	26000	1000	12	1,2
TOF	4216	160	2	0,2
Schauer	18432	2095	15	1,5
Gesamt	88008	4255	41	4,1

Tabelle 3.2: Zu erwartende Datenraten in den einzelnen Triggerstufen für Au+Au-Kollisionen (1 AGeV). Die angegebenen Datenraten bzw. Kanalzahlen beziehen sich auf das gesamte Spektrometer.

Datenspeicher der LVL1-Pipe übertragen. Dort verbleiben die Detektordaten, bis der entsprechende LVL2-Trigger von der zweiten Stufe des Triggersystems bereitgestellt wird. Im Falle einer positiven LVL2-Trigger-Entscheidung werden die Daten aus der LVL1-Pipe in die LVL2-Pipe übertragen, wohingegen eine negative Entscheidung das Entfernen der Daten aus dem Auslesesystem bewirkt. Identisch zur Datenverarbeitung in der LVL1-Pipe erfolgt die Datenverarbeitung in der LVL2-Pipe, in Abhängigkeit von der LVL3-Trigger-Entscheidung. Die Datenübertragung der positiv getriggerten Ereignisse zum zentralen Event-Builder erfolgt jedoch via ATM-Netzwerk durch den lokalen VME-Controller [Mue99]. Eine Aufstellung der nach jeder Triggerstufe in den einzelnen Detektorkomponenten zu erwartenden Datenraten zeigt Tabelle 3.2.

3.4 Das Triggerverteilungssystem

Die dezentrale Struktur des Auslesesystems erfordert ein Triggerverteilungskonzept, welches die effiziente Verteilung der eigentlichen Triggerentscheidungen (LVL1- und LVL2-Trigger) und damit verknüpfter Triggerdaten innerhalb des gesamten HADES-Spektrometers erlaubt. Diese globalen Signale bzw. Informationen müssen dann in detektorspezifische Steuersignale für die lokale Ausleseelektronik bzw. in die eigentlichen Detektordaten eingesetzt werden.

Bei den Triggerdaten handelt es sich um einen den Trigger klassifizierenden Code (Trigger-Code) und eine Nummer (Trigger-Tag), die die Synchronisation der Datenauslese ermöglicht.

Mit Hilfe des vier Bit breiten Trigger-Codes unterscheidet das System sechs verschiedene LVL1-Triggertypen¹ (siehe Tabelle 3.3) die neben der Funktionsweise der Ausleseelektronik auch den eigentlichen Datenfluß im Auslesesystem steuern. Ein Beispiel hierfür ist der sogenannte Kalibrations-Trigger (Trigger Code = x100), der Daten für die Kalibration des Spektrometers erzeugt. Gleichzeitig aber bewirkt dieser,

1. Das höchstwertige Bit des Trigger-Codes wird im Falle des LVL1-Triggers nicht verwendet.

Trigger Code	Bezeichnung	Funktion bzw. Bedeutung
x001	Normal Event	Normaler LVL1-Trigger zur Detektorauslese
x010	Begin Run	Trigger zum Starten des Trigger- und Auslesesystems
x011	End Run	Trigger zum Stoppen des Trigger- und Auslesesystems
x100	Calibration	Trigger zur Erzeugung von Kalibrationsdaten
x101	Spill On	Trigger zu Beginn eines Beschleunigerspills
x110	Spill Off	Trigger zum Ende eines Beschleunigerspills

Tabelle 3.3: *Triggertypen, die mit Hilfe des vier Bit breiten Trigger-Codes unterschieden werden. Das höchstwertige Bit bleibt im Falle des LVL1-Triggers unberücksichtigt ($x = \text{don't care}$), wird jedoch im Falle des LVL2-Triggers zur Unterscheidung zwischen positiven und negativen Triggerentscheidungen verwendet. Nicht aufgelistete Bitmuster entsprechen ungültigen Trigger-Codes.*

daß alle Datenpakete, die den Trigger-Code besitzen, das Auslesesystem unbeeinflußt bis zum zentralen Event-Builder durchlaufen.

Beim Trigger-Tag handelt es sich um eine acht Bit breite fortlaufende Nummer, die die einzelnen Datenpakete eines LVL1-Triggers identifiziert und die ereignisweise Synchronisation des vollständig asynchron arbeitenden Auslese- und Triggersystems ermöglicht.

Die mit der Übertragung eines LVL2-Triggers verbundenen Triggerdaten bestehen wie beim LVL1-Trigger aus dem Trigger-Tag sowie dem Trigger-Code für das entsprechende Ereignis, wobei das höchstwertige Bit im Trigger-Code zur Charakterisierung einer positiven bzw. negativen LVL2-Triggerentscheidung verwendet wird.

Zusätzlich muß das Triggerverteilungssystem gewährleisten, daß die einzelnen Subsysteme des Auslese- und Triggersystems Statusinformationen (z.B. BUSY-, ERROR-Bedingungen) an die zentrale Triggereinheit übertragen können. Beispiele hierfür sind das Auftreten voller Datenspeicher (BUSY-Bedingung) oder aber Trigger-Tag-Fehler in einen Subevent-Builder (ERROR-Bedingung).

Realisiert wird dieses Konzept durch ein hierarchisches Triggerverteilungssystem bestehend aus einem zentralen Triggermodul (**Central Trigger Unit**) zur Erzeugung und Verteilung der Trigger und Triggerdaten und einer Vielzahl von lokalen Triggermodulen (**Detector Trigger Units**), die die Schnittstelle zwischen der CTU und der lokalen Ausleseelektronik bereitstellen, d.h. für die detektorspezifische Umsetzung der globalen Triggerinformationen sorgen. Insgesamt besteht das Triggerverteilungssystem aus 12 DTUs, wovon jeweils eine DTU für die MDC- und SHOWER-, drei für die RICH- und sechs für die TOF-Ausleseelektronik notwendig sind. Eine weitere DTU ist der Matching Unit zugeordnet. Die Kommunikation zwischen der CTU und den DTUs wird

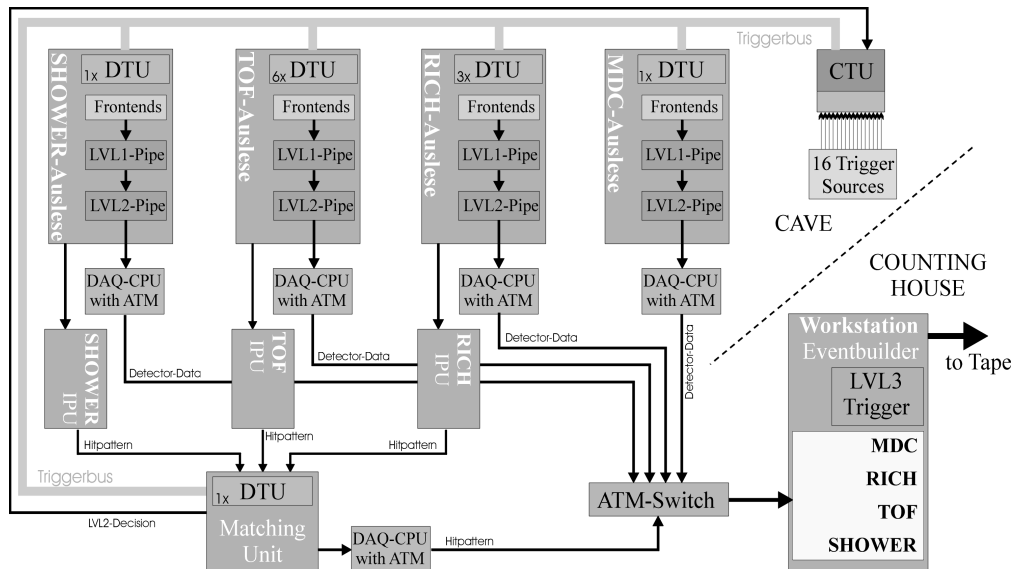


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Triggerverteilungs- und Auslesesystems für das HADES-Spektrometer. Das hierarchische Triggerverteilungssystem besteht aus einem zentralen Triggermodul (CTU) sowie einer Vielzahl von lokalen Triggermodulen (DTUs), die die Schnittstelle zwischen der CTU und der lokalen Ausleseelektronik bereitstellen.

durch den Triggerbus gewährleistet. Abbildung 3.4 zeigt eine schematische Darstellung des Triggerverteilungs- und Auslesesystems.

3.4.1 Die Module des Triggerverteilungssystems

Bei den Modulen des Triggerverteilungssystems handelt es sich um ein universell einsetzbares Triggermodul (TM) im 6U VME-Standard¹ (Versa Module Eurocard, [Pet93]), das durch Anpassung der auf dem Modul vorhandenen programmierbaren Hardware sowohl die Funktion der Central Trigger Unit als auch die Funktionen der diversen Detector Trigger Units bereitstellen kann.

Die in den einzelnen Detektorsystemen notwendige elektrische Anpassung der DTUs an die lokalen Auslesesysteme (z.B. Signalpegelkonvertierung) erfolgt durch Aufsteckplatten, die über eine 32 Bit breite programmierbare Schnittstelle (TTL-Standard²) des TMs angesteuert werden. Darüber hinaus stellt das TM verschiedene Basisfunktionen zur Verfügung, die sowohl für das zentrale Triggermodul als auch für die lokalen Triggermodule erforderlich sind. Diese umfassen neben einem A32/D16 VMEbus Interface zur Konfiguration der programmierbaren Hardware bzw. zur Ablaufsteuerung und -kontrolle des Moduls durch das HADES-Slow-Control auch ein programmierbares Interface zum Triggerbus.

1. Einschubmodule mit einem Platinenmaß von 233,35 mm x 160,0 mm (auch als DoppelEuropa-Karten bezeichnet)

2. Transistor-Transistor-Logic: logisch „0“ von 0 - 0,8 V, logisch „1“ von 2,0 - 5 V

T	Trigger Signal (Trigger und qualifizierendes Signal für den Trigger-Code)
TS	Trigger Strobe (qualifizierendes Signal für das Trigger-Tag)
TD[3..0]	Trigger Daten (Datenbus zur Übertragung von Trigger-Tag und Trigger-Codes)
TB	Trigger Busy (Zeigt BUSY-Bedingung einer DTU an)
TE	Trigger Error (Zeigt ERROR-Bedingung einer DTU an)

Tabelle 3.4: Signale, die auf den beiden Triggerbus-Systemen zwischen der CTU und den lokalen DTUs ausgetauscht werden. Bei den Signalen handelt es sich um differenzielle Signale gemäß dem RS485-Standard.

3.4.2 Der Triggerbus

Der HADES-Triggerbus besteht aus zwei unabhängigen Bussystemen, die die Verbreitung von Entscheidungen der ersten bzw. zweiten Stufe des Triggersystems ermöglichen und als First Level Trigger Bus und Second Level Trigger Bus bezeichnet werden. Jedes der Bussysteme umfaßt acht differenzielle Signale im RS485-Standard¹, die in Tabelle 3.4 aufgelistet sind. Die Übertragung der Signale erfolgt über verdrehte Doppelleitungen (Twisted-pair-Kabel, 28 AWG²) mit einer maximalen Länge von 75 Metern und einer Datenübertragungsrate von 10 Mbit/s pro Doppelleitung. Das Busprotokoll zur Übertragung der Triggerentscheidungen ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

Der vier Bit breite Datenbus TD[3..0] wird zur sequentiellen Übertragung von Trigger-Code und Trigger-Tag benutzt. Die steigende Flanke des Trigger-Signals (T) zeigt einen Trigger sowie die Gültigkeit des dazugehörigen Trigger-Codes an. Das dem Trigger-Code folgende acht Bit breite Trigger-Tag wird in zwei aufeinanderfolgenden

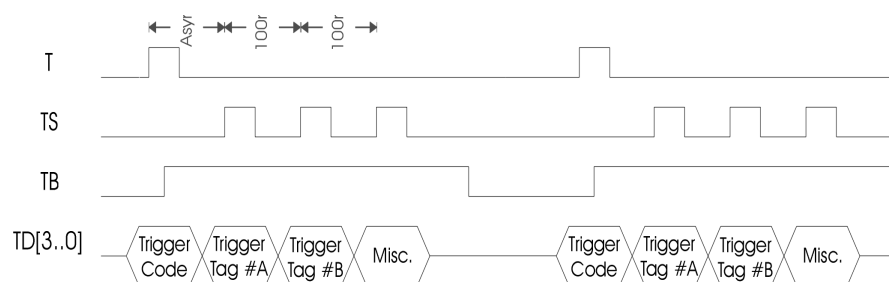


Abbildung 3.5: Triggerbuszyklus für die Verteilung der Trigger der ersten und zweiten Stufe (Trigger Tag#A = least significant bits, Trigger Tag#B = most significant bits).

1. Differenzieller Signalstandard (Recommended Standard 485)
2. American Wire Gauge

Datenworten übertragen und durch die steigende Flanke des Trigger-Strobe-Signals (TS) qualifiziert.

Während der Verarbeitung einer Trigger-Entscheidung in der lokalen Trigger- und Ausleseelektronik setzt die DTU das Trigger-Busy-Signal (TB-Signal) und blockiert damit den Start weiterer Triggerbuszyklen. Darüber hinaus erfolgt das Setzen des TB-Signals, wenn eine Speicherung weiterer Ereignisse im Auslesesystem nicht mehr erfolgen kann.

4.1 Aufgabenstellung

Die zentrale Aufgabenstellung der Schauerdetektor Image Processing Unit ist die Erkennung von Elektron-/Positronsignaturen auf den segmentierten Kathodenflächen der drei Drahtkammern des Detektors.

Die von Elektronen und Positronen in den Bleikonvertern ausgelösten elektromagnetischen Schauer bewirken eine Erhöhung der Anzahl der geladenen Teilchen, die die einzelnen Drahtkammern durchdringen. In den im SQS-Modus betriebenen Drahtkammern entsteht hierdurch ein Zuwachs der auf den Kathodenflächen induzierten Ladung in einer durch die laterale Ausbreitung der elektromagnetischen Schauer bestimmten Region (siehe auch Kapitel 2.5.1). Die Erkennung der entsprechenden Signaturen durch die Image Processing Unit erfordert somit einen Vergleich der Ladungsinformation der Preshower-Drahtkammer mit den beiden Postshower-Drahtkammern.

4.2 Das Hardware-Verfahren zur Schauererkennung

Die eigentliche Schauererkennung in der Schauerdetektor Image Processing Unit erfolgt auf Basis der digitalisierten Pulshöheninformation aus den drei Drahtkammern des Detektors. Hierfür werden nach einem LVL1-Trigger die Ladungssignale der Kathodenfelder von der Front-End-Elektronik fixiert und mit Hilfe eines Analog/Digital-Wandlers in 8 Bit breite Ladungswerte konvertiert (siehe auch Kapitel 5.3.1). Die einzelnen Kathodenflächen werden dabei von der Front-End-Elektronik als symmetrische Matrix bestehend aus 32 Zeilen und 32 Spalten behandelt¹, so daß pro Detektorsegment 3072 digitalisierte Ladungswerte erzeugt und zur Analyse an die Image Processing Unit übertragen werden.

Unter Berücksichtigung der LVL1-Triggerrate ergibt sich somit eine untere Abschätzung der Analyse- bzw. Datenverarbeitungsleistung der IPU von ca. $2.0 \cdot 10^9$ Ladungswerten pro Sekunde bzw. 2.0 GByte/s. Die technische Realisierung dieser Aufgabenstellung erfordert neben einer massiven Parallelisierung der Analyse die Verwendung von

1. Auch für Kammerbereiche mit weniger als 32 Kathodenfeldern pro Zeile sind 32 Verarbeitungskanäle pro Zeile in der Front-End-Elektronik vorhanden. Diese virtuellen Front-End-Kanäle liegen auf festem Potential, erzeugen also von Null verschiedene Ladungswerte.

Pipeline-Strukturen im Analyseverfahren, die eine Verarbeitung hoher Datenraten erst ermöglichen.

Entsprechende Strukturen der Datenanalyse lassen sich sehr gut in feldprogrammierbaren Gate Arrays (FPGAs¹) abbilden. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß FPGAs auf die Realisierung von Logikfunktionen optimiert sind, was die Verwendung von komplexen arithmetischen Operationen² im Analyseverfahren nahezu ausschließt, da diese nur in speziell entwickelten Prozessoren sinnvoll zu realisieren sind. Für das Analyseverfahren bedeutet dies die Beschränkung auf Komparator- und Schiebeoperationen sowie einfache arithmetische Operationen wie Additionen und Subtraktionen mit ganzzahligen Werten geringer Bitbreite. Die für die technische Realisierung bzw. Implementierung des Analyseverfahrens relevanten Eigenschaften der FPGAs sind in Kapitel 4.2.3 zusammenfassend dargestellt.

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen wurde ein zweistufiges Analyseverfahren zur Schauererkennung entwickelt, in dessen erster Stufe die Kalibration der Pulshöheninformation erfolgt. In der zweiten Stufe erfolgt dann die Analyse der kalibrierten Ladungswerte, d.h. die Untersuchung und der Vergleich der Ladungsmuster in den drei Detektorebenen.

4.2.1 Datenkalibration

Um die unterschiedlichen Verstärkungsfaktoren zu berücksichtigen, erfolgt zunächst eine Kalibration der einzelnen Ladungswerte (siehe Kapitel 5.4.2.2). Weiterhin wird eine Schwelle eingeführt, um das Rauschen der einzelnen Kanäle zu unterdrücken. Die hierfür notwendigen komplexen mathematischen Operationen können aber durch den Einsatz von Look-Up-Tables (LUTs) während der eigentlichen Analyse durch die Hardware vermieden werden, so daß dieser Verfahrensschritt auch in einem FPGA-basierten Konzept technisch realisierbar ist.

In einem Bildverarbeitungsverfahren würde man diesen Verarbeitungsschritt als Kontrastveränderung bzw. Kontrasterhöhung bezeichnen.

4.2.2 Datenanalyse

Der Hardware-Algorithmus evaluiert jedes Kathodenfeld $Pad^{Pre}(m, n)$ im Preshower-Detektor als potentielles Zentrum eines elektromagnetischen Schauers. Hierbei bezeichnet der Index m die aktuelle Zeile und der Index n die aktuelle Spalte. Vom aktuellen Kathodenfeld ausgehend erfolgt eine Auswertung der lokalen Umgebung in

1. Field Programmable Gate Arrays

2. Dies umfaßt bereits die im alltäglichen Leben als trivial empfundenen arithmetischen Operationen der Multiplikation und Division.

allen drei Ebenen des Detektors. Die Umgebung wird dabei durch die laterale Ausbreitung des elektromagnetischen Schauers definiert und umfaßt eine Matrix von 3 x 3 Feldern mit dem aktuellen Kathodenfeld im Zentrum der Matrix (siehe Kapitel 2.5.1). Ein elektromagnetischer Schauer liegt vor, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1. Das aktuelle Kathodenfeld muß die Bedingung eines lokalen Maximums im Preshower-Detektor erfüllen. Um in jedem Fall nur ein lokales Maximum zu erhalten, ist die Bedingung asymmetrisch definiert.

$$Pad^{Pre}(m, n) > Pad^{Pre}(i, j)$$

mit

$$(i, j) = (m, n - 1); (m + 1, n)$$

$$Pad^{Pre}(m, n) \geq Pad^{Pre}(i, j)$$

mit

$$(i, j) = (m - 1, n); (m, n + 1)$$

2. In allen drei Lagen des Detektors wird eine Ladungssumme über den Bereich der Matrix gebildet. Die Ladungssummen Q^{Post-I} und $Q^{Post-II}$ aus den beiden Postshower-Detektoren werden mit der entsprechenden Ladungssumme Q^{Pre} aus dem Preshower-Detektor zuzüglich eines Schwellenwerts $Q^{Threshold}$ verglichen.

$$Q^{Post-I, Post-II}(m, n) \geq Q^{Pre}(m, n) + Q^{Threshold}$$

mit

$$Q^{Pre, Post-I, Post-II}(m, n) = \sum_{i=m-1}^{m+1} \sum_{j=n-1}^{n+1} Pad^{Pre, Post-I, Post-II}(i, j)$$

4.2.2.1 Leistungsfähigkeit des Algorithmus

Die Leistungsfähigkeit des Algorithmus wurde auf der Basis von zwei Ereignisgeneratoren getestet. Der erste Generator (FLAT) erzeugt Leptonen mit einer flachen invarianten Masseverteilung im Bereich $0 \text{ MeV}/c^2 < m_{inv} < 500 \text{ MeV}/c^2$, wohingegen der zweite Generator (OMEGA) Leptonen mit einer invarianten Masseverteilung entsprechend der Ruhemasse des ω -Mesons erzeugt. Unter der

Annahme eines thermischen Gleichgewichts erfolgt für beide Ereignisgeneratoren die Impulsverteilung gemäß einer Maxwell-Boltzmann-Verteilung mit einem Temperaturparameter von $T = 65 \text{ MeV}$. Anzahl und Impulse der Hadronen in der Simulation stammen aus BUU-Rechnungen für die Reaktion Au+Au-Kollision bei 1 AGeV [Wol93]. Die eigentliche Simulation erfolgte mit dem Simulationspaket GEANT unter Berücksichtigung der Spektrometerakzeptanz.

Wesentliche Kriterien für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit sind die Nachweiseffizienz ϵ und die Fehlidentifikationsrate N_F . Die beiden Qualitätsparameter sind wie folgt definiert:

$$\epsilon = \frac{N_{Schauer+}}{N_{Lepton}} \cdot 100 \quad [Prozent]$$

$N_{Schauer+}$:Anzahl der detektierten elektromagnetischen Schauer, die simulierten Leptonen zugewiesen werden konnten.

N_{Lepton} :Anzahl der simulierten Leptonen, die in der Detektorakzeptanz liegen

$$N_F = \frac{N_{Schauer-}}{N_{Ereignis}}$$

$N_{Schauer-}$:Anzahl der falsch identifizierten Leptonen.

$N_{Ereignis}$:Anzahl der simulierten Ereignisse.

Die physikalische Zielsetzung des Spektrometers erfordert eine hohe Nachweiseffizienz jeder einzelnen Detektor- und Triggerkomponente, um möglichst wenige der seltenen Leptonenereignisse zu verwerfen. Generell ist eine Erhöhung der Nachweiseffizienz durch eine Abschwächung der Auswahlkriterien bei einem gleichzeitigen Anstieg der Fehlidentifikationsrate erreichbar. Eine Erhöhung der Fehlidentifikationsrate führt jedoch zu einer Reduzierung der Unterdrückungseffizienz des Triggersystems.

Abbildung 4.1 zeigt die für eine Kombination der beiden Generatoren mit dem Algorithmus erhaltenen Ergebnisse für die Nachweiseffizienz sowie die Fehlidentifikationsrate in Abhängigkeit vom Schwellenwert $Q^{Threshold}$. Bei einer angestrebten Nachweiseffizienz von 90 % ergibt sich eine mittlere Fehlidentifikationsrate von 12 Leptonenkandidaten pro Ereignis in den sechs Sektoren des Schauerdetektors.

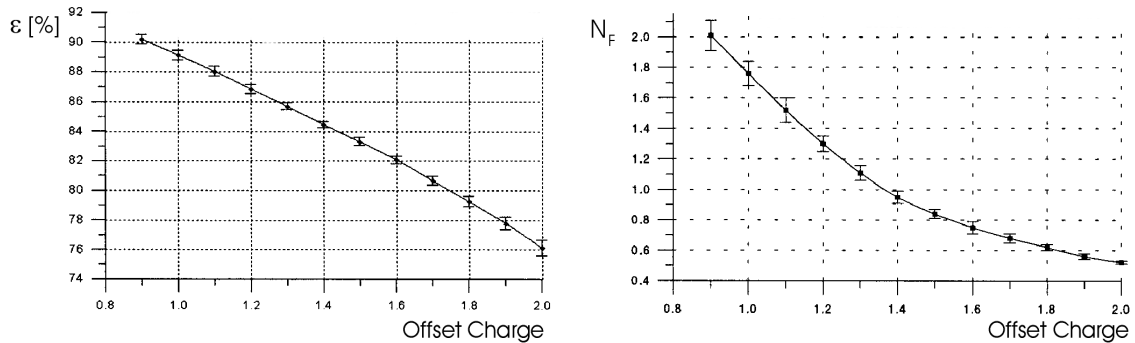


Abbildung 4.1: Links: Effizienz (ϵ) der Leptonenidentifizierung als Funktion des Schwellenwerts in Einheiten der Preshower-Detektorladung Q^{Pre} (Offset Charge). Rechts: Anzahl der falsch identifizierten Leptonen (N_F) pro Ereignis und Sektor ebenso als Funktion des Schwellenwerts.

Die Nachweiseffizienz als Funktion des Leptonenimpulses zeigt Abbildung 4.2. Der signifikante Abfall der Nachweiseffizienz für Impulse unterhalb von 0.4 GeV/c ist verursacht durch eine starke Abnahme der Schauerwahrscheinlichkeit in diesem Impulsbereich. Die voneinander abweichende Entwicklung der Nachweiseffizienz für Leptonen aus den beiden Ereignisgeneratoren ist hervorgerufen durch zwei Effekte:

- Die beiden Ereignisgeneratoren besitzen für einen vorgegebenen Impuls eine unterschiedliche Winkelverteilung.
- Die Nachweiswahrscheinlichkeit des Schauerdetektors hängt vom Winkel ab, den die Impulsvektoren der Leptonen mit der Detektoroberfläche bilden. Bei kleinen Leptonenimpulsen kann dieser Winkel durch die Ablenkung im Magnetfeld deutlich von 90° abweichen.

Eine Ausweitung der Integrationsfläche auf 5×5 Kathodenfelder in den beiden Postshower-Detektoren würde in diesem Impulsbereich eine Verbesserung der

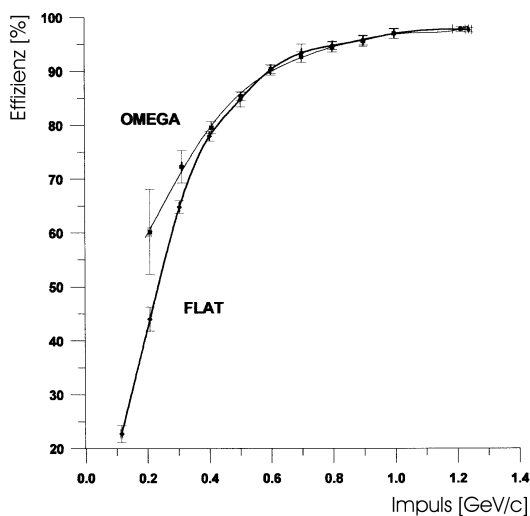


Abbildung 4.2: Leptonen-Nachweiseffizienz als Funktion des Leptonenimpulses für den Schwellenwert $Q^{Threshold} = Q^{Pre}$.

Nachweiseffizienz ermöglichen, ist jedoch mit einer massiven Verteuerung (Faktor 2-3) der Triggerelektronik verbunden und somit nicht realisierbar.

Das vorgestellte Analyseverfahren zur Schauererkennung ist auf Grund seiner geringen Komplexität und seiner einfachen arithmetischen Operationen sehr gut in Hardware zu parallelisieren. Darüber hinaus ist die Umsetzung des Analyseverfahrens in eine Pipeline-Architektur möglich, so daß eine hohe Datenverarbeitungsrate gewährleistet ist. Entsprechende Strukturen zur Realisierung von parallelen gepipelineten Analyseverfahren in Hardware besitzen feldprogrammierbare Gate Arrays. Zur Verdeutlichung der technischen Randbedingungen bei der Realisierung des Analyseverfahrens werden im nachfolgenden Kapitel die relevanten Strukturen der verwendeten FPGAs kurz skizziert.

4.2.3 Technische Randbedingungen bei der Implementierung des Algorithmus

Allen FPGAs gemein ist eine Matrix aus konfigurierbaren Logikblöcken, die neben programmierbarer kombinatorischer Logik ein Speicherelement in Form eines bzw. mehrerer Register bereitstellen. Die Verschaltung der einzelnen Logikblöcke ist variabel und erfolgt in Abhängigkeit von der implementierten Funktionalität. Hierfür existieren verschiedene Ebenen von horizontalen bzw. vertikalen Metallverbindungen, die über programmierbare Durchkontaktierungen, bestehend aus einem Transistor, mit den Logikblöcken verschaltet werden können. Zusätzlich sind spezielle Netzwerke zur globalen Taktverteilung vorhanden, die die Implementierung synchroner Logikdesigns mit minimalem Taktversatz ermöglichen.

Für die Echtzeit-Datenanalyse im Schauerdetektor werden FPGAs der Firma Altera verwendet (siehe Abbildung 4.3). Diese besitzen sogenannte Logic Elements (LEs) als Logikblöcke. Stark vereinfachend dargestellt enthält jedes LE eine Look-Up-Table mit vier Eingangssignalen und einem Ausgangssignal, welches entweder direkt oder aber über eine nachgeschaltete Registerstufe auf den entsprechenden LE-Ausgang geschaltet werden kann. Jeweils acht LEs sind zu einem Logic Array (LA) zusammengefaßt, innerhalb dessen eine direkte Signalübertragung zwischen den einzelnen LEs via Local Interconnect erfolgen kann. Eine Signalübertragung zwischen LAs erfolgt mittels vertikaler und horizontaler Metallverbindungen (Column bzw. Row Interconnect). Zusätzlich enthalten die Bausteine bis zu 12 sogenannte Embedded Array Blocks (EABs). Dabei handelt es sich um Datenspeicher mit einer maximalen Speicherkapazität von 2048 Bit, die zur Implementierung komplexer Logikfunktionen bzw. zur Implementierung lokaler Zwischenspeicher verwendet werden können [Alt96].

Die homogene Struktur und hohe Granularität der FPGAs erlaubt die effiziente Implementierung von parallelen Pipeline-Strukturen, bei denen die einzelnen Verarbeitungsschritte auf kombinatorische Operationen beschränkter Komplexität aufgespaltet werden können. Beispiele hierfür sind Komparator- und Schiebeoperationen

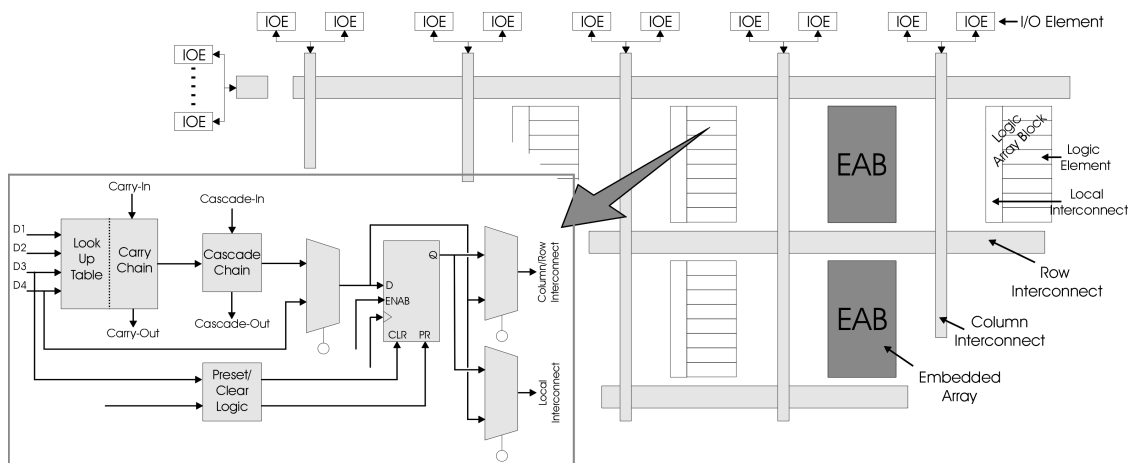


Abbildung 4.3: Struktur eines FPGAs der Firma Altera: Die einzelnen programmierbaren Elemente des Bausteins (Logic Element = LE, Embedded Array Block = EAB) können über horizontal bzw. vertikal angeordnete programmierbare Signalpfade (Column bzw. Row Interconnect) miteinander verschaltet werden.

aber auch einfache arithmetische Operationen (Additionen und Subtraktionen) mit ganzzahligen Werten geringer Bitbreite.

Die Implementierung sehr komplexer kombinatorischer Funktionen erfordert die großflächige Verteilung der Logik im Baustein und verursacht eine starke Zunahme der einzelnen Signallaufzeiten bzw. der Verzögerungszeiten zwischen den auszutauschenden Signalen. Diese führt zu einer massiven Verringerung der maximalen Verarbeitungsrate. Eine weitere Beschränkung ergibt sich natürlich aus der limitierten Anzahl der Signalpfade im Baustein.

5.1 Übersicht

In Übereinstimmung mit der im vorhergehenden Kapitel beschriebenen allgemeinen Struktur des Trigger- und Auslesesystems für das Dielektronenspektrometer HADES wurde für den Schauerdetektor das in Abbildung 5.1 dargestellte System zur Datenauslese und Echtzeit-Datenanalyse entwickelt. Dieses System zeichnet sich durch eine sehr enge Verflechtung der beiden Datenverarbeitungspfade aus, da die eigentliche Datenanalyse im Triggersystem (SHOWER-IPU) die vollständige Information der ersten Stufe des Auslesesystems (LVL1-Pipe) erfordert. Infolgedessen wurden sowohl LVL1-Pipe als auch LVL2-Pipe und damit verbundene Auslesefunktionen in die SHOWER-IPU integriert. Die einzelnen Module der SHOWER-IPU werden als Image Processing Cards (IPCs) bezeichnet. Jeweils zwei IPCs stellen die notwendige Trigger- und Auslesefunktionalität für ein vollständiges Detektorsegment zur Verfügung.

Während der normalen Datennahme konvertiert die DTU die von der CTU auf dem LVL1-Trigger-Bus erzeugten LVL1-Triggersignale in detektorspezifische Auslesebefehle. Diese werden an die am Detektor angebrachten Module der Front-End-Elektronik übertragen und dort in entsprechenden Auslesezyklen umgesetzt. Die Übertragung der Auslesebefehle erfolgt dabei durch das Fanout Board (FB), das hierfür pro Detektorsegment ein unabhängiges Bussystem bereitstellt.

Zunächst werden mit Hilfe der Front-End-Elektronik die aktuellen Ladungszustände der Detektorpads festgehalten. Diese noch analoge Ladungsinformation wird dann digitalisiert und zu den Image Processing Cards übertragen. Hier werden die digitalisierten Ladungswerte in der LVL1-Pipe zwischengespeichert, gleichzeitig erfolgt die Analyse der erhaltenen Daten nach Signaturen elektromagnetischer Schauer. Die Ergebnisse der Analyse werden auf den Image Processing Cards zur Auslese bereitgestellt und durch das Link Module (LM) zur Matching Unit (MU) übertragen. Hier erfolgt die Kombination der Analyseergebnisse von RICH, TOF und SHOWER zur Erzeugung der LVL2-Triggerentscheidung (siehe Kapitel 3.2.2). Die LVL2-Triggerentscheidung der MU wird der CTU bereitgestellt, die diese Entscheidung über den LVL2-Trigger Bus an die einzelnen DTUs überträgt.

Die DTU im Schauerdetektor konvertiert diese Entscheidung in spezielle Auslesebefehle für die Image Processing Cards, die in Abhängigkeit dieser Befehle die Verarbeitung der Daten in den lokalen Zwischenspeichern steuern. Die in der LVL2-Pipe zwischengespeicherten Daten können dann durch VME-Zugriffe in den lokalen Speicher

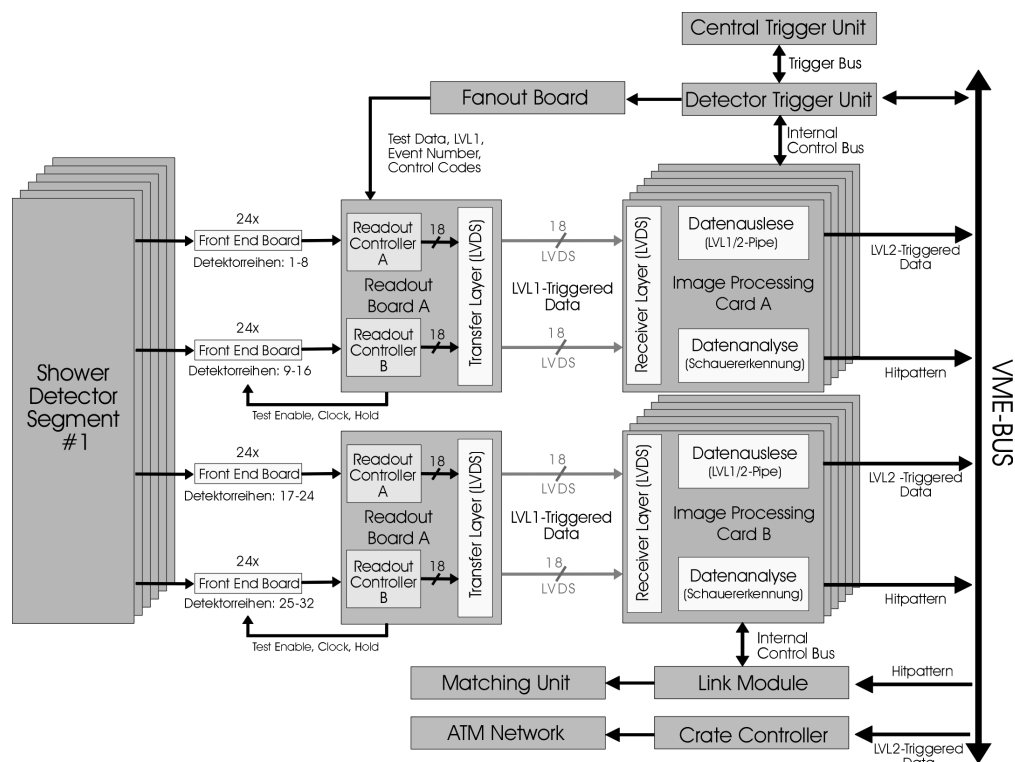


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des Trigger- und Ausleseelements für den HADES-Schauerdetektor. Nach dem Erhalt eines LVL1-Triggers startet die lokale Detector Trigger Unit die Detektorauslese sowie die erste Stufe der Datenverarbeitung durch die Front-End-Elektronik. Die in diesem Schritt erzeugten digitalen Ladungswerte der einzelnen Kathodenfelder werden von den Readout Boards zu den Image Processing Cards übertragen, wo eine Zwischenspeicherung in der LVL1/LVL2-Pipe sowie die eigentliche Datenanalyse stattfindet. Eine Weiterleitung der Analyseergebnisse an die Matching Unit erfolgt durch das Link Module. Die von der Matching Unit bestimmte LVL2-Triggerentscheidung wird via CTU-DTU an die IPCs verteilt, die in Abhängigkeit dieser Entscheidung die entsprechenden Daten der LVL1-Pipe verarbeiten.

der VME-CPU und von dort über das ATM-Netzwerk zum zentralen Event-Builder übertragen werden.

Zur Überprüfung der komplexen digitalen Signalverarbeitungspfade besteht die Möglichkeit, Testdaten in das Trigger- und Ausleseelement einzubringen, die dann anstatt der eigentlichen Detektordaten verarbeitet werden. Hierfür werden wohldefinierte Ladungsmuster von der lokalen VME-CPU an die DTU gesendet und von dort via Fanout Board in die Datenspeicher der Front-End-Elektronik geschrieben. Ein nachfolgender LVL1-Trigger startet die Übertragung dieser Daten zu den Image Processing Cards.

Das vollständige Trigger- und Ausleseelement für die 16956 Kanäle des Schauerdetektors besteht aus einer Detector Trigger Unit, einem Fanout Board, 576 Front-End-Boards, 12 Readout Boards, 12 Image Processing Cards, einem Link Module sowie einem VME-Crate Controller mit ATM-Interface.

Signal(e)	Funktion
DATA[7..0]	Daten- bzw. Kommando-Frame
CMD/DATA	Identifiziert den Frame (0=Daten, 1=Kommando)
DATA_VALID*	Qualifiziert die Information eines Frames
STROBE*	Strobe-Signal für gültigen Frame
ACK1 *	Bestätigt Frame-Übernahme durch Slave 1
ACK2*	Bestätigt Frame-Übernahme durch Slave 2

Tabelle 5.1: Signale, die zwischen Fanout Board und den beiden Readout Boards eines Detektorsegments ausgetauscht werden.

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Komponenten des Trigger- und Auslesesystems näher beschrieben. Schwerpunkt der Beschreibung liegt dabei auf den Image Processing Cards und dem Link Module, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und realisiert wurden. Dies umfaßt die Konzepterstellung unter Berücksichtigung der technischen und finanziellen Randbedingungen, die Überprüfung der technischen Realisierbarkeit des Konzepts durch detaillierte Simulationen der Hardware sowie die Durchführung von Prototypstudien, die technische Umsetzung des Konzepts¹ und die Entwicklung von Slow-Control-Software zur Steuerung und Überwachung des Gesamtsystems.

5.2 Detector Trigger Unit und Fanout Board

Abweichend vom Triggerverteilungskonzept (vgl. Kapitel 3.4.1) gibt es im Schauerdetektor keine direkte elektrische Verbindung zwischen der lokalen Detector Trigger Unit und der Front-End-Elektronik. Die von der DTU erzeugten Auslesebefehle werden zunächst an das Fanout Board und von dort mittels unabhängiger Bussysteme zur Front-End-Elektronik der einzelnen Detektorsegmente übertragen. Jedes Bussystem besteht aus 13 differentiellen Signalen im LVDS-Standard² (siehe Tabelle 5.1), die mittels Twisted-Pair-Kabel übertragen werden. Die Übertragungsstrecke beträgt 10 m bei einer an den Triggerbus angepaßten maximalen Übertragungsrate von 10 MHz.

Das asynchrone Protokoll zur Datenübertragung basiert auf einem Master-Slave-Prinzip, bei dem das Fanout Board die Funktion des Bus-Masters übernimmt. Der Master startet den Übertragungszyklus durch das Treiben der Datenleitungen DATA[7..0], der CMD/DATA- sowie der DATA_VALID*³-Leitung. Nach einer minimalen Haltezeit von 25 ns

1. Dies umfaßt die Schaltplan- und Layouterstellung sowie die Bestückung und Inbetriebnahme der Module.

2. Low Voltage Differential Signaling Standard (ANSI/TIA/EIA-644 bzw. IEEE 1596.3).

3. Das Zeichen * kennzeichnet ein low-aktives Signal (Signalpegel mit der geringeren Spannung entspricht dem WAHR-Zustand der Booleschen Logik).

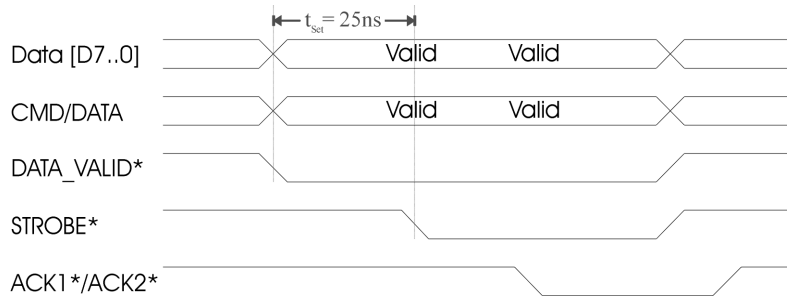


Abbildung 5.2: Timing Diagramm für die Übertragung der Auslesebefehle und Testdaten zwischen Fanout Board und Front-End Elektronik.

sendet der Master ein STROBE*-Signal, mit dessen fallender Flanke die Slave-Module den aktuellen Zustand der Bussignale übernehmen. Die Slave-Module bestätigen die Übernahme der Daten durch das Setzen des entsprechenden Acknowledge-Signals (ACK1* bzw. ACK2*). Das Erkennen aktiver Signalpegel auf diesen Leitungen veranlaßt den Master, den Übertragungszyklus zu beenden.

Die von den Slave-Modulen erhaltenen Auslesebefehle werden in entsprechende Auslesezyklen für die Front-End-Elektronik umgesetzt.

5.3 Die Front-End-Elektronik

Um die elektrischen Signale der einzelnen Schauerdetektoren auszulesen und zu verarbeiten, wird eine spezielle Ausleseelektronik direkt am Detektor benötigt. Diese wird als Front-End-Elektronik bezeichnet und besteht aus den Readout Boards (RBs) und den Front End Boards (FEBs).

5.3.1 Das Front End Board

Die erste Stufe der analogen Signalverarbeitung im Schauerdetektor, d.h. die Konvertierung der Strompulse der Kathodenfelder in Spannungssignale für die nachfolgende Digitalisierung auf dem Readout Board, erfolgt mit Hilfe des sogenannten Front End Boards [Sal98].

Zentrale Komponente des FEBs ist dabei ein speziell entwickelter Application Specific Integrated Circuit (ASIC), der 32 unabhängige Abtast-Halte-Stufen (Sample & Hold-Stufen) mit vorgeschaltetem Verstärker und Pulsformer besitzt (siehe Abbildung 5.3). Die mittels verdrehter Doppelleitungen¹ vom Detektor an das Front End Board übertragenen Strompulse werden vom Verstärker (Pre-Amp) integriert und in eine

1. In Abhängigkeit von der Position des Kathodenfelds variierte die Länge dieser Leitungen zwischen 20 cm und 180 cm, so daß der nachgeschaltete Verstärker eine Variation der Eingangskapazität zwischen 30 pF und 140 pF tolerieren muß.

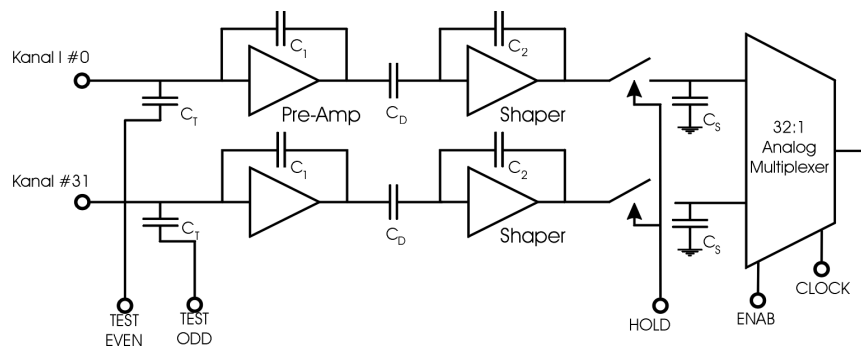


Abbildung 5.3: Blockschaltbild des Front End Board ASICs. Der integrierte Schaltkreis besitzt 32 unabhängige Abtast-Halte-Stufen mit vorgeschaltetem Verstärker (Pre-Amp) und Pulsformer (Shaper), die über einen analogen 32:1 Multiplexer ihre Signale an den Ausgang weiterleiten.

Spannung übersetzt, die über den nachgeschalteten Pulsformer (Shaper) das Eingangssignal für den Abtast-Kondensator C_s der Abtast-Halte-Schaltung bildet.

Mit Erzeugung des HOLD-Signals durch das Readout Board werden alle Abtast-Kondensatoren von ihren entsprechenden Pulsformern entkoppelt und bilden mit ihren Spannungen das Eingangssignal einer analogen 32:1 Multiplexerstufe. Kontrolliert durch die beiden vom Readout Board bereitgestellten Signale ENAB und CLOCK, werden die 32 Kanäle sukzessive auf den Ausgang der Multiplexerstufe geschaltet. Der Ausleseprozess wird durch die fallende Flanke des CLOCK-Signals in Koinkidenz mit einem aktiven Signalpegel am ENAB-Signal gestartet. Danach erfolgt die Steuerung der Kanalwechsel ausschließlich durch die fallende Flanke des CLOCK-Signals solange, bis alle 32 Kanäle abgearbeitet wurden.

Die Periodendauer des CLOCK-Signals wurde mit 300 ns so gewählt, daß die vollständige Auslesezeit einschließlich HOLD- und RESET-Zeiten (jeweils 200 ns) 10 μ s beträgt, d.h. eine Ausleserate mit der maximalen LVL1-Triggerrate möglich ist. Der nach Beendigung der Auslese erzeugte RESET-Puls bewirkt die Initialisierung und Freischaltung des ASICs für den nächsten LVL1-Trigger.

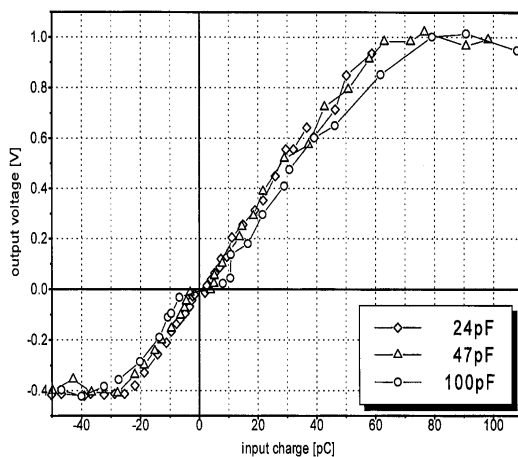


Abbildung 5.4: Übertragungscharakteristik (Ausgangsspannung versus Eingangsladung) des Front-End-Board ASICs für verschiedene Eingangskapazitäten. Die gemessene Ladungsempfindlichkeit beträgt 18 ± 0.6 mV/pC

Die Übertragungscharakteristik des Schaltkreises für verschiedene Eingangskapazitäten, im für den Schauerdetektor interessanten Ladungsbereich von -20 bis +60 pC zeigt Abbildung 5.4. Die gemessene Ladungsempfindlichkeit in diesem Bereich beträgt 18 ± 0.6 mV/pC.

Zur Funktionsüberprüfung der analogen Signalverarbeitung besitzt jeder Kanal des ASICs einen internen Testkondensator mit einer Kapazität von 2 pF, der mit einer Stufenspannung von $V_{pp} = 5$ V angesteuert und mit dessen Hilfe eine definierte Ladung von 10 pF dem Vorverstärker zugeführt werden kann. In Abhängigkeit der Signalpegel an den beiden ASIC-Inputs TEST_EVEN oder TEST_ODD findet dieser Test entweder für alle geraden oder alle ungeraden Kanalzahlen des ASICs statt.

Jeweils eine Detektorzeile ist mit einem FEB verbunden, so daß insgesamt 32 FEBs pro Kammer bzw. 96 FEBs für ein vollständiges Detektorsegment benötigt werden. Dieses Zuordnungsschema gilt auch für die Bereiche der einzelnen Kammern, in denen Zeilen mit weniger als 32 Kathodenfelder (vgl. Kapitel 2.5) vorhanden sind. Hierdurch erhält jede Kammer für alle nachfolgenden Stufen der Datenverarbeitung eine symmetrische Struktur aus 32 Zeilen und 32 Spalten, die eine Verarbeitung in den parallelisierten Einheiten des Auslese- und Anaylsesystems wesentlich vereinfacht.

Die 32 FEBs pro Kammer sind in vier Gruppen mit jeweils 8 FEBs aufgeteilt. Die sich entsprechenden Gruppen in den drei Lagen eines Detektorsegments sind jeweils mit einem Readout Controller (RC) über ein spezielles Analog/Digital-Bussystem verbunden. Dieses garantiert neben Spannungsversorgung und Übertragung der digitalen Steuersignale auch die Übertragung der analogen Ausgangssignale der FEB-ASICs.

5.3.2 Das Readout Board

Die zweite Stufe der analogen Signalverarbeitung erfolgt durch das Readout Board. Sie umfaßt die Digitalisierung der Ausgangssignale der FEBs, den Aufbau korrekter Subevents und deren Übertragung zur Image Processing Card. Hierfür besitzt jedes RB zwei unabhängige Readout Controller, die mit jeweils 24 Front-End Boards verbunden sind (Abbildung 5.5).

Weiterhin ermöglicht das Readout Board die Ausführung von Kalibrationstriggern und diversen Testfunktionen, die neben der Überprüfung der analogen Signalverarbeitung in der Front-End-Elektronik auch eine Überprüfung der digitalen Signalverarbeitungspfade des gesamten Trigger- und Auslesesystems erlauben. Zur Durchführung dieser einzelnen Funktionen unterscheidet das Readout Board zwei Betriebszustände, die als RUN-Betrieb bzw. TEST-Betrieb bezeichnet werden

Der RUN-Betrieb

In diesem Betriebsmodus werden ausschließlich die durch normalen Auslese- sowie Kalibrationstrigger erzeugten Auslesebefehle der DTU akzeptiert. Beide Befehle

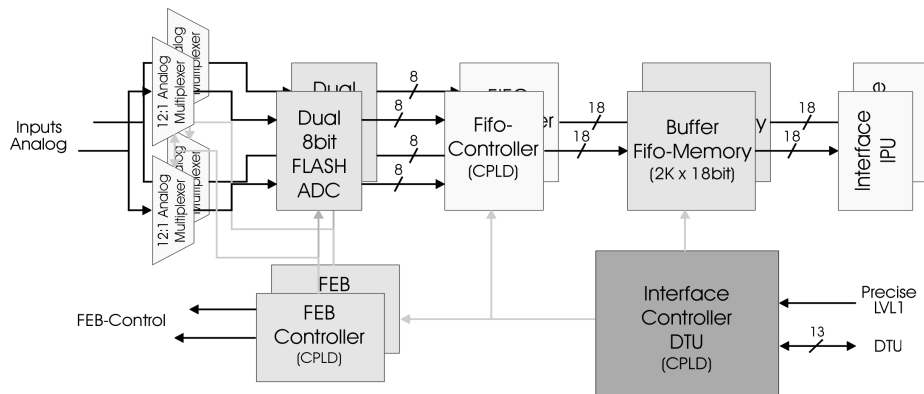


Abbildung 5.5: Schematische Darstellung eines Readout Boards. Jedes RB besitzt zwei unabhängige Readout Controller, die jeweils die analogen Ausgangssignale von 24 FEBs bzw. 768 Kathodenfeldern verarbeiten.

bewirken in einem ersten Schritt die Erzeugung entsprechender Steuersignale für die Front End Boards, so daß im Falle des Auslesetriggers der aktuelle Ladungszustand der Kathodenfelder und im Falle des Kalibrationstriggers eine definierte Testladung durch den FEB-ASIC verarbeitet wird. In einem zweiten Schritt werden die Ausgangsspannungen der FEBs durch das Readout Board digitalisiert, in Datenpakete zusammengefaßt und zur Image Processing Card übertragen.

Um dieses zu gewährleisten, sind jeweils 24 FEBs mit einem Readout Controller verbunden. Dieser besteht aus zwei analogen 12:1 Multiplexern, einem Analog-Digital-Wandler (ADC), einem Zwischenspeicher (Fifo) und einem Interface Controller zur Image Processing Card. Das Multiplexing erfolgt dabei in zwei aufeinanderfolgenden Multiplexerstufen. In der ersten Multiplexerstufe werden jeweils vier Eingangssignale mit einer Periodendauer von 25 ns auf einen Eingang der nachfolgenden 3:1 Multiplexerstufe geschaltet. Die mit einer Periodendauer von 100 ns ihre Eingänge auf einen mit der ersten Multiplexerstufe synchronisierten dualen 8-Bit-Flash-ADC¹ durchschaltet. Dieser übergibt seine Wandlungsergebnisse an den Fifo-Controller², der diese zu Datenpaketen zusammenfaßt und in einem Fifo³ für die Auslese ablegt. Abbildung 5.6 zeigt die Struktur eines Datenpakets.

Das Datenpaket ist in 18 Bit breiten Wörtern (Frames) organisiert, die aus einem 16 Bit breiten Datenwort und zwei sogenannten Flow-Control-Bits (FL-CTR[1..0]) bestehen, die das Datenwort klassifizieren. Der Kopf des Datenpakets (Header) besteht aus zwei Frames, die das Trigger-Tag sowie Informationen zum Status des Readout Boards enthalten. Dem Header folgen die unkalibrierten Ladungswerte von 768 Kathodenfeldern (8 Detektorreihen aus allen drei Lagen des Detektors, nicht nullunterdrückt) in der angegebenen Reihenfolge, so daß die Position eines Ladungswertes im Datenpaket eine eindeutige Padzuordnung ermöglicht. Zum Schluß

1. Analog Devices AD9085, ADC

2. Lattice Mach 210A-10, CPLD

3. Cypress CY7C4235-15, 2k x 18bit synchrones Fifo

Clock Cycle	FL_CTR[1..0]	D15.....D8	D7.....D0
#i	01	Trigger Tag	RB Status Word
#i+1	01	Fill Frame	Fill Frame
#i+2	00	Pre(m,n)	Pre(m,n+4)
#i+3	00	Pre(m,n+1)	Pre(m,n+5)
#i+4	00	Pre(m,n+2)	Pre(m,n+6)
#i+5	00	Pre(m,n+3)	Pre(m,n+7)
#i+6	00	Post1(m,n)	Post1(m,n+4)
⋮	⋮	⋮	⋮
#i+9	00	Post1(m,n+3)	Post1(m,n+7)
⋮	⋮	⋮	⋮
#i+384	00	Post2(m+31,n+2)	Post2(m+31,n+6)
#i+385	00	Post2(m+31,n+3)	Post2(m+31,n+7)
#i+386	10	Contr. Word	Contr. Word
#i+387	01	Check Sum	Check Sum

Abbildung 5.6: Struktur der Datenpakete, die der Readout Controller an die Image Processing Unit überträgt ($m = \text{Spaltenkoordinate}$, $n = \text{Zeilenkoordinate}$). Die Flow-Control-Bits (FL-CTR[1..0]) klassifizieren den Inhalt der Datenbits (D[15..0]) und erlauben somit eine Unterscheidung zwischen Datenworten, die Kontrollinformationen (z.B. Trigger-Tag) oder Detektordaten enthalten.

folgt ein Trailer aus zwei Frames, der aus einem definierten Bitmuster (Control Word) und einem Paritätstest (Check Sum) über alle Frames des Datenpaketes besteht. Die Datenübertragung erfolgt mit einer konstanten Taktrate von 40 MHz.

Der TEST-Betrieb

Die zentrale Aufgabe dieses Betriebsmodus ist der Test der komplexen digitalen Signalverarbeitungspfade im gesamten Trigger- und Auslesesystem des Schauerdetektors. Hierfür können Testdaten von der lokalen VME-CPU an die DTU übertragen und via Fanout Board an die Readout Boards gesendet werden. Auf den einzelnen RBs leitet der DTU Interface Controller diese Daten an den Fifo-Controller weiter, der die Daten zu Datenpaketen mit korrekter Struktur zusammenfaßt und im Auslese-Fifo zwischenspeichert. Ein nachfolgender Trigger bewirkt die Übertragung des kompletten Speicherinhalts zu den Image Processing Cards. Die analoge Signalverarbeitungskette der Front-End-Elektronik ist in diesem Betriebszustand deaktiviert.

Schnittstelle zur Image Processing Unit

Jeder Readout Controller besitzt eine unabhängige, unidirektionale LVDS-Schnittstelle, die die Datenübertragung zur Image Processing Card gewährleistet. Die Schnittstelle umfaßt 18 Datensignale und zwei Steuersignale und erlaubt eine maximale Transferrate von 40 MHz bei einer Verbindungslänge von 15 m. Das synchrone Protokoll zur Datenübertragung basiert auf einem freilaufenden Taktsignal (WCLK) und einem low-aktiven Signal (Data_Valid*), das einen aktiven Transferzyklus über die Datenleitungen

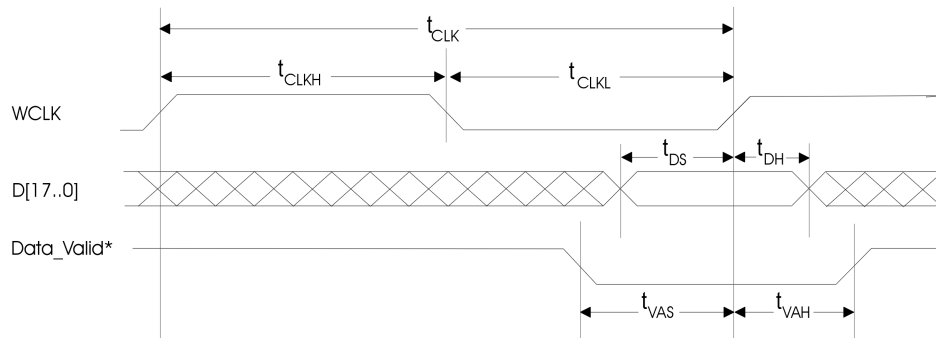


Abbildung 5.7: Timing-Diagramm für die Datenübertragung zwischen Readout Board und Image Processing Unit. Die mit einem Tektronix Logic Scope TLS 216 bestimmten Werte sind: $t_{CLK} = 25 \text{ ns}$, $t_{CLKH} = 12 \text{ ns}$, $t_{CLKL} = 13 \text{ ns}$, t_{DS} , $t_{DH} = 8 \text{ ns}$ und t_{VAS} , $t_{VAH} = 10 \text{ ns}$.

(D[17..0]) angezeigt (siehe Abbildung 5.7). Die einzelnen Signalpegel werden durch die steigende Flanke des Taktsignals qualifiziert.

5.4 Die Image Processing Card

5.4.1 Das Hardware-Konzept

Die Image Processing Card besteht aus einer Basiskarte im 6U VME-Standard, die die Auslesefunktionalität bereitstellt sowie einer Erweiterungskarte¹, die die notwendigen Logikressourcen für die Echtzeit-Datenanalyse zur Verfügung stellt. Basis- und Erweiterungskarte sind über zwei 96polige Steckverbinder miteinander verbunden und besitzen zwei programmierbare Schnittstellen im TTL-Standard mit einer Datenbreite von 120 Bit. Eine funktionale Übersicht der Image Processing Card sowie aller peripherer Verbindungen ist in Abbildung 5.8 dargestellt.

Jede Basiskarte besitzt zwei unabhängige Eingangsports, die den Anschluß eines Readout Boards, d.h. die vollständige Verarbeitung der Ladungsinformation von jeweils 16 Detektorreihen aus den drei Ebenen bzw. 1532 Pads des Schauerdetektors erlauben.

Zunächst werden die Daten vom Interface Controller, der neben einer Pegelkonvertierung der Eingangssignale auch das Low-Level-Datenprotokoll zwischen RB und IPC überwacht, an die Datenvorverarbeitungseinheit weitergeleitet. Hier erfolgt eine Überprüfung der Konsistenz der Daten bzw. des Datenpakets sowie eine Duplizierung der erhaltenen Daten. Die Originaldaten werden dann an die Speichereinheit übertragen, wohingegen die kopierten Daten kalibriert und an die Analyseeinheit übertragen werden.

1. Platinenmaß: 125,0 mm x 180,0 mm

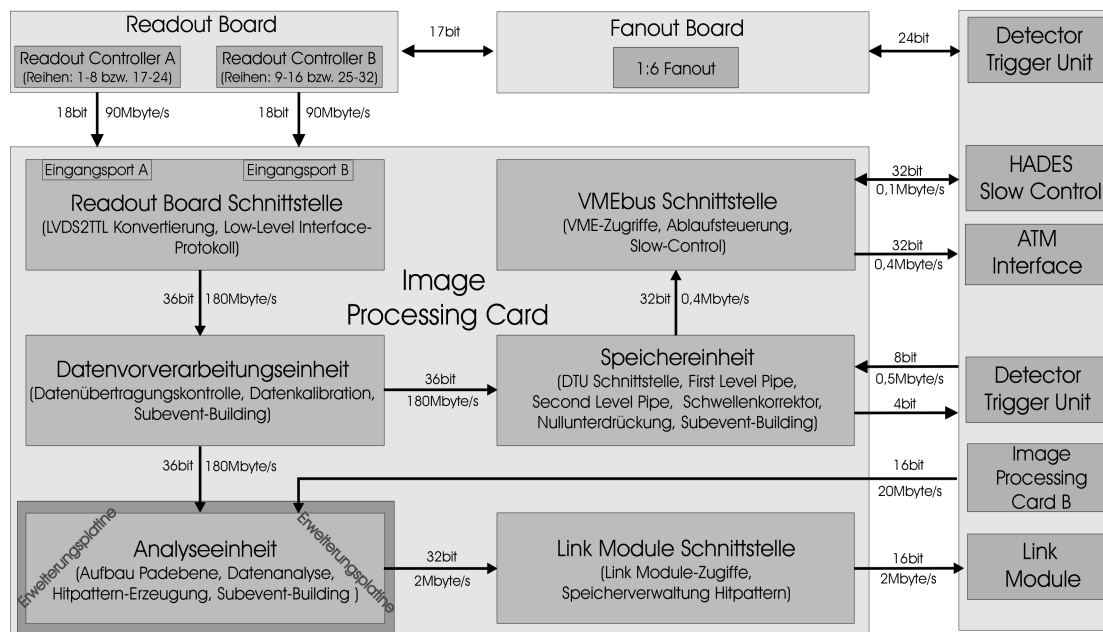


Abbildung 5.8: Funktionale Übersicht der Image Processing Card einschließlich Erweiterungsplatine (Analyseeinheit). Die Pfeile deuten den Datenfluß während des Analyse- und Auslesebetriebs an. Zusätzlich sind die Breiten und Datenraten der einzelnen Datenpfade enthalten.

In dieser erfolgt die eigentliche Datenanalyse. Die hierfür notwendige Rechenleistung wird von vier FPGAs¹ zur Verfügung gestellt, von denen jeder vier Zeilen der Detektorebene analysiert. Die Ergebnisse der Datenanalyse werden an den Interface Controller zum Link Module geleitet, dort zu Subevent-Paketen zusammengefaßt und zur Auslese durch das Link Module bereitgestellt.

Die Daten der Speichereinheit werden in Abhängigkeit der LVL2-Trigger-Entscheidung verarbeitet. Eine negative Entscheidung bewirkt das Entfernen der Daten aus der Speichereinheit, eine positive Entscheidung eine Komprimierung der Daten und die anschließende Speicherung in der LVL2-Pipe. Diese kann via VME-Zugriffe über den VMEbus-Contoller ausgelesen werden. Die verschiedenen funktionalen Einheiten und Schnittstellen der Image Processing Card werden im folgenden beschrieben.

5.4.2 Die funktionalen Einheiten und Schnittstellen der Basiskarte

5.4.2.1 Schnittstelle zum Readout Board

Zum unabhängigen Datentransfer zwischen den beiden Readout Controllern eines Readout Boards und der Image Processing Card existieren zwei eigenständige Eingangsports auf jeder Basiskarte. Die LVDS-Signale der Eingangsports werden

1. Altera EPF10K100ARC240-3, Embedded Logic Array

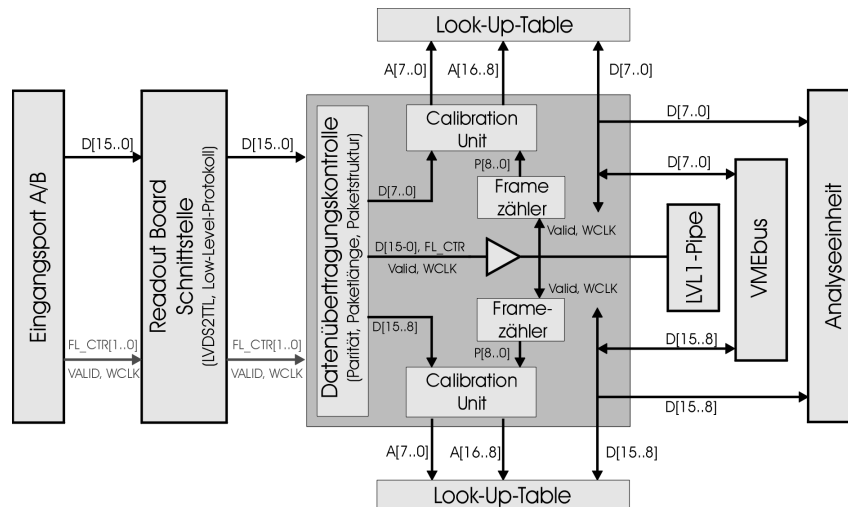


Abbildung 5.9: Funktionale Übersicht der Datenverarbeitung in der Datenvorverarbeitungseinheit mit vorgeschalteter Schnittstelle zum Readout Controller und nachgeschalteten Einheiten.

zunächst in einer Pegelwandlerstufe¹ in TTL-Signale konvertiert und an den Interface-Controller weitergeleitet (Abbildung 5.9). Dieser überwacht das Low-Level-Datenprotokoll zwischen RB und IPC (siehe Kapitel 5.4.2.2) und speichert die eingehenden Datenworte in einer zweistufigen Registerbank mit kurzen Setup- und Halte-Zeiten ($t_{DS} < 3 \text{ ns}$, $t_{DH} < 1 \text{ ns}$). Diese zusätzliche Maßnahme zur Synchronisation garantiert eine stabile bzw. fehlerunanfällige Datenübertragung zwischen Readout Controller und IPC, obwohl die einzelnen Readout Controller starke Abweichungen von den in Abbildung 5.7 aufgeführten Timing-Parametern zeigen. Weiterhin wird sichergestellt, daß die Daten am Ausgang der Registerstufe bzw. am Eingang der Datenvorverarbeitungsstufe nahezu eine volle Taktperiode (t_{CLK}) gültig sind.

5.4.2.2 Die Datenvorverarbeitungseinheit

In der ersten Stufe der Datenvorverarbeitungseinheit erfolgt eine Überprüfung der Korrektheit der erhaltenen Daten bzw. der Struktur des erhaltenen Datenpakets. Die Daten werden anhand des Paritätswortes überprüft, wohingegen die Strukturüberprüfung eine Kontrolle der Sequenz der Flow-Control-Bits sowie eine Überprüfung der Position und Korrektheit des Control Words beinhaltet. Entdeckte Fehler werden an den Interface-Controller zur DTU weitergeleitet.

Die zweite Stufe besteht aus zwei funktional identischen Einheiten zur Kalibration der beiden Ladungswerte eines Frames. Die Einheiten erhalten mit jedem Taktzyklus einen der zwei Ladungswerte eines Frames ($D[7..0]$ bzw. $D[15..0]$) sowie dessen Position im Datenpaket. Diese wird durch einen 9 Bit breiten Frame-Zähler erzeugt, der die Anzahl der erhaltenen Frames nach Eingang des Headers überwacht. Position und Ladungswert

1. National Semiconductor DS90C032, 4bit-Empfänger

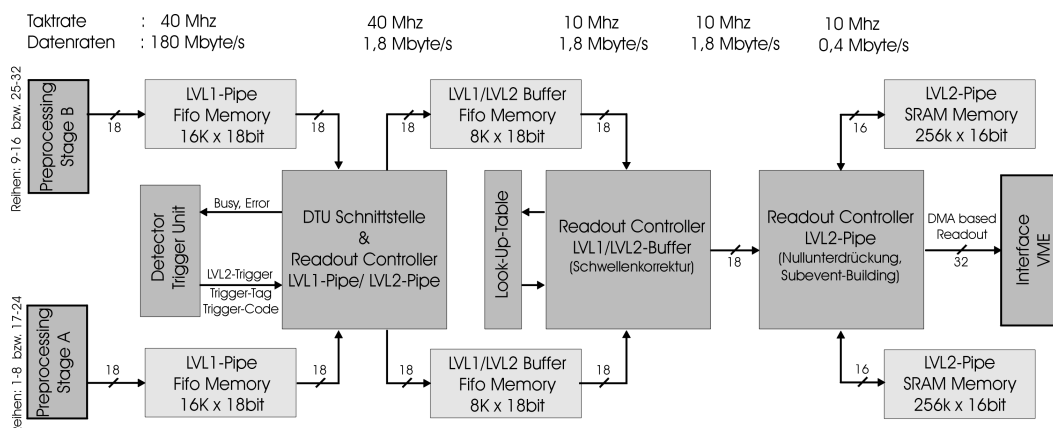


Abbildung 5.10: Funktionale Übersicht der Speichereinheit bestehend aus LVL1/LVL2-Pipe sowie zusätzlichen Einheiten zur Ablaufsteuerung und -überwachung. Außerdem sind die Takt- und Datenraten der einzelnen Stufen angegeben.

bilden den Adressraum einer Look-Up-Table (LUT), die den kalibrierten Ladungswert für die weitere Verarbeitung in der Image Processing Stage erzeugt. Darüber hinaus wird eine unkalibrierte Version der Daten an die Data Storage Stage weitergeleitet.

Technisch realisiert ist die beschriebene Aufgabenstellung der Datenvorverarbeitungsstufe und der RB-Schnittstelle in einem CPLD¹ und zwei SRAMs², die als LUT verwendet werden. Die Hardware-Umsetzung erfolgte in einem streng synchronen Design unter Verwendung von Pipeline-Strukturen zur Datenverarbeitung, so daß die notwendige Taktrate von 40 MHz um einen Faktor 1,7 überschritten werden konnte.

5.4.2.3 Die Speichereinheit

Zunächst werden die Daten in der LVL1-Pipe zwischengespeichert (siehe Abbildung 5.10). Diese besteht aus einem Fifo³ pro Eingangsport und erlaubt die Speicherung von maximal 42 Datenpaketen⁴. Um einen Überlauf und damit einhergehende Datenverluste zu verhindern, erzeugt die LVL1-Pipe jedoch bereits nach 40 gespeicherten Datenpaketen ein Full-Signal, das an den Interface-Controller zur DTU weitergeleitet wird⁵.

Die Weiterverarbeitung der Daten der LVL1-Pipe erfolgt in Abhängigkeit der LVL2-Triggerentscheidung. Ein negativer Trigger bewirkt das Löschen der Daten und wird durch die Auslese der entsprechenden Daten aus dem Fifo erreicht, wohingegen eine positive Entscheidung ein Auslesen der entsprechenden Daten mit anschließender

1. Lattice ispLSI 3320-70, CPLD
 2. Cypress CY7C1009-12, 128k x 8bit statisches RAM
 3. Cypress CY7C4265-15, 16k x 18bit synchrones Fifo
 4. Die Speichertiefe wurde entsprechend der Latenzzeit der zweiten Stufe des Triggersystems gewählt.
 5. Diese Schwelle ist via Slow Control einstellbar .

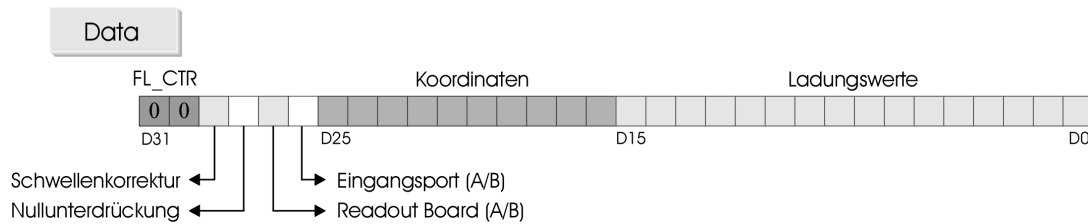


Abbildung 5.11: Struktur eines Datenworts der LVL2-Pipe. Neben den eigentlichen Ladungswerten ($D[15..0]$) enthält das Datenwort Positions- und Statusinformationen, die für die spätere Offline-Analyse benötigt werden.

Zwischenspeicherung im LVL1/LVL2-Buffer bewirkt. In jedem Fall erfolgt während der Datenauslese eine Konsistenzüberprüfung der Triggerdaten im Datenpaket mit den Triggerdaten der Triggerentscheidung. Inkonsistenzen werden durch ein Error-Signal dem DTU Interface-Controller angezeigt. Eine detaillierte Spezifikation der Schnittstelle zur DTU erfolgt in Kapitel 5.4.2.4.

Der LVL1/LVL2-Buffer besteht aus zwei Fifos¹, deren Aufgabe die Entkoppelung von LVL1- und LVL2-Pipe ist, um den asynchronen Betrieb beider Pipes zu ermöglichen. Die im Buffer gespeicherten Datenpakete werden vom Readout Controller ausgelesen und an den entsprechenden Readout Controller der LVL2-Pipe weitergeleitet. Zeitgleich erfolgt eine Schwellenkorrektur der Ladungswerte durch den Readout Controller. Dabei werden Ladungswerte kleiner bzw. gleich dem Schwellenwert durch den Ladungswert Null im Datenpaket ersetzt, wohingegen die Ladungswerte oberhalb des Schwellenwertes im Datenpaket verbleiben. Die hierfür notwendigen Schwellenwerte sind in einer Look-Up-Table abgelegt, die durch den Readout Controller angesteuert wird. Die Adresse zur Ansteuerung der LUT wird aus der Position des Ladungswertes im Datenpaket bestimmt.

Abschließend werden die an den Readout Controller der LVL2-Pipe übertragenen Datenpakete nullunterdrückt und in der LVL2-Pipe gespeichert. Hierbei werden alle Null-Frames (beide Ladungswerte in einem Daten-Frame sind gleich Null) aus dem Datenpaket entfernt, und die verbleibenden Frames werden zusammen mit ihrer Position im Datenpaket als 32 Bit breite Datenworte (Frames) an den Subevent-Builder übergeben. Zusätzlich enthält jedes Datenwort Statusinformationen, die den Betriebszustand der IPC widerspiegeln bzw. für die eindeutige Zuweisung der Ladungswerte erforderlich sind. Abbildung 5.11 zeigt die Struktur eines Datenwortes.

Der Subevent-Builder erzeugt aus den Daten Datenpakete (Subevents) mit der in Abbildung 5.12 dargestellten Struktur, die in einem SRAM-basierten Speicher² für die Auslese durch die lokale VME-CPU bereitgestellt werden. Die Speicherung der Datenworte erfolgt dabei sequentiell in zwei im Adressraum aufeinander folgenden Speicherstellen. Eine Auslese der Daten kann durch 16 bzw. 32 Bit breite Einzelzugriffe

1. Cypress CY7C4255-15, 8k x 18bit synchrones Fifo

2. Samsung KM6164002BT-15, 256k x 16bit statisches RAM

Offset-Addr.	D31	Frames LVL2-Pipe	D0
0x0	Total-Byte-Count		
0x4	Subevent Size		
0x8	Subevent Decoding Information		
0xc	Subevent Builder Identifier		
0x10	Trigger Tag		
0x14	Event Data		
0x...		
0x...	Subevent Size		
0x...	Subevent Decoding Information		
0x...	Subevent Builder Identifier		

Abbildung 5.12: Das Datenformat der LVL2-Pipe. Es besteht aus 32 Bit breiten Frames mit folgender Bedeutung: Total-Byte-Count = Anzahl der gespeicherten Bytes, Subevent-Size = Größe des nachfolgenden Datenpakets in Byte, Subevent Decoding Information = spezifiziert die Bytefolge im Frame, Subevent Builder Identifier = Kennung des Subevent-Builders.

im A24/D16- bzw. A24/D32-Modus oder aber im Blocktransfer-Modus erfolgen (siehe Kapitel 5.4.2.6).

Um gleichzeitige Schreib- und Lesezugriffe auf die LVL2-Pipe zu ermöglichen, besteht diese aus zwei unabhängigen Speicherbänken, die alternierend für einen der beiden Zugriffe freigeschaltet werden. Ein Wechsel der Bänke wird durch einen VMEbus-Zugriff der auslesenden CPU erzwungen (Switch-Request). Dieser kann jedoch nur nach vollständiger Bearbeitung eines Ereignisses erfolgen und wird der CPU durch ein Statusregister angezeigt.

Im selben Register ist ebenfalls die Speicherbelegung der zum Zeitpunkt der Statusregisterabfrage mit dem Subevent-Builder verbundenen Speicherbank enthalten (Anzahl der Ereignisse sowie Anzahl der Bytes). Optional besteht die Möglichkeit, daß mit dem Überschreiten eines bestimmten Füllstands die IPC dieses per VME-Interrupt an die CPU meldet.

5.4.2.4 Schnittstelle zur Detector Trigger Unit

Die Übertragung der LVL2-Triggerentscheidung zur Image Processing Card erfordert einen direkten Zugriff der DTU auf IPCs. Darüber hinaus muß eine Übertragung von Statusinformationen (BUSY- und ERROR-Bedingung) zwischen den IPCs und der DTU möglich sein. Um dieses zu gewährleisten, wurde auf der nicht belegten Reihe A der VME-J2-Backplane ein auf die Aufgabenstellung optimiertes Bussystem realisiert. Das asynchrone Protokoll zur Datenübertragung basiert auf einem Master-Slave-Prinzip, bei dem die DTU die Funktion des Bus-Masters übernimmt. Neben Lese- und Schreibzugriffen auf einzelne Slave-Module erlaubt das Protokoll auch simultane Schreibzugriffe auf alle Module des Systems (Broadcast-Write-Cycle). Das Bussystem umfaßt die folgenden Signale zur Datenübertragung:

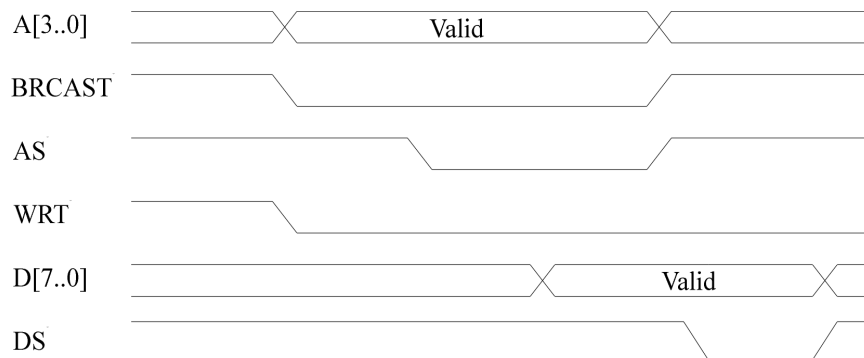


Abbildung 5.13: Relatives Timing-Diagramm für einen Broadcast-Write-Zyklus, der zur Übertragung der LVL2-Triggerentscheidung zwischen der DTU und den 12 IPCs verwendet wird. Das Trigger-Tag und der Trigger-Code werden in zwei aufeinanderfolgenden Zyklen über die Datenleitungen übertragen.

Addressierung:

Address[7..0] : Die Detector Trigger Unit adressiert eine der 12 IPCs durch das Anlegen der entsprechenden Adresse.

Broadcast (BRCAS)* : Zeigt einen sogenannten Broadcast-Write-Zyklus an, d.h. die DTU sendet zeitgleich Daten an alle IPCs. Die zu beschreibende Speicherstelle wird durch die Adressleitungen selektiert.

AddressStrobe (AS)* : Fallende Flanke qualifiziert die Signalpegel der Adressleitungen und der BRCAS*-Leitung.

Datenübertragung:

Data[7..0] : Datenleitungen.

Write (WRT)* : Klassifiziert den aktuellen Zugriff als Lese- bzw. Schreiboperation.

DataStrobe (DS)* : Während eines Schreibzugriffs qualifiziert die fallende Flanke die Signalpegel der Datenleitungen. Während einer Leseoperation deutet die steigende Flanke die Übernahme der Daten durch den Master an.

DataTransferAcknowledge (DTACK)* : Mit einem aktiven Pegel bestätigt das Slave-Modul den erfolgreichen Abschluß des aktuellen Lese bzw. Schreibzugriffs. Kein DTACK* erfolgt bei einem Broadcast-Write-Zugriff.

Abbildung 5.13 zeigt die zeitliche Abfolge der Signale während eines Broadcast-Write-Zyklus. Darüber hinaus besitzt das Bussytem jeweils zwei Error- und Busy-Leitungen, die den entsprechenden Signalen auf dem Triggerbus entsprechen und deren Signalpegel von der DTU einfach weitergeleitet werden.

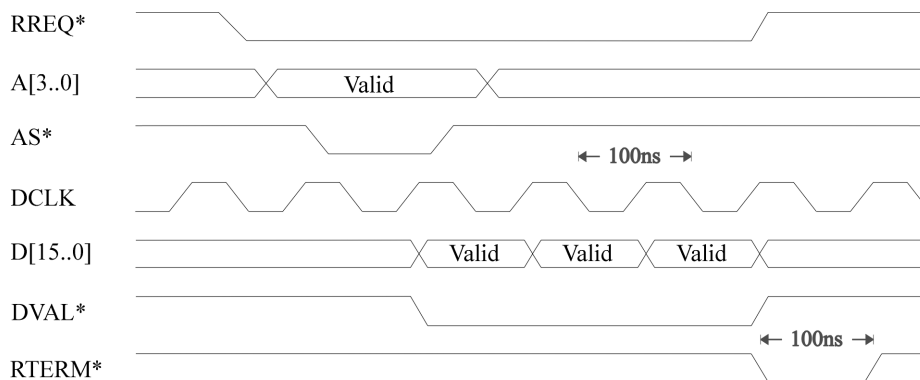


Abbildung 5.14: Protokoll zur Hitpatternübertragung zwischen Image Processing Cards und Link Module. Nach dem Setzen des RREQ*-Signals erfolgt eine Adressierung der IPC durch das LM. Daraufhin erfolgt die zum DCLK-Signale synchrone Übertragung der Daten durch die IPC. Der Zyklus wird durch die fallende Flanke des RTERM*-Signals beendet.

5.4.2.5 Schnittstelle zum Link Module

Die im Hitpattern-Speicher abgelegten Ergebnisse der Datenanalyse (siehe Kapitel 5.4.3.1) müssen zur Bildung der LVL2-Triggerentscheidung zur Matching Unit übertragen werden. Dies erfolgt durch ein intermediäres Modul (Link Module), dessen Aufgabe die Zusammenstellung der zu einem LVL1-Trigger gehörenden Hitpattern zu einem Subevent mit anschließender Übertragung zur Matching Unit ist. Hierfür wurde auf der nicht belegten Reihe C der VME-J2-Backplane ein Bussystem realisiert, das dem Link Module den Zugriff auf einzelne Image Processing Cards ermöglicht. Das asynchrone/synchrone Protokoll zur Datenübertragung basiert auf einem Master-Slave-Prinzip, bei dem das Link Module die Funktion eines Bus-Masters übernimmt. Das Bussystem umfaßt die folgenden Signale:

Interrupt:

ReadoutRequest (RREQ)* : Der eigentliche Datentransfer wird von den IPCs initiiert, die durch das Setzen dieses Open-Collector-Signals dem Bus-Master anzeigen, daß Daten zur Auslese bereitstehen.

Adressierung:

Address[3..0] : Das Link Module adressiert eine der 12 IPCs durch Anlegen der entsprechenden Adresse.

AddressStrobe (AS)* : Qualifiziert die Signalpegel der Adressleitungen.

Datenübertragung:

Data[15..0] : Datenleitungen.

DataClock (DCLK) : Vom Bus-Master bereitgestelltes Clock-Signal zur Synchronisation der Datenübertragung zwischen Slave- und Master-Modul. Das Slave-Modul muß gewährleisten, daß die Signalpegel der Datenleitungen mit der fallenden Flanke von DCLK gültig sind. Die Taktrate f_{DCLK} beträgt 10 MHz.

DataValid (DVAL)* : Zeigt einen aktiven Datentransfer zwischen IPC und LM an. Das Link Module übernimmt bei aktivem DVAL* alle Daten mit der fallenden Flanke von DCLK.

ReadoutTermination (RTERM)* : Fallende Flanke zeigt das Ende der Datenübertragung zwischen IPC und LM an und bewirkt die Adressierung der nächsten IPC, falls RREQ* aktiv ist.

Weiterhin überwacht die Schnittstelle die Belegung des Hitpatternspeichers und teilt entsprechende Busy- bzw. Error-Bedingungen dem DTU Interface-Controller mit.

5.4.2.6 Schnittstelle zum VMEbus

Die Schnittstelle zum VMEbus ermöglicht den Zugriff der lokalen VME-CPU auf die Image Processing Card. Diese Zugriffe umfassen neben der Auslese der LVL2-Pipe durch das Datenaufnahmesystem auch Zugriffe des Slow-Control-Systems zur Initialisierung, Überwachung und Steuerung der einzelnen funktionalen Einheiten der IPC.

Neben 16 bzw. 32 Bit breiten Einzelzugriffen im A24/D16- bzw. A24/D32-Modus¹ erlaubt das Interface die Auslese der LVL2-Pipe im Blocktransfer- (BLT32) bzw. Chained-Blocktransfer-Modus (CBLT32). Im Gegensatz zu den Einzelzugriffen, die pro Zugriff eine Adressierung der angesprochenen Karte erfordern, erfolgt beim BLT32 nur die Übertragung einer Startadresse von der startend bis zu 256 Speicherzugriffe durch die CPU erfolgen können. Die Verwaltung der entsprechenden Adresspointer erfolgt durch die IPC. Zusätzlich ermöglicht die IPC Zugriffe auf die LVL2-Pipe via CBLT32. Hierbei erfolgt die Adressierung der IPC durch einen Token, den der Schnittstellen-Controller über den IACKIN*-Eingang erhält und nach Beendigung der Datenübertragung über den IACKOUT*-Ausgang an das nächste Modul in der Auslekette weiterreicht. Das letzte Modul der Kette beendet die Auslese durch das Anzeigen eines Bus-Errors. Erzeugt wird der Token durch einen Einzelzugriff der VME-CPU auf das erste Modul der Kette.

Die vollständige Schnittstellenfunktionalität ist in einem CPLD² implementiert. Notwendige Signalpegelanpassungen erfolgen durch Treiberbausteine der 74er-Familie.

1. A24/Dxx : Zugriffe mit Datenbreite xx, die innerhalb eines 24 Bit breiten Adressraums erfolgen.

2. Lattice ispLSI 3320-70, CPLD

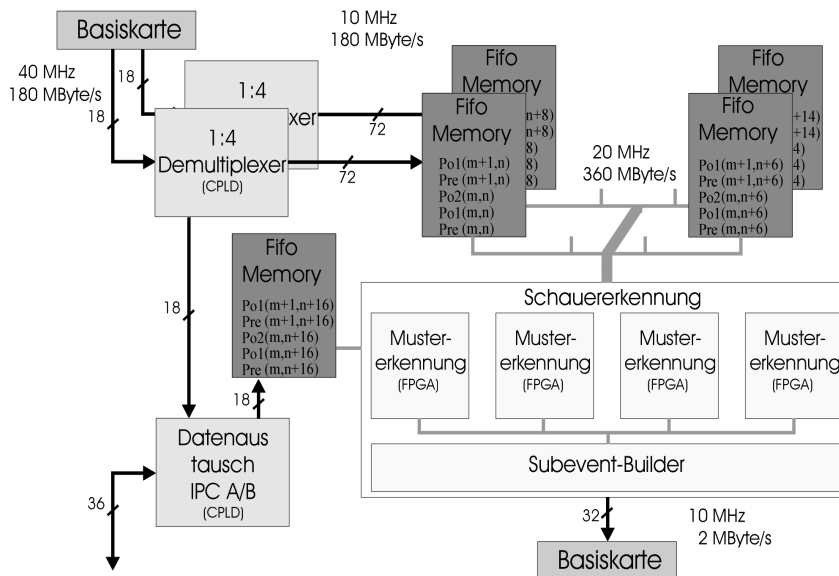


Abbildung 5.15: Funktionale Übersicht der Analyseeinheit. Die in den Fifos eingetragenen Ladungswerte sollen die Speicherfolge der Ladungswerte verdeutlichen. Das nicht dargestellte zweite Byte enthält Ladungswerte der Nachbarzeile. Außerdem sind die Takt- und Datenraten der einzelnen Verarbeitungstufen angegeben.

Mit den im HADES-Experiment verwendeten PowerPC-CPUs¹ ergab sich im BLT32-Modus eine maximale Datenübertragungsrate von 17 MByte/s. Ein entsprechender Test für den CBLT32-Modus war mit den zur Verfügung stehenden CPUs nicht durchführbar, da diese den CBLT32-Modus nicht unterstützen. Die während der Inbetriebnahme der IPC erhaltenen Parameter lassen jedoch eine Abschätzung der maximalen Datenübertragungsrate in diesem Auslesemodus von 36 MByte/s realistisch erscheinen.

5.4.3 Die funktionalen Einheiten der Erweiterungskarte

5.4.3.1 Die Analyseeinheit

Die von den beiden Datenvorverarbeitungseinheiten erhaltenen Datenpakete werden zunächst von einer 1:4 Demultiplexerstufe auf einen Zwischenspeicher, bestehend aus neun 18 Bit breiten Fifos², verteilt (siehe Abbildung 5.15). Die Verteilung der Daten erfolgt dabei dergestalt, daß in den einzelnen Bytes der Fifos (D[7..0] bzw. D[15..0]) ausschließlich Ladungswerte einer bestimmten Zeile vorhanden sind. Eine Ausnahme vom Demultiplexing bilden die in den Datenpaketen enthaltenen Kontrollinformationen, welche in jedem Fifo abgelegt werden. Die Datenbits D[17..16] der Fifos werden zur Speicherung von Flow-Control-Bits verwendet.

1. Creative Electronic System (CES) RIO2 80620A

2. Cypress CY7C4225-15, 1k x 18bit synchrones Fifo

Die dem Zwischenspeicher nachgeschaltete Schauererkennungseinheit besteht aus vier FPGAs vom Typ Altera EPF10K100ARC240-3. Jeder Baustein enthält alle funktionalen Einheiten zur Analyse von vier Detektorreihen, d.h. den Algorithmus zur Suche nach Ladungs-Clustern in den beiden Postshower-Detektoren und zur lokalen Maximumsuche im Preshower-Detektor (siehe Kapitel 4.2.2). Weiterhin enthält jeder Baustein Logik zur Ablaufsteuerung und zur Kontrolle der diversen Schnittstellen, die den Austausch von Randwerten, Hitpattern und Statusinformationen erlauben.

Nachdem ein vollständiges Ereignis im Zwischenspeicher abgelegt ist, startet die Schauererkennungseinheit mit der Analyse der Daten. Die miteinander synchronisierten FPGAs lesen mit jedem Taktzyklus des Lesetakts einen Frame aus den Fifos und verteilen die darin enthaltenen Ladungswerte auf die entsprechende Pipeline. Der Arbeitstakt der Pipelines (Analysetakt) ist im Vergleich zum Lesetakt um einen Faktor drei reduziert, so daß eine simultane spaltenweise Analyse der einzelnen Detektorebenen möglich ist. Die Ergebnisse der Analyse sind in jedem Taktzyklus vier 4bit-Worte, die angeben, in welcher Zeile ein potentieller elektromagnetischer Schauer gefunden wurde. Diese Signale werden vom Subevent-Builder ODER-verknüpft. Ein positives Ergebnis initiiert das Schreiben eines 32bit-Wortes (Hitpattern) in den Hitpattern-Speicher. Dieser besteht aus zwei synchronen Fifos¹ und befindet sich auf der Basiskarte.

Die Struktur der Subevents sowie das Datenformat der Hitpattern in diesem Speicher ist in Abbildung 5.16 dargestellt. Das Headerwort beinhaltet triggerspezifische Informationen (Trigger-Tag, RB-Status-Wort) sowie eine Kennung (IPC_ID), die die datenverarbeitende IPC eindeutig kennzeichnet. Das Hitpattern besteht aus der 5 Bit breiten Spaltenkoordinate, dabei handelt es sich um die aktuelle Spaltennummer, die mit jedem Analysetakt um 1 inkrementiert wird, und der 16 Bit breiten Reihenkoordinaten. Jedem Bit der Reihenkoordinate ist dabei jeweils eine bestimmte Detektorreihe zugeordnet. Das Trailerwort enthält die Anzahl der Datenworte die einschließlich

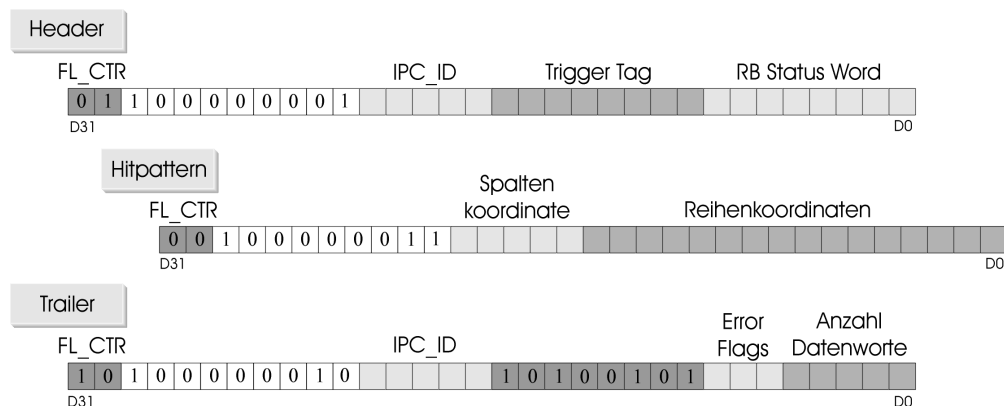


Abbildung 5.16: Struktur eines Hitpattern-Subevents. Für jedes analysierte Ereignis wird ein solches Subevent erzeugt und an die Basiskarte zur Zwischenspeicherung übertragen. Ein Ereignis mit negativem Analyseergebnis erzeugen Subevents, die ausschließlich einen Header und Trailer enthalten.

1. Cypress CY7C4225-15, 1k x 18bit synchrones Fifo

Header und Trailer im Subevent enthalten sind. Darüber hinaus sind Error- und Statusinformationen im Trailerwort enthalten.

5.4.3.2 Schnittstelle zur Image Processing Card

Die Datenanalyse eines Detektorsegments durch zwei IPCs (IPC A/B) erfordert den Austausch von Ladungswerten zwischen den beiden Karten. Hierfür besitzt jede Erweiterungskarte zwei programmierbare bidirektionale Schnittstellen im TTL-Standard mit nachgeschaltetem Fifo¹ zur Zwischenspeicherung der Daten, so daß ein asynchroner Betrieb der beiden Analysestufen gewährleistet ist. Jede Schnittstelle umfaßt die folgenden Signale zum Datenaustausch:

DATA[9..0] : Datenleitungen

DataValid (DVAL*) : Zeigt eine aktive Datenübertragung zwischen den IPCs an.

DataClock (DCLK)* : Taktsignal, dessen steigende Flanke die Pegel der Datenleitungen während einer aktiven Datenübertragung qualifiziert.

Die vollständige Schnittstellenfunktionalität ist in einem CPLD² implementiert. Neben den Ladungswerten der Randzeile werden auch die entsprechenden Triggerdaten zwischen den Karten ausgetauscht. Eine entsprechende Identifikation der Datenworte erfolgt mit Hilfe der Datenleitungen D[9..8], die eine Kodierung der Datenworte mit Hilfe der Flow-Control-Bits ermöglichen. Die Übertragung der Signale erfolgt mittels Flachbandkabel. Die Übertragungstrecke beträgt jedoch nur ca. 10 cm, da die Karten sich in benachbarten Einschüben desselben VME-Einschubsystems befinden.

5.4.4 Steuerungs- und Überwachungsfunktionen

Die VMEbus-Schnittstelle der Basiskarte erlaubt den Zugriff des Slow-Control-Systems auf die einzelnen funktionalen Einheiten der Basis- und Erweiterungskarte. Neben der eigentlichen Ablaufsteuerung und -kontrolle der IPU-Funktionalität sind folgende Zugriffe via Slow-Control-System möglich.

Konfiguration der FPGAs :

Die eigentliche Funktionalität bzw. Logikinformation der FPGAs wird im Baustein durch statische RAM-Zellen, sogenannte Konfigurationsspeicherzellen, definiert. Eine Unterbrechung der Versorgungsspannung bewirkt ein Zurücksetzen der FPGAs in den unprogrammierten Grundzustand und erfordert eine Konfiguration der einzelnen Bausteine.

1. Cypress CY7C4225-15, 1k x 18bit synchrones Fifo

2. Lattice ispLSI 1032E-90, CPLD

Konfiguration der Look-Up-Tables :

Die in volatilen Speicherbausteine (SRAMs) implementierten Look-Up-Tables der IPU erfordern nach einer Unterbrechung der Versorgungsspannung eine Neukonfiguration.

Testzugriffe :

Zur Überprüfung der einzelnen Signalverarbeitungspfade bzw. der korrekten Funktionsweise der einzelnen funktionalen Einheiten können Testdaten via VME in das System eingebracht und wieder ausgelesen werden.

Status- und Fehlerregisterabfragen :

Diese Register erlauben ein „Online-Monitoring“ aller wichtigen Parameter des Gesamtsystems. Neben der aktuellen Speicherbelegung der diversen Pipes und Buffer ist eine Bestimmung der aktuellen Triggerrate, eine Bestimmung der Betriebsmoden sowie eine Überprüfung der korrekten Datenübertragung zwischen Front-End-Elektronik und IPU möglich.

Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 5.17 und Abbildung 5.18) zeigen die bestückten Karten.

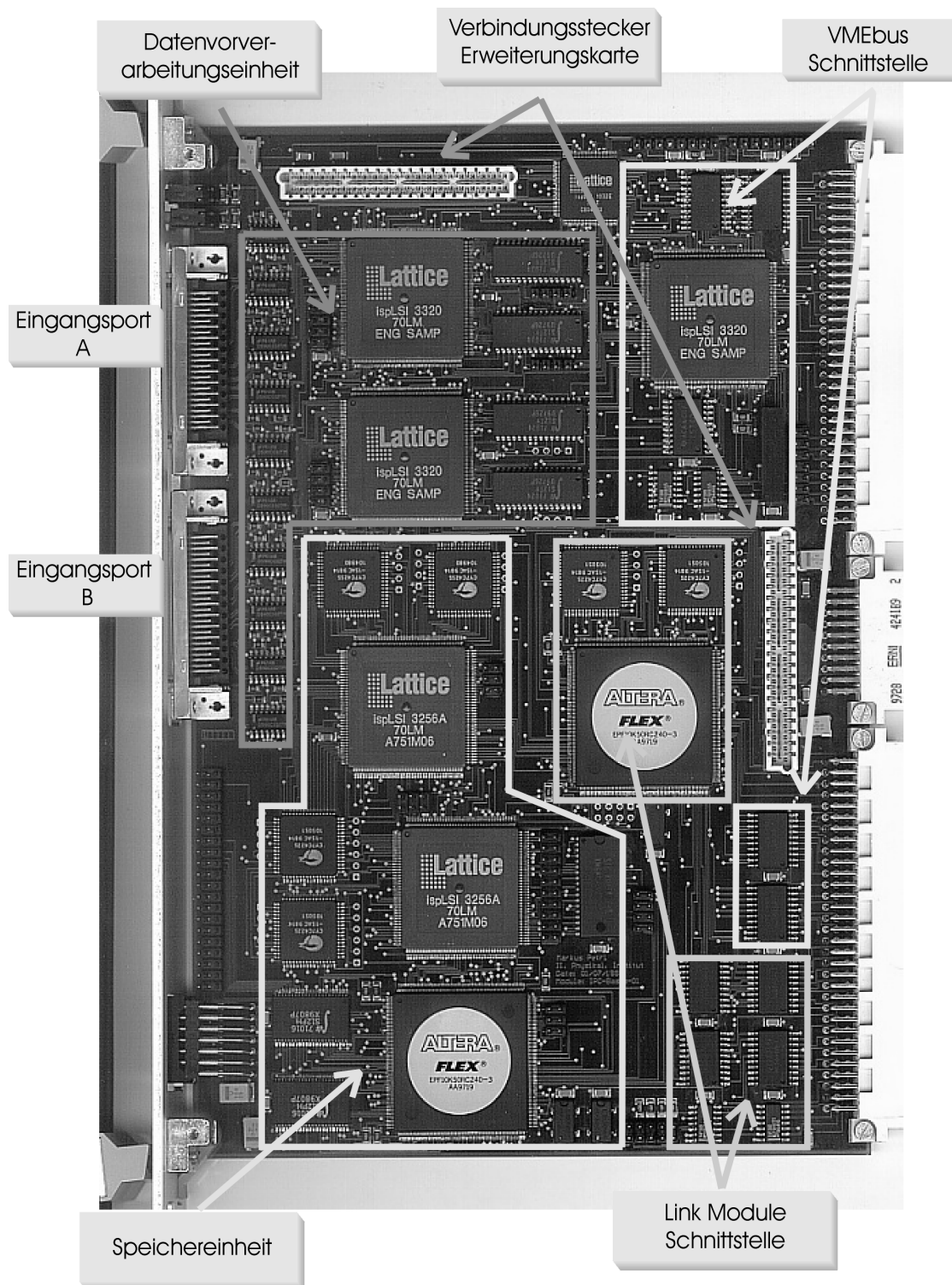


Abbildung 5.17: Die im 6U VME-Standard realisierte Basiskarte. Die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen funktionalen Einheiten sind durch Rahmen in unterschiedlichen Graustufen zusammengefasst.

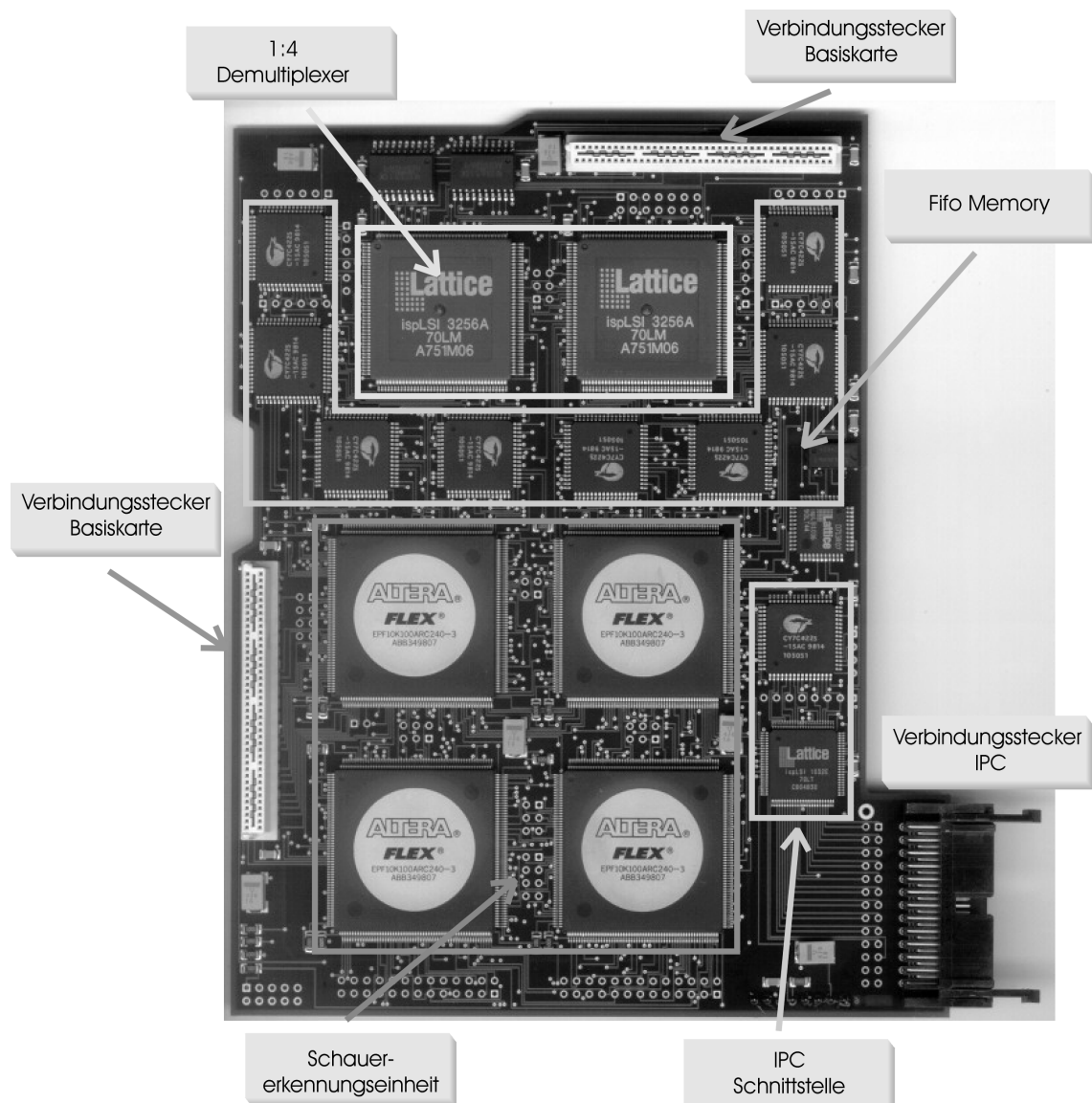


Abbildung 5.18: Die Erweiterungskarte. Die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen funktionalen Einheiten sind durch Rahmen zusammengefasst.

5.5 Das Link Module

5.5.1 Das Hardware-Konzept

Das Link Module (LM) ist eine zusätzliche 6U VME-Karte, die in das VME-Einschubsystem der Schauerdetektor-Elektronik eingesetzt wird. Zentrale Aufgabe des LMs ist die Kollektion der zu einem gemeinsamen Trigger gehörenden Analyseergebnisse (Hitpattern) der einzelnen IPCs und deren Übertragung zur Matching

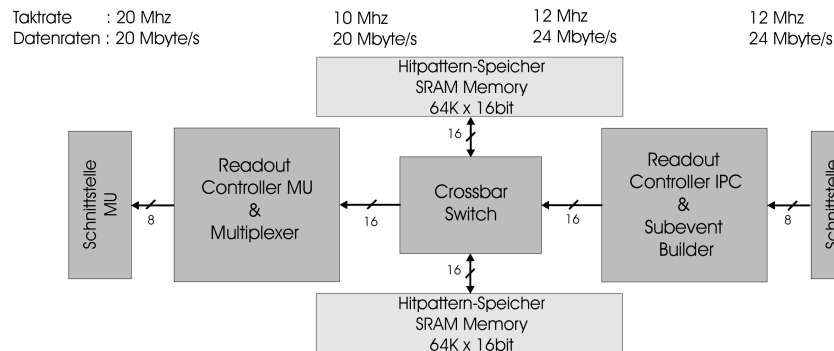


Abbildung 5.20: Funktionale Übersicht der Hitpattern-Speichereinheit. Außerdem sind die Takt- und Datenraten der einzelnen Stufen aufgeführt.

Abbildung 5.16) zur Verfügung. Dabei wird pro IPC nur ein Hitpattern-Subevent übertragen. Die Subevents der einzelnen IPCs werden vom Readout Controller zu einem gemeinsamen Subevent zusammengefaßt und zwischengespeichert. Zeitgleich werden redundante Informationen entfernt sowie die Korrektheit von Trigger-Tag und Status-Word in jedem erhaltenen Hitpattern-Subevent überprüft. Die Struktur des gemeinsamen Subevents ist in Abbildung 5.21 dargestellt.

Die Speicherung der 32 Bit breiten Datenworte erfolgt sequentiell an zwei im Adressraum aufeinanderfolgenden Speicherstellen. Nach Beendigung der Auslese erfolgt ein Umschalten der Speicherbänke und die vom Readout Controller IPC gespeicherten Daten werden vom Readout Controller MU zur MU-Schnittstelle weitergeleitet.

5.5.2.3 Schnittstelle zur Matching Unit

Die Hitpattern aller 12 Image Processing Cards werden über diese Schnittstelle zur Matching Unit übertragen. Die Schnittstelle umfaßt die folgenden Signale:

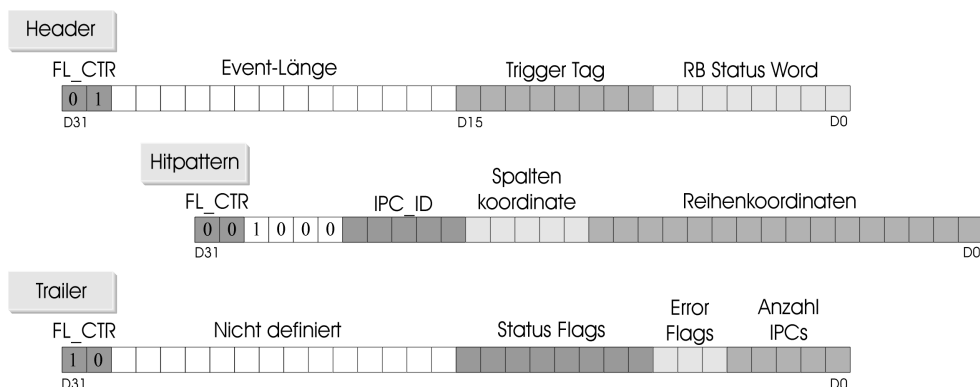


Abbildung 5.21: Struktur der Hitpattern-Subevents, die vom Link Module zur Matching Unit übertragen werden.

Adressierung:

AddressData (ADAT) : Adressleitung, die zur seriellen Adressierung des LMs verwendet wird. Das Datentransferprotokoll sieht vor, daß der Transferzyklus von der MU durch eine Adressierung des Link Modules initiiert wird. Da der MU keine Informationen über bereitstehende Events zur Verfügung stehen, erfolgt eine Adressierung, sobald die Matching Unit Daten empfangen bzw. verarbeiten kann. Der entsprechende Datentransfer findet statt, wenn das LM ein vollständiges Hitpattern-Subevent in der Speichereinheit zusammengestellt hat.

AddressValid (AVAL)* : Zeigt einen aktiven Adressierungszyklus an.

AddressStrobe (AS)* : Fallende Flanke zeigt die Gültigkeit der Daten auf der Adressleitung während einer aktiven Adressierung an.

Datenübertragung:

Data[7..0] : Datenleitungen zur Hitpattern-Übertragung

DataValid (DVAL)* : Zeigt einen aktiven Datenübertragungszyklus zwischen LM und MU an.

DataStrobe (DS)* : Fallende Flanke qualifiziert die Daten auf den Datenleitungen während einer aktiven Datenübertragung.

Die Übertragung der Signale erfolgt über verdrehte Doppelleitungen (28 AWG) mit einer Länge von 15 Metern und einer Übertragungsrate von 20 Mbit/s pro Doppelleitung.

Die nachfolgende Abbildung 5.22 zeigt das als 6U-VME-Einschubkarte realisierte Link Module.

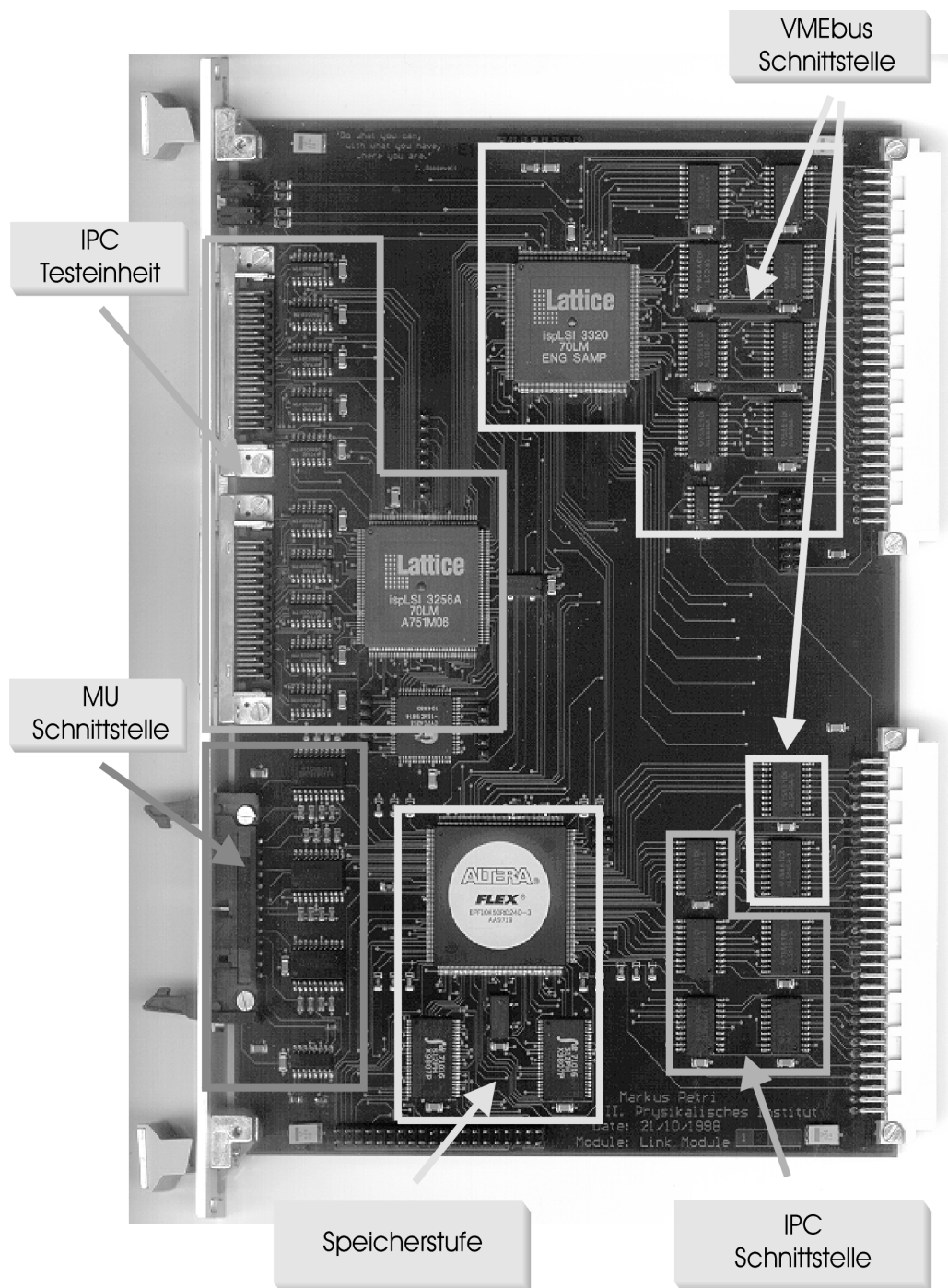


Abbildung 5.22: Das als 6U-VME-Karte realisierte Link Module. Die vorab beschriebenen funktionalen Einheiten und Schnittstellen sind durch Boxen zusammengefasst.

Im Rahmen der Entwicklung und Inbetriebnahme der Auslese- und Triggerelektronik für den HADES-Schauerdetektor erfolgten umfangreiche Tests im Labor sowie Tests unter realen experimentellen Bedingungen an der GSI Darmstadt, in denen neben der Auslese- und Triggerelektronik auch der Detektor selbst getestet wurde. Die in den Labortests bzw. während der Testexperimente erhaltenen Ergebnisse werden in diesem Kapitel zusammenfassend dargestellt.

6.1 Erste Tests mit Prototypen

Im Juli 1997 wurde an der GSI Darmstadt ein Testexperiment mit den ersten Prototypen der einzelnen Teildetektoren des Spektrometers durchgeführt. Bei TOF, MDC und SHOWER handelte es sich dabei um Prototypen mit endgültigen Abmaßen und der endgültigen Struktur der Originaldetektoren. Im Fall des RICH kam jedoch ein speziell für dieses Testexperiment entwickelter RICH-Detektor zum Einsatz¹. Die relative Anordnung der einzelnen Teildetektoren bzgl. der Strahlachse während des Testexperiments ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

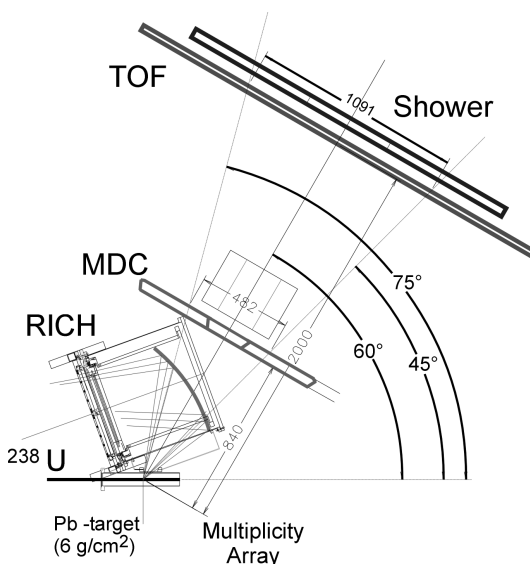


Abbildung 6.1: Relative Anordnung der einzelnen Teildetektoren während der Teststrahlzeit 1997.

1. Hierbei handelte es sich um einen quadratischen Prototypen des Photonendetektors (64 x 64 Pads) mit einem kastenförmigen Radiatorvolumen (40 cm Radiatorlänge). Das im Radiator erzeugte Cherenkov-Licht wurde über einen 1 mm dicken Glasspiegel auf den Photonendetektor fokussiert (siehe auch Abbildung 6.1)

Das Testexperiment selbst erfolgte mit dem Projektil-Target-System U+Pb bei einer Strahlenergie von 1 AGeV und einer maximalen Strahlintensität von 10^6 Teilchen/s. Die Target-Wechselwirkungslänge betrug 10 %. Die hierbei erzeugten Elektronen/Positronen stammen im wesentlichen aus Konversionsprozessen aus dem Zerfall des neutralen Pions ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$).

Die zentralen Ziele des Testexperiments für die einzelnen Teildetektoren bzw. für das Gesamtsystem waren:

- Die Untersuchung der Elektronennachweiseeffizienz der einzelnen Detektoren in einem Umfeld hoher hadronischer Multiplizität.
- Die funktionale Überprüfung der speziell für die Auslese der Detektoren entwickelten Elektronik in einem realen experimentellen Umfeld, d.h. unter Berücksichtigung aller potentiellen elektrischen Störquellen.
- Die funktionale Überprüfung des hierarchischen Triggerverteilungskonzepts bestehend aus einem zentralen Triggermodul (CTU) und einem lokalen Triggermodul (DTU) pro Teildetektor. Die Integration der Triggerdaten in den lokalen Datenstrom.
- Test einer gemeinsamen Datenaufnahme auf Basis von TCP-IP unter Einbeziehung der via Triggersystem verteilten Triggerdaten.

Eine schematische Darstellung der Struktur der Schauerdetektor-Elektronik zum Zeitpunkt der Teststrahlzeit zeigt Abbildung 6.2. Im Gegensatz zur heutigen Struktur, die in Kapitel 5 dargestellt wurde, erfolgte die Datenübertragung zwischen der Front-End-Elektronik, bestehend aus Front End Boards und Readout Boards, und der eigentlichen Ausleseelektronik (LVL1-Pipe) durch ein optisches Datenübertragungssystem. Hierdurch sollte eine strikte elektrische und räumliche Trennung zwischen Front-End- und Auslese-/Triggerelektronik gewährleistet bzw. ermöglicht werden. Technisch

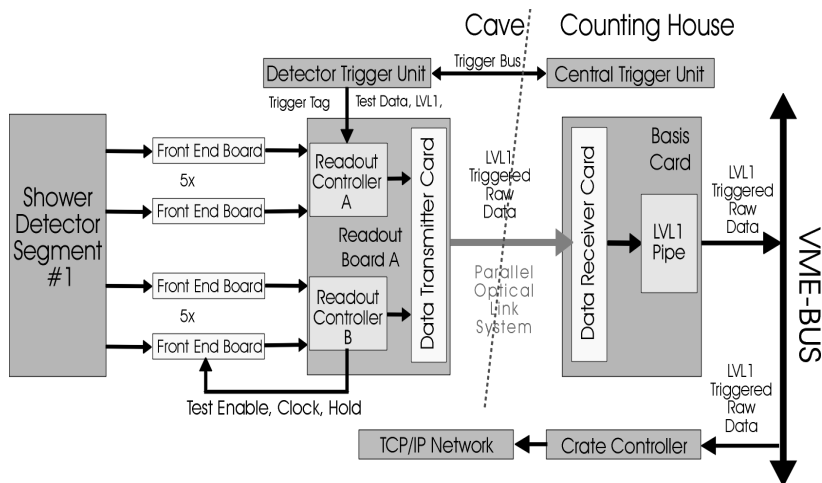


Abbildung 6.2: Schematische Darstellung der Schauerdetektorelektronik, die während der Teststrahlzeit 1997 verwendet wurde.

realisiert wurde die optische Datenübertragung durch zwei Aufsteckkarten (**Data Transmitter Card** und **Data Receiver Card**), die das optische Linksystem¹ sowie damit verbundene periphere Komponenten der Multiplexer/Demultiplexer- und Pegelwandlerstufen zur Verfügung stellten. Das System garantierte eine maximale Datenübertragungsrate von 1.6 GBit/s über eine Entfernung von 150 m.

Die im Experiment verwendeten Prototyp-Module der Front-End-Elektronik stellten bereits die in Kapitel 5.3 beschriebene Funktionalität zur Verfügung, so daß neben der eigentlichen Datennahme im RUN-Betrieb auch eine Überprüfung aller Datenpfade mit Hilfe von Testdaten im sogenannten TEST-Betrieb erfolgen konnte. In beiden Betriebsmodi wurden die via DTC und DRC übertragenen Datenpakete in einem einstufigen Zwischenspeicher (LVL1-Pipe) zur Auslese durch den lokalen Crate Controller abgelegt. Die abschließende Datenübertragung zum zentralen Event-Builder erfolgte via TCP/IP.

6.1.1 Ergebnisse des Prototypentests

Sowohl der Schauerdetektor als auch die einzelnen Komponenten der Front-End- und Ausleseelektronik konnten unter realen experimentellen Bedingung mit einer maximalen LVL1-Triggerrate von 2 kHz erfolgreich getestet werden. Limitiert wurde die LVL1-Triggerrate ausschließlich durch die beschränkte Bandbreite des VMEbus-Systems bei der Auslese der LVL1-Pipe. Die Takt- und Datenübertragungsraten der einzelnen Module von Trigger- und Ausleseelektronik waren jedoch auf die angestrebte LVL1-Triggerrate von 100 kHz ausgerichtet.

Die Funktionsweise des Schauerdetektors in einem hadronischen Umfeld konnte durch die Offline-Analyse der TOF- und SHOWER-Daten verifiziert werden. Abbildung 6.3 zeigt die gemittelten Werte für den Ladungsunterschied zwischen Preshower- und

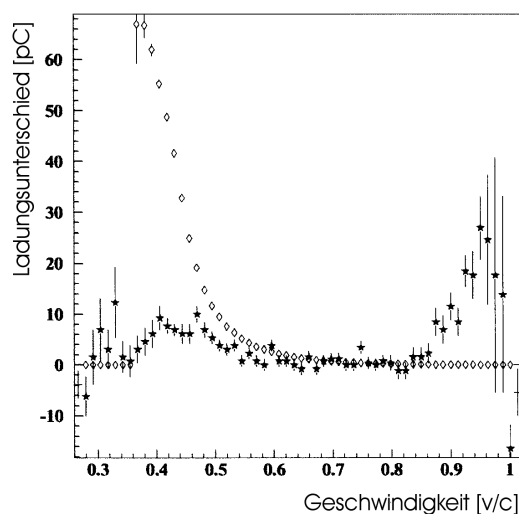


Abbildung 6.3: Ladungsunterschied zwischen Preshower- und Postshower-I-Detektor als Funktion der Teilchengeschwindigkeit. Die Rauten zeigen den erwarteten Ladungsunterschied gemäß Bethe-Bloch für Drahtkammern im Proportionalmodus.

1. Motorola PC94DL0150SY, OPTOBUS-I Optical Link System (10bit breiter optischer Transceiver)

Postshower-I-Detektor als Funktion der Teilchengeschwindigkeit $\beta=v/c$. Die im Experiment erzeugten Elektronen ($\beta \approx 1$) erzeugen im Bleikonverter elektromagnetische Schauer, die sich auf Grund des SQS-Modus der Drahtkammern in einem Ladungszuwachs in der Postshower-I-Drahtkammer manifestieren. Für alle anderen Teilchen ($\beta < 1$) wird in beiden Drahtkammern eine nahezu identische Ladung nachgewiesen. Ein hiervon abweichendes Verhalten zeigt sich jedoch für sehr langsame Protonen ($\beta < 0.4$), die im Bleikonverter stark abgebremst werden. Hier zeigt sich eine erhöhte Ladung im Postshower-I-Detektor, die durch eine Koexistenz von Proportional- und Streamer-Modus erklärt werden kann (siehe Kapitel 2.5). Die im Postshower-I-Detektor nachgewiesene Ladung ist jedoch deutlich geringer, als dies nach Bethe-Bloch in einer Drahtkammer im vollständigen Proportionalmodus zu erwarten wäre.

6.1.2 Systemoptimierung und Weiterentwicklung

Basierend auf den Erfahrungen der Teststrahlzeit 1997 erfolgte die Weiterentwicklung bzw. Optimierung der Schauerdetektorelektronik. Ein wichtiges Ziel war dabei die Steigerung der Übertragungsrates des optischen Datenübertragungssystems, um somit die Anzahl der notwendigen Systeme pro Detektorsegment zu reduzieren. Dieses Ziel konnte durch die Entwicklung des H-Link-Systems, einem flexiblen Datenübertragungssystem für alle Teildetektoren des Spektrometers, erreicht werden (siehe Abbildung 6.4). Das als Aufsteckkarte realisierte System besteht aus einem

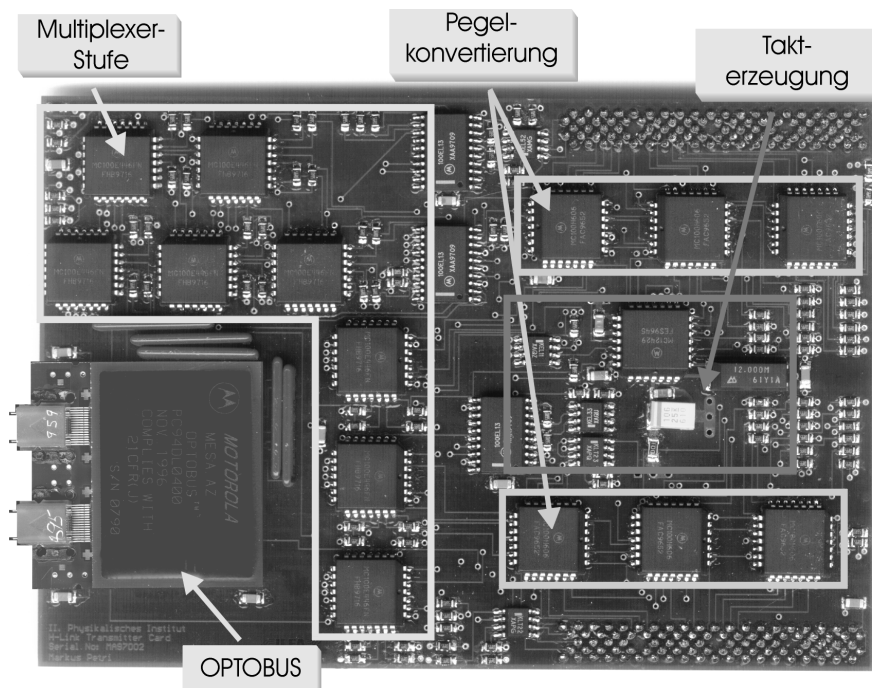


Abbildung 6.4: Das als Aufsteckkarte (138 mm x 92 mm) realisierte H-Link-System (Transmitter). Funktionale Einheiten sind durch Rahmen zusammengefasst.

optischen Link-System¹ sowie den notwendigen peripheren Einheiten (Multiplexer/Demultiplexerstufe, Pegelkonvertierung) und erlaubt eine maximale Datenübertragungsrate von 3.8 GBit/s über eine Entfernung von 300 m.

Die durch die Firma Motorola im Februar 1998 mitgeteilte Abkündigung des OPTOBUS-Produkts und der Mangel an äquivalentem Ersatz erzwangen jedoch die Einstellung aller H-Link-Aktivitäten und die Entwicklung eines neuen auf konventioneller Technologie basierenden Datenübertragungskonzepts für den Datentransfer zwischen Front-End- und Auslese-/Triggerelektronik. Auf konzeptioneller Seite erforderte dies zunächst eine Verlegung der gesamten LVL1/LVL2-Elektronik aus dem HADES-Counting House in das HADES-Cave, um die Datenübertragungstrecken zu minimieren. Darüber hinaus mußten Teile der bereits entwickelten Front-End-Elektronik modifiziert werden.

Das in diesem Zusammenhang neu entwickelte Konzept für die Trigger- und Ausleseelektronik des HADES-Schauerdetektors ist in Kapitel 5 dargestellt.

6.2 Erste Labortests mit dem Gesamtsystem

Im Rahmen der Entwicklung und Inbetriebnahme der vollständigen Trigger- und Ausleseelektronik wurden umfangreiche Einzel- sowie Systemtests im Labor durchgeführt.

Diese umfaßten zunächst die Programmierung und Überprüfung der einzelnen funktionalen Einheiten der diversen Module. Hierfür wurden aufwendige Testprogramme bzw. Testverfahren entwickelt, die eine Überprüfung der einzelnen Datenpfade und der Datenverarbeitung in den funktionalen Einheiten der Module mit Hilfe von Testdaten ermöglichen. In der nächsten Stufe der Inbetriebnahme erfolgte die Programmierung der verschiedenen Schnittstellen von IPC und LM und die Verifikation der Schnittstellen bzw. der Datenübertragung in bilateralen Tests. Die in diesen Tests

Schnittstellen- bezeichnung	Datenrate [Mbyte/s] (erforderlich)	Datenrate [Mbyte/s] (Testergebnis)
Readout Board -> Image Processing Card	90	157,5
Detector Trigger Unit -> Image Processing Card	0,2	10
Image Processing Card -> Image Processing Card	20	30
Image Processing Card -> Link Module	17	20
Image Processing Card -> VMEbus	6	17
Link Module -> Matching Unit	17	20

Tabelle 6.1: Auflistung der erforderlichen bzw. der in den Labortests ermittelten Datenraten für die einzelnen Schnittstellen.

1. Motorola PC94DL0400SY, OPTOBUS-II Optical Link System (10bit breiter optischer Transceiver)

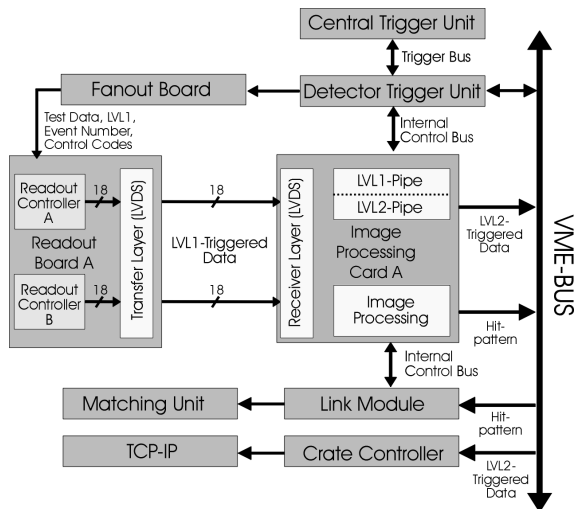


Abbildung 6.5: Schematische Darstellung der Laborkonfiguration der Schauerdetektor Trigger- und Ausleseelektronik

erreichten Datenraten sind in Tabelle 6.1 zusammen mit den erforderlichen Datenraten gezeigt.

In den abschließenden Labortests zur Systemintegration wurde die in Abbildung 6.5 dargestellte Minimalkonfiguration der Trigger- und Ausleseelektronik des Schauerdetektors aufgebaut. Das System umfaßte ein RB ohne FEBs zur Erzeugung der Testdaten, ein vollständiges System zur Triggerdistribution bestehend aus CTU, DTU und FB sowie die notwendigen Module zur Datenauslese und -analyse (IPC, LM und MU). Die Tests erfolgten sowohl im Betriebsmodus RUN als auch TEST (siehe auch Kapitel 5.3.2).

TEST-Modus:

In diesem Betriebsmodus werden per Software erzeugte Testdaten via DTU und FB in die Datenspeicher des RBs geschrieben. Ein nachfolgender LVL1-Trigger startet die Datenübertragung der gespeicherten Daten zur IPC. Diese speichert und analysiert die erhaltenen Daten in den entsprechenden funktionalen Einheiten (siehe Abbildung 5.8). Die Ergebnisse der Datenanalyse werden via LM zur MU übertragen, die auf Grund der übermittelten Daten eine LVL2-Triggerentscheidung erzeugt und mittels Triggerverteilungssystem (CTU/DTU/FB) an die IPC übermittelt.

Die Datenverarbeitung in der Speichereinheit (LVL1/LVL2-Pipe) der IPC erfolgt in Abhängigkeit dieser LVL2-Triggerentscheidung. Daten, die in die LVL2-Pipe gelangen, werden vom Crate Controller ausgelesen und überprüft. Die Datenübertragung zum zentralen Event-Builder erfolgt via TCP-IP.

Dieser Modus erlaubt die Verifikation aller funktionalen Einheiten des Auslese- und Triggersystems bei niedrigen LVL1-Triggerraten. Die Limitierung der Triggerrate wird dabei ausschließlich durch die Übertragung der Testdaten zum RB via DTU und FB hervorgerufen.

Das Gesamtsystem wurde in diesem Modus mit variablen Daten bei einer LVL1-Triggerrate von ca. 1 kHz im Dauerbetrieb erfolgreich getestet.

RUN-Modus:

In diesem Betriebsmodus erfolgt die Verarbeitung der analogen FEB-Ausgangssignale (Pulshöheninformation bzw. Testladung) durch das RB. Ein eingehender LVL1-Trigger startet die Datenverarbeitung und erzeugt Datenpakete mit der in Abbildung 5.6 dargestellten Struktur. Bedingt durch die Verwendung des RBs ohne entsprechende Signalquellen besitzen die erzeugten Datenpakete keine definierbaren Padinformationen. Header- und Trailerinformation der Pakete sind jedoch korrekt.

Die Verarbeitung der Datenpakete durch das Auslesesystem erfolgt analog zur Verarbeitung im TEST-Modus. Zur Überprüfung der Datenverarbeitung im Analysesystem werden die erhaltenen Daten mit Hilfe der LUTs in der Datenvorverarbeitungseinheit manipuliert. Hierdurch wird ein Datenpaket mit den erhaltenen Header- und Trailerinformationen aber definierten bzw. fixierten Ladungswerten erzeugt. Die weitere Datenverarbeitung in der Analysestufe erfolgt analog zur Verarbeitung im TEST-Modus.

Der RUN-Modus erlaubt somit die Verifikation aller funktionalen Einheiten des Auslese- und Triggersystems mit hohen LVL1-Triggerraten. Die Überprüfung der Analyseeinheit, d.h. der eigentlichen Schauererkennung, erfolgt jedoch mit einem festen Datenmuster, so daß alle nachfolgenden Verarbeitungseinheiten bzw. Module (LM und MU) Subevents mit fester Länge und Inhalt (Hitpattern) erhalten. Header bzw. Trailerinformation der Subevents werden jedoch durch die aktuellen Triggerdaten bestimmt.

Das Laborsystem der Trigger- und Ausleseelektronik konnte in diesem Modus mit einer maximalen LVL1-Triggerate von 200 kHz bei einer festen LVL2-Untersetzung bzw. einem stochastisch verteilten LVL2-Trigger dauerhaft getestet werden.

6.3 Testexperiment mit dem Gesamtsystem

Im Anschluß an die erfolgreichen Labortests erfolgte im Mai/Juni 2000 ein Test der Trigger- und Ausleseelektronik kombiniert mit einer HADES-Teststrahlzeit. Den experimentellen Aufbau während dieser Teststrahlzeit zeigt Abbildung 6.6. Die wesentlichen Testziele bzgl. der Trigger- und Ausleseelektronik waren dabei:

- Funktionale Überprüfung der im Labor getesteten Minimalkonfiguration mit realen Detektordaten, d.h. mit ereignisweise variierenden Daten.
- Integration der Minimalkonfiguration in das Trigger- und Auslesesystem von HADES, d.h. ATM-basierte Datenaufnahme und Bestimmung der LVL2-Triggerentscheidung auf Basis der Hitpattern von RICH- und SHOWER-IPU.
- Erweiterung des Auslese- und Triggersystems auf zwei vollständige Schauerdetektor-Segmente, d.h. vier RBs sowie vier IPCs.

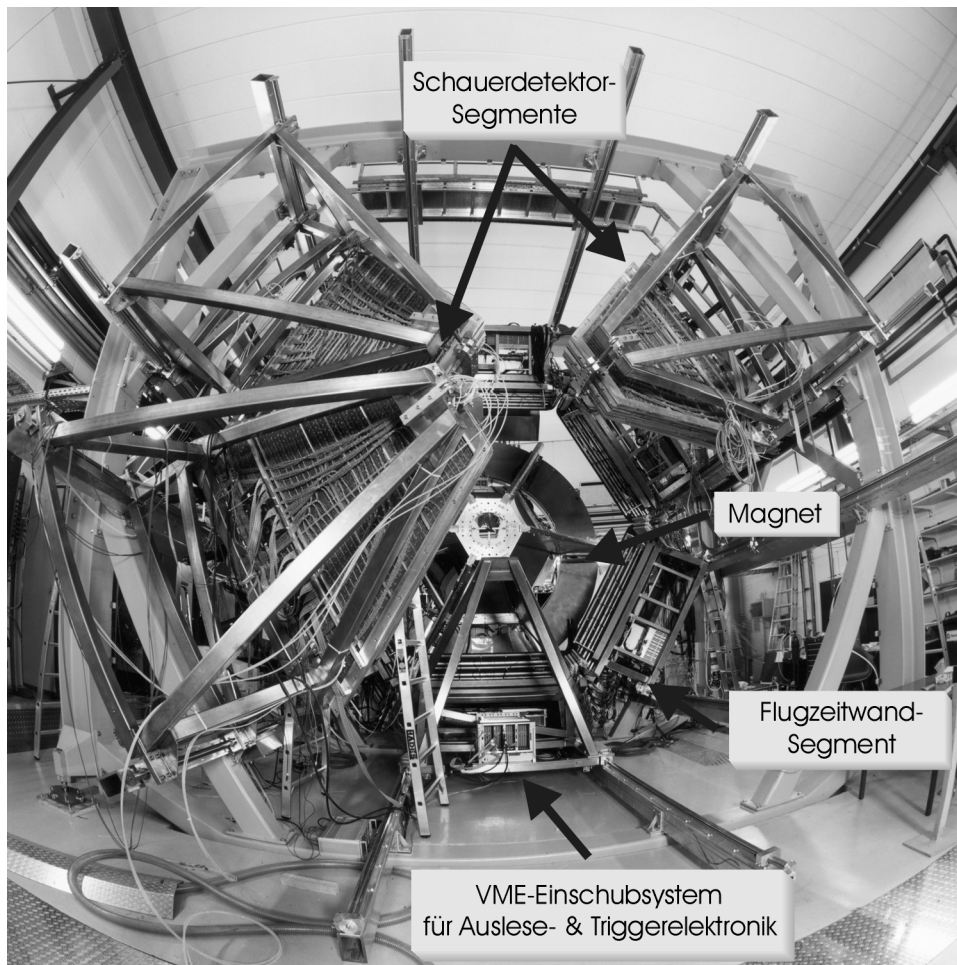


Abbildung 6.6: Experimenteller Aufbau während der Teststrahlzeit 2000: Im Vordergrund sichtbar drei Segmente des Schauerdetektors sowie das VME-Einschubsystem für die gesamte Trigger- und Ausleseelektronik des Detektors.

Auf Grund der experimentellen Rahmenbedingung erfolgte die vollständige Umsetzung der obenstehenden Ziele zunächst nur für die Auslesefunktionalität der Schauerdetektor-Elektronik. Sowohl die Minimalkonfiguration als auch das System zur Auslese von zwei Schauerdetektor-Segmenten konnten im Rahmen des Testexperiments mit einer maximalen LVL1-Triggerrate von 100 kHz erfolgreich getestet werden. Die für die Überprüfung der Auslesefunktionalität notwendige LVL2-Triggerentscheidung wurde dabei als einfache 1:N-Untersetzung von der MU gefällt. Hierfür notwendige Triggerdaten wurden von der SHOWER-IPU bereitgestellt. Um dies zu gewährleisten, wurde eine der IPCs vom LM ausgelesen. Die Hitpattern der anderen IPCs blieben dabei unberücksichtigt.

6.4 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde die Entwicklung und Inbetriebnahme eines kombinierten Auslese- und Echtzeit-Triggersystems für den HADES-Schauerdetektor vorgestellt. Das System erlaubt die Auslese und Analyse der ca. 18000 Kanäle des Detektors mit der für das Gesamtsystem vorgegebenen maximalen Ereignisrate von 100 kHz. Integriert in das Triggersystem des HADES-Spektrometers ermöglicht es die Selektion von Elektron-/Positronkandidaten mit hoher Effizienz.

Die weiteren Schritte bestehen in der Herstellung und Inbetriebnahme der Karten für den gesamten Schauerdetektor, so daß im November 2000 erste Experimente mit vollständigem Aufbau erfolgen können. Obwohl die Entwicklung und Optimierung der Hardware bereits weitgehend abgeschlossen ist, erlaubt die im großen Umfang bei der technischen Realisierung verwendete programmierbare Logik, sinnvolle Modifikationen und Verbesserungen auch zu einem späteren Zeitpunkt vorzunehmen.

In diesem Zusammenhang ist vor allem das Analyseverfahren zur Hardware-Schauererkennung zu nennen, das auf Basis von Simulationsdaten entwickelt und optimiert wurde. Eine Anpassung bzw. Optimierung des Analyseverfahrens an die experimentellen Daten einer Schwerionenkollision ist im Rahmen der zur Verfügung stehenden Hardware bzw. Logik-Ressourcen jedoch möglich. Darüber hinaus ist eine Anpassung des Analyseverfahrens an pion- bzw. protoninduzierte Reaktionen denkbar. Auf Grund der niedrigen Multiplizitäten in diesen Reaktionen ist hier eine Optimierung der Nachweiseffizienz bei gleichzeitiger Akzeptanz einer Erhöhung der Fehlidentifikationsrate möglich.

Auf Grund von Alterungseffekten in den Drahtkammern und damit verbundener Instabilität könnte ein Betrieb des Schauerdetektors außerhalb des SQS-Modus, d.h. im Proportional-Modus unumgänglich sein. Alternativ kann der Algorithmus nun auf eine einfache Multiplizitätsmessung in den drei Ebenen des Detektors reduziert werden. Aber auch ein Energieverlust-Trigger (dE/dx -Trigger) zur Teilchenidentifizierung ist in diesem Betriebsmodus denkbar und mit der vorhandenen Triggerelektronik zu realisieren.

Die Kombination des HADES-Spektrometers mit einem Kalorimeter (z. B. TAPS) zur Untersuchung des ω -Übergangsformfaktors (siehe Kapitel 1.3) erfordert ein Auslese- und Echtzeit-Triggersystem für diesen Teildetektor. Eine Verwendung des Schauerdetektor Auslese- und Triggersystems erscheint ohne Modifikationen der Hardware möglich, wenn die Daten der Vetodetektoren als Preshower-Daten und die Daten der BaF₂-Detektoren als Postshower-I/II-Daten aufgefaßt werden. Die notwendige Anpassung der Triggereinheit erfolgt dabei via Software durch entsprechende Konfiguration-Files für die FPGAs.

Weitere sinnvolle Modifikationen bestehen in der Implementierung zusätzlicher bzw. alternativer Statusinformationen zur besseren funktionalen Überwachung des Systems via Slow-Control.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Feynman-Graphen zur elektromagnetischen Wechselwirkung	2
Abbildung 1.2: Qualitatives Verhalten des Pionenformfaktors	3
Abbildung 1.3: Feynman-Graphen zur Hadron-Photon-Wechselwirkung	3
Abbildung 1.4: Meßpunkte zum Pionenformfaktor (raumartig und zeitartig)	4
Abbildung 1.5: Feynman-Graph zum Zerfall eines neutralen Mesons in e^+e^-	5
Abbildung 1.6: Übergangsformfaktor für den $\omega \pi^0$ -Vertex	5
Abbildung 1.7: Das Dileptonenspektrometer am BEVALAC	6
Abbildung 1.8: DLS-Dileptonenspektren für Ca+Ca und C+C bei 1 AGeV	7
Abbildung 1.9: CERES-Dileptonenspektrum für Pb+Au bei 158 AGeV	9
Abbildung 1.10: Chirales Kondensat als Funktion von Temperatur und Dichte	9
Abbildung 1.11: 3D-Ansicht des HADES-Spektrometers	10
Abbildung 1.12: Schematische Darstellung der rückstoßfreien ω -Produktion	11
Abbildung 2.1: Querschnitt durch das HADES-Spektrometer	16
Abbildung 2.2: Simuliertes HADES-Dileptonenspektrum für Au+Au bei 1 AGeV	17
Abbildung 2.3: Querschnitt durch den HADES-RICH	19
Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der HADES-Minidriftkammern	20
Abbildung 2.5: Darstellung der Teilchenflugzeiten	21
Abbildung 2.6: Querschnitt durch den HADES-Schauerdetektor	22
Abbildung 2.7: Ladungsentwicklung in einer Drahtkammer	23
Abbildung 2.8: Illustration einer Streamerentladung in einer Drahtkammer	23
Abbildung 2.9: Ergebnisse mit einem Prototypen des HADES-Schauerdetektors	27
Abbildung 3.1: Schematische Übersicht des HADES-Trigger- und Auslesesystems	30
Abbildung 3.2: Multiplizitätsverteilung in der TOF für Au+Au bei 1 AGeV	31
Abbildung 3.3: Funktionsweise LVL3-Trigger	34
Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des HADES-Triggerverteilungssystems	38
Abbildung 3.5: Schematische Darstellung eines Triggerbuszyklus	39
Abbildung 4.1: Effizienz und Fehlidentifikationsrate Schauererkennung	45
Abbildung 4.2: Effizienz Schauererkennung vs. Leptonenimpuls	45
Abbildung 4.3: Struktur eines Altera-FPGAs	47
Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des Trigger- und Auslesesystems für den HADES-Schauerdetektor	50

Abbildung 5.2: Timing Diagramm für den Datentransfer zwischen Fanout Board und Front-End-Elektronik	52
Abbildung 5.3: Blockschaltbild HADNE-Chip	53
Abbildung 5.4: Übertragungscharakteristik HADNE-Chip	53
Abbildung 5.5: Blockschaltbild des Readout Boards	55
Abbildung 5.6: Struktur der Datenpakete des Readout Boards	56
Abbildung 5.7: Timing Diagramm für den Datentransfer zwischen Readout Board und Image Processing Unit.	57
Abbildung 5.8: Funktionale Übersicht der Image Processing Card	58
Abbildung 5.9: Blockschaltbild der Datenvorverarbeitungseinheit	59
Abbildung 5.10: Blockschaltbild der Speichereinheit	60
Abbildung 5.11: Struktur der Datenworte in der LVL2-Pipe	61
Abbildung 5.12: Datenformat der LVL2-Pipe	62
Abbildung 5.13: Timing Diagramm für den Datentransfer zwischen Detector Trigger Unit und Image Processing Card	63
Abbildung 5.14: Timing Diagramm für den Datentransfer zwischen Image Processing Unit und Link Module	64
Abbildung 5.15: Blockschaltbild der Analyseeinheit.	66
Abbildung 5.16: Struktur eines Hitpattern-Subevents	67
Abbildung 5.17: Die Image Processing Card als 6U VME-Karte	70
Abbildung 5.18: Die Erweiterungskarte zur Image Processing Card.	71
Abbildung 5.19: Funktionale Übersicht Link Module	72
Abbildung 5.20: Blockschaltbild der Hitpattern-Speichereinheit	73
Abbildung 5.21: Struktur der Datenpakete für die Matching Unit.	73
Abbildung 5.22: Das Link Module als 6U VME-Karte	75
Abbildung 6.1: Experimenteller Aufbau Teststrahlzeit 1997.	77
Abbildung 6.2: Schematische Darstellung der Schauerelektronik (Teststrahlzeit)	78
Abbildung 6.3: Ladungsunterschied zwischen Preshower und Postshower-I	79
Abbildung 6.4: Das H-Link-System	80
Abbildung 6.5: Schematische Darstellung der Schauerelektronik (Labor)	82
Abbildung 6.4: Experimenteller Aufbau Teststrahlzeit 2000.	84

Glossar

ADC	(A nalog- D igital- C onverter): Integrierter Schaltkreis bzw. Schaltkreis zur Konvertierung analoger Signale in digitale Daten.
ASIC	(A pplication S pecific I ntegrated C ircuit): Für eine spezielle Anwendung produzierter Integrierter Schaltkreis.
ATM	(A synchronous T ransfer M ode): Netzwerkprotokoll, das sowohl verbindungs- als auch paketorientiert ist.
CPLD	(C omplex P rogrammable L ogic D evice): Logikbausteine, die bis zu 1000 programmierbare Makrozellen besitzen. Jede einzelne Makrozelle besteht aus einem zweistufigen UND-ODER-Array mit konfigurierbaren Ausgangszellen. Die Verschaltung der einzelnen Makrozellen erfolgt über eine programmierbare Schaltmatrix.
CTU	(C entral T rigger U nit): Im Rahmen des HADES-Trigger-Projektes entwickelte 6U VME-Karte, die die Trigger der ersten und zweiten Stufe unter Beachtung von Totzeiten und Busy-Zuständen in Befehle auf dem Triggerbus umsetzt.
DTU	(D etector T rigger U nit): Im Rahmen des HADES-Trigger-Projektes entwickelte 6U VME-Karte, die die Schnittstelle zwischen dem Triggerbus und der lokalen Ausleseelektronik bereitstellt.
FB	(F anout B oard): Im Rahmen des HADES-Trigger-Projektes entwickelte 6U VME-Karte, die eine Verteilung der DTU-Signale in die einzelnen Segmente des Schauerdetektors ermöglicht.
FEB	(F ront E nd B oard): Im Rahmen des HADES-Projektes entwickelte Platine zur Verarbeitung der analogen Ladungssignale im Schauerdetektor.
FIFO	(F irst- I n- F irst- O ut): Bei diesem Speicherbaustein wird das zuerst eingelesene Datenwort wie bei einem Schieberegister auch wieder zuerst ausgelesen. Im Unterschied zum Schieberegister können jedoch die Schreib- und Lesezugriffe asynchron erfolgen.

- FPGA** (**F**ield **P**rogrammable **G**ate **A**rray): Logikbausteine, die in einer matrix-ähnlichen Struktur eine große Anzahl von konfigurierbaren Logikblöcken besitzen. Die einzelnen Logikblöcke bestehen aus einer LUT, die die Implementierung kombinatorischer Logikfunktionen mit wenigen Eingangssignalen erlaubt und einer Registerstufe, die eine Signal-speicherung im Logikblock ermöglicht. Die Verschaltung der einzelnen Logikblöcke erfolgt in Abhängigkeit der implementierten Funktionalität über programmierbare Verdrahtungsressourcen.
- FRS** (**F**ragmentseparator): Experimentelle Anlage der GSI zur Ausblendung isoto-penreiner Sekundärstrahlen.
- GSI** (**G**esellschaft für **S**chwerionen**f**orschung): Großforschungseinrichtung zur Schwerionen**f**orschung nördlich von Darmstadt (Hessen).
- IPC** (**I**mage **P**rocessing **C**ard): Im Rahmen des HADES-Trigger-Projekts entwickelte 6U VME-Karte, die Trigger- und Auslesefunktionen für den Schauerdetektor bereitstellt.
- IPU** (**I**mage **P**rocessing **U**nit): Bezeichnung für die Triggerprozessoren der zweiten Triggerstufe des HADES-Trigger-systems.
- LM** (**L**ink **M**odule): Im Rahmen des HADES-Trigger-Projektes entwickelte 6U VME-Karte, die die Übertragung der Hitpattern zwischen den einzelnen Modulen der Schauerdetektor IPU und der MU gewährleistet.
- LUT** (**L**ook-**U**p-**T**able): Datenspeicher mit wahlfreiem Zugriff (Random Access Memory), der für die Transformation von Datenworten verwendet wird. Hierfür wird im Datenspeicher eine Transformationstabelle abgelegt. Die eigentliche Transformation erfolgt durch einen Lesezugriff auf den Datenspeicher, bei dem das zu transformierende Datenwort die Adresse bildet.
- LVDS** (**L**ow **V**oltage **D**ifferential **S**ignaling): ANSI/TIA/EIA/IEEE-Standard zur schnellen, stör-sicheren elektrischen Datenübertragung über kurze Entfernungen (max. 10 m).
- LVL1** (**L**evel **1**): Kennzeichnet alle Elemente der ersten Stufe des HADES-Trigger- und Auslesesystems.
- LVL2** (**L**evel **2**): Kennzeichnet alle Elemente der zweiten Stufe des HADES-Trigger- und Auslesesystems.

LVL3	(Level 3): Kennzeichnet alle Elemente der dritten Stufe des HADES-Triggersystems.
MTU	(Multiplicity Trigger Unit): Im Rahmen des HADES-Trigger-Projektes entwickeltes Modul zur Erzeugung des LVL1-Triggers.
MU	(Matching Unit): Im Rahmen des HADES-Trigger-Projektes entwickelte 6U VME-Karte, die aus den Leptonensignaturen der einzelnen IPU's Dileptonenpaare mit einer definierten invarianten Masse selektiert.
PLD	(Programmable Logic Device): Überbegriff für integrierte Schaltkreise, deren eigentliche Funktionsweise durch Programmierung bzw. Konfiguration vom Anwender bestimmt wird. Zur Familie der PLDs gehören: PALs, GALs, CPLDs, FPGAs, EPLDs, LCAs
RB	(Readout Board): Im Rahmen des HADES-Projektes entwickelte Platine zur Digitalisierung der Ladungsinformation im Schauerdetektor.
SIS	(Schwerionen-Synchrotron): Zweite Stufe der Beschleunigeranlage der GSI.
TDC	(Time-Digital-Converter): Integrierter Schaltkreis bzw. Schaltkreis zur Digitalisierung eines Zeitintervalls.
TTL	(Transistor-Transistor-Logik): Eine der wichtigsten Bipolar-Schaltungsfamilien in den 80er Jahren.
RS485	(Recommended Standard 485): Schnittstellen Spezifikation zur schnellen und störstabilen elektrischen Datenübertragung über große Entfernungen (max. 500 m, ISO-Norm 8482) unter Verwendung von Differenzempfängern und -sendern.
SRAM	(Static Random Access Memory): Integrierte Schaltkreise, die binäre Informationen in einer aus Flipflops aufgebauten Speichermatrix speichern.
VHDL	(VHSIC Hardware Description Language): Eine während des Very High Speed Integrated Circuit Programms, das Anfang der 80er Jahre vom amerikanischen Department of Defense initiiert wurde, entwickelte Hochsprache zur Beschreibung bzw. Dokumentation von integrierten Schaltkreisen. Die Verwendung von VHDL um logische Schaltung aus der Hochsprache selbst zu extrahieren, erfolgte erst in den 90er Jahren.
VME	(Versa Module Eurocard): Ein im Jahre 1981 von den Firmen Motorola, Mostek und Signetics definierten Interface Standard für die Verbindung

von verschiedenen, datenverarbeitenden Modulen über ein gemeinsames, mikroprozessorunabhängiges Bussystem mit asynchronem Protokoll. Der Standard umfaßt neben dem eigentlichen Busprotokoll auch mechanische Spezifikationen.

Literaturverzeichnis

- [Ale80] G. D. Alekseev et al.: Investigation of Self-Quenching Streamer Discharge in a Wire Chamber, Nucl. Inst. Meth. 177 (1980) 385
- [Alt96] Altera: Data Book, (1996)
- [Ang98] A. L. S. Angelis et al.: CERN-PE/98-082
- [Ata82] M. Atac, A. V. Tollestrup: Self-Quenching Streamers, Nucl. Inst. Meth. 200 (1982) 345
- [Bau84] R. Baumgart et al.: Properties of Streamers in Streamer Tubes, Nucl. Inst. Meth. 222 (1984) 448
- [Ber94] F. D. Berg et al: Phys. Rev. Lett. 72 (1994) 977
- [Bla92] Th. Blaich et al.: A large Area Detector for high-energy Neutrons, Nucl. Inst. Meth. A314 (1992) 136
- [Bet30] H. A. Bethe: Ann. d .Phys. 5, (1930)
- [Bra99] E. L. Bratkovskaya, C. M. Ko: Low-mass Dileptons and dropping Rho Meson Mass, Phys. Lett. B445 (1999) 265
- [Bro91] G. E. Brown, M Rho: Phys. Lett. 66 (1991) 2720
- [Bus78] Y. B. Bushnin et al.: Phys. Lett. 79B (1978) 147
- [Cas98] W. Cassing et al.: Probing the ρ -spectral function in hot dense matter by dileptons, Phys. Rev. C57 (1998) 916
- [Eri88] T. Ericson und W. Weise: Pions and Nuclei, Oxford Science Publications (1988) 3
- [Gab98] C. Garabatos et al.: Optimization of Low-mass Drift Chambers for HADES, Nucl. Inst. Meth. A412 (1998) 38

- [Gar93] K. Garrow: HADES Simulation of TOF and SHOWER, (1993)
- [Gas82] J. Gasser: Phys. Rep. 87 (1982) 77
- [Ger96] R. Gernhäuser et al.: Photon Detector Performance and Radiator Scintillation in the HADES-RICH, Nucl. Inst. Meth. A371 (1996) 300
- [Had94] HADES-Kollaboration: Proposal for a High-Acceptance Di-Elektron Spectrometer, (1994)
- [Had98] HADES-Kollaboration: Detector Commissioning and Acceptance Studies for HADES, (1998)
- [Hae95] E. Häfele: Untersuchung der Produktion geladener Pionen im System Au+Au bei 1 AGeV, Doktorarbeit, Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg, (1995)
- [Hat92] Hatsuda et al.: Phys. Rev. C42 (1992) 34
- [Kli97] F. Klingl et al.: Current correlation functions, QCD sum rules and vector mesons in baryonic matter, Nucl. Phys. A 624 (1997) 527
- [Koe99] W. Koenig: Persönliche Mitteilung
- [Lan02] Landolt Börnstein, New Series Vol. 2
- [Lan85] L. G. Landsberg, Phys. Rep. 128 (1985) 301
- [Leh99] J. Lehnert et al.: Ring Recognition in the HADES second-level Trigger, Nucl. Inst. Meth. A433 (1999) 268
- [Leh00] J. Lehnert: Echtzeit-Mustererkennung zum Elektronennachweis mit einem RICH-Detektor in relativistischen Schwerionenkollisionen, Doktorarbeit, Justus-Liebig-Universität, Gießen, (2000)
- [Len98] B. Lenkeit: Elektron-Positron-Paar Emission in Pb-Au-Kollisionen bei 158 AGeV, Doktorarbeit, Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg, (1998)
- [Mue99] M. Muench: A new ATM-based Data Acquisition System for the HADES-Spektrometer, Proceedings of the XXXVII International Winter Meeting on Nuclear Physics, Bormio (1999)
- [Nam61] Y. Nambu, G. Jona-Lasinio: Phys. Rev. 122 (1961) 345

-
- [Nov91] R. Novotny et al.: The BaF₂ Spectrometer TAPS, IEEE Trans. on Nucl. Science A262 (1991) 38
- [Pet93] W. D. Peterson: The VMEbus Handbook, VITA VFEA International Trade Association (1993)
- [Por97] R. Porter et al.: Dielectron Cross Section Measurement in Nucleus-Nucleus Reaktios at 1 AGeV, Phys. Lett. 79 (1997) 1229
- [Rap99] R. Rapp, J. Wambach: Chiral Symmetry Restauration and Dileptons in relativistic Heavy-ion Collisions, hep-ph/9909229
- [Sak69] J. J. Skurai: Currents and Mesons, The University of Chicago Press (1969)
- [Sal95] P. Salabura et al.: HADES - A high Acceptance Di-Electron Spectrometer, Nucl. Phys. B44 (1995) 701
- [Sal98] P. Salabura et al.: Development of a fast Pad Readout System for the HADES Shower Detector, Nucl. Inst. Meth. A417 (1998) 360
- [Sch94] O. Schwalb et. al: Phys. Lett. B321 (1994) 20
- [Sch95] H. Schön: HADES - Ein Dileptonenspektrometer hoher Akzeptanz für relativistische Schwerionenkollisionen, Doktorarbeit, Johann-Wolfgang-Goethe Universität, Frankfurt, (1995)
- [Shi79] J. Shifman, A. Veinshtein, V. Zakharov: Nucl. Phys. B147 (1979) 385
- [Tam37] I. E. Tamm, I. Frank: Dokl. Akad. Nauk. SSSR 14 (1937) 107
- [Wam98] J. Wambach, R. Rapp: Theoretical Interpretations of low-mass Dileptons, Nucl. Phys. A 638 (1998) 171C
- [Wei94] W. Weise: Proceedings of the Workshop on Dilepton Production in Relativistic Heavy Ion Collisions (1994) 22
- [Win93] L. Winkelmann et al.: Phys. Lett. B298 (1993) 22
- [Wol93] Gy. Wolf, W. Cassing, U. Mosel: Nucl. Phys. A552 (1993) 549
- [Yeg90] A. Yegneswaran et al.: The Dilepton Spectrometer, Nucl. Inst. Meth. A290 (1990) 61
-

- [Zei99] K. Zeitelhack et al.: The HADES-RICH Detector, Nucl. Inst. Meth. A433 (1999) 201

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihrer freundliche Zusammenarbeit das unterstützende und angenehme Umfeld zur Durchführung dieser Arbeit gebildet haben.

Mein besonderer Dank gilt:

Herrn Prof. Dr. W. Kühn für die interessante und vielseitige Aufgabenstellung, die fachliche Unterstützung und die Möglichkeit, im Rahmen eines wissenschaftlichen „Großprojekts“ mit internationaler Beteiligung, Grundelemente des modernen Projektmanagements kennenzulernen.

Meinem jahrelangen Mitstreiter Jörg für die interessanten Diskussionen über die Physik, den Mikrokosmos II. Physik sowie die nichtphysikalischen Interdependenzen des Makrokosmos.

Weiterhin möchte ich Herrn PD Dr. Jim Ritman für die ständige Diskussions- und Erläuterungsbereitschaft danken, die viel Licht in das Dunkel der Physik mit chiralen Kondensaten gebracht hat.

Danke auch an den Rest der „LVL2-Trigger-Truppe“ bestehend aus Erik und Michael für die immer vorhandene Diskussions- und Hilfsbereitschaft sowie die unzähligen Bytes bzw. Nibbles an Testdaten zur funktionalen Überprüfung/Optimierung des Trigger- und Auslesesystems. Danke auch noch an HansP für die Lizenz zur Übertragung der Testdaten durch Raum 127.

Desweiteren danke ich der Krakauer HADES-Gruppe für die langjährige Zusammenarbeit und die herzliche Gastfreundschaft. Stellvertretend möchte ich hier Herrn Dr. Piotr Salabura und Herrn Marcin Kajetanowicz erwähnen.

Eine besonders herzlicher Dank gilt schließlich meinen Eltern, die die ausgezeichneten Rahmenbedingungen für mein Studium schufen, und an Ulrike, die besonders in der Endphase dieser Arbeit eine große Hilfe und ein Garant für Optimismus und Lebensfreude war.