

Echtzeit-Mustererkennung zum
Elektronennachweis mit einem RICH-Detektor in
relativistischen Schwerionenkollisionen

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

vorgelegt von
Jörg Lehnert
aus Reiskirchen

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

Dekan: Prof. Dr. A. Beutelspacher

I. Berichterstatter: Prof. Dr. W. Kühn

II. Berichterstatter: Prof. Dr. A. Müller

Tag der mündlichen Prüfung: 12.7.2000

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein schnelles Echtzeit-Triggersystem zur Identifizierung von Dileptonen in einem vorgegebenen Intervall der invarianten Masse beschrieben sowie speziell die Triggerkomponente zur Erkennung von Elektronen- und Positronensignaturen auf der segmentierten Detektorfläche eines ringabbildenden Cherenkov-Detektors dargestellt. Dies umfaßt die vollständige Entwicklung der Hardware sowie eines angepassten Algorithmus zur Ringerkennung. Mittels Dielektronenspektren im Massenbereich bis $1,1 \text{ GeV}/c^2$ soll das HADES-Spektrometer (**H**igh **A**ceptance **D**i**E**lectron **S**pectrometer), das z. Zt. am Schwerionensynchrotron (SIS) der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt in Betrieb genommen wird, in experimentellen Szenarien von pion- und protoninduzierten Reaktionen bis hin zu Schwerionenkollisionen massivster Systeme vor allem die Frage nach vorhergesagten Modifikationen von Teilchenmassen und -breiten im Medium untersuchen.

Zur schnellen Identifizierung von Dielektronenpaaren in einem Umfeld höchster Multiplizitäten von bis zu 200 geladenen Teilchen / Ereignis und hoher Ereignisraten bis zu $10^5 / \text{s}$ wurde in der Gießener HADES-Gruppe ein Echtzeittriggersystem (Second Level Trigger) entwickelt, das Elektronensignaturen in verschiedenen Teildetektoren lokalisiert und auf dieser Basis Ereignisse mit Dileptonenpaaren in einem vorgegebenen Bereich der invarianten Masse auswählt. Der Reduktionsfaktor des Second Level Triggers liegt bei 100.

Bestandteil dieses Systems ist die Triggerelektronik zur Verarbeitung der Daten eines hadronenblinden ringabbildenden Cherenkovdetektors. Die Elektronik besteht aus zwei VME-Einschubkarten pro Detektorsegment, die aus den Koordinateninformationen der Detektorauslese innerhalb von im Mittel $40 \mu\text{s}$ das vollständige Treffermuster rekonstruieren, auf Basis dieses Musters eine Ringerkennung auf der gesamten Detektorfläche bestehend aus 96×96 Bildelementen durchführen und deren Resultate den nachfolgenden Triggereinheiten zur Verfügung stellen. Die verarbeitete Datenmenge hierbei beträgt ca. 150 MByte/s -Segment. Bei der Implementierung der Funktionalität kam im großen Umfang programmierbare Logik zum Einsatz, die zum einen das sukzessive Umsetzen und Testen der gesamten Funktionalität als auch im späteren Betrieb eine flexible Anpassung vor allem des Triggeralgorithmus an die Anforderungen der unterschiedlichen experimentellen Situationen ermöglicht.

Der für eine Implementierung in die verwendeten Logikbausteine optimierte Ringerkennungsalgorithmus wurde in verschiedenen Szenarien mit Daten aus den vollständigen Detektorsimulationen als auch aus Testexperimenten des realen Detektors getestet und dabei aus den simulierten Daten eine Ringerkennungseffizienz oberhalb von 90% bei weniger als 0,5 fehlidentifizierten Elektronen / Ereignis für einen optimierten Detektor ermittelt

Inhaltsverzeichnis

1 Massenmodifikationen im Medium	1
1.1 Chirale Symmetrie	1
1.2 Relativistische Schwerionenkollisionen	4
1.2.1 Teilchenproduktion in relativistischen Schwerionenkollisionen	6
1.3 Mesonenmassen	8
1.4 Dileptonenspektrometrie von Vektormesonen	10
1.4.1 Dileptonen als Sonden	10
1.4.2 Das HADES-Spektrometer	12
2 Der HADES-Detektor	15
2.1 Anforderungen an das Detektorsystem	15
2.2 Die Detektorkomponenten	17
2.2.1 Der ringabbildende Cherenkovdetektor	18
2.2.2 Mini-Driftkammern	23
2.2.3 Schauerdetektor	24
2.2.4 Flugzeitwand	25
3 Das Triggersystem	27
3.1 Das dreistufige Triggersystem	28
3.1.1 Die erste Triggerstufe (Zentralitätstrigger)	28
3.1.2 Der Dileptonenttrigger	29
3.2 Der Second-Level-Trigger	29
3.2.1 Image Processing Units	30
3.2.2 Matching Unit	31
3.3 Trigger-Performance	32
3.4 Trigger-Effizienz	34
3.5 Simulation des Datenaufnahme- und Triggersystems	35
3.5.1 DAQ- und Trigger-Simulation -eine Abgrenzung	35
3.5.2 Diskrete Event-Simulation	36
3.5.3 Modellierung des HADES Datenaufnahme- und Triggersystems	37
4 Ringerkennung	41
4.1 Leptonenidentifizierung mit dem RICH	42
4.1.1 Photonenstatistik	42
4.1.2 Untergrundzusammensetzung	42
4.2 Algorithmen zur Muster- und Ringerkennung	43
4.2.1 Bildvorverarbeitung	44
4.2.2 Verfahren zur Ringerkennung	44
4.2.3 Hardware-implementierbare Ringerkennungsalgorithmen	46
4.2.4 Software-Ringerkennungsalgorithmen	50
4.3 Leistungsfähigkeit der Algorithmen	50
4.3.1 Dileptonen aus Omega-Zerfällen in der Reaktion Au+Au	50

5 Die RICH-Triggerelektronik	53
5.1 Die Datenauslese des RICH-Detektors	53
5.2 Die Triggerelektronik für den RICH	55
5.2.1 Hardware-Konzept	56
5.3 Die Pattern Reconstruction Card (PRC)	57
5.3.1 Schnittstelle zum Readout Controller	57
5.3.2 Rekonstruktion des Hit-Patterns	60
5.3.3 Patterntansfer zur RRU	62
5.3.4 Schnittstelle zur Matching Unit	63
5.3.5 Kontrollfunktionalität	67
5.4 Die Ring Recognition Unit (RRU)	67
5.4.1 Ringerkennungs-FPGAs	68
5.4.2 Kontroll-CPLD	69
5.4.3 Ergebnis-Verwaltung	69
5.4.4 Lokale Variationen des Algorithmus	69
6 Ergebnisse und Ausblick	75
6.1 Daten aus dem Prototypentest 97	75
6.2 Hardwaretests	77
6.3 Testexperiment Mai/Juni 2000	77
6.3.1 Hardwareintegration	77
6.3.2 Test des Ringerkennungsalgorithmus mit Strahlzeitdaten	79
6.4 Ausblick	85
Abbildungsverzeichnis	87
Abbildungsverzeichnis	89
Bibliographie	91
Glossar	97

1 Massenmodifikationen im Medium

Zu den grundlegenden und auch anschaulich am ehesten greifbaren Teilcheneigenschaften gehört die Masse, die jedoch noch diverse offene Fragen birgt, angefangen bei dem ihr zugrundeliegenden Mechanismus über die Größe einzelner Elementarteilchenmassen (Neutrinos) bis hin zum Zustandekommen der Massen zusammengesetzter Systeme.

In der Quantenchromodynamik (QCD), der Theorie der starken Wechselwirkung, ist es nicht möglich, die Quarks als deren grundlegende Elementarteilchen experimentell isoliert zu betrachten. Dies liegt begründet im sogenannten „Confinement“, der Tatsache, daß aufgrund des linearen Anteils des QCD-Potentials keine freien geladenen¹ Quarks beobachtbar sind, sondern nur zusammengesetzte und damit farbneutrale Objekte. Dabei handelt es sich um Systeme aus drei Quarks (Baryonen) oder einem Quark und einem Antiquark (Mesonen).

Unter diesen Voraussetzungen stellt sich die Frage, wie sich die Massen der Quarks beschreiben lassen als auch, wie hierauf aufbauend die Massen der zusammengesetzten hadronischen Systeme erklärbar sind. Im Rahmen der Modellbeschreibungen taucht darüberhinaus die Frage auf, inwieweit die Massen der Hadronen konstante Werte sind oder vom umgebenden Medium beeinflußt werden.

1.1 Chirale Symmetrie

Da die Kopplungskonstante α_s der starken Wechselwirkung mit der Größe des Viererimpulsübertrags in einem gegebenen Prozeß variiert und bei kleinen Impulsen in der Größenordnung von 1 liegt, ist die QCD nur bei großen Impulsübertragen störungstheoretisch behandelbar. Im Bereich der leichten Hadronen ist es hingegen notwendig, auf die Gitter-QCD (d.i. numerische Rechnungen auf einem diskreten Raum-Zeit-Gitter) oder andere Modellbildungen zurückzugreifen.

Im Rahmen chiraler Theorien geht man zur Beschreibung der Quark- und Hadronenmassen in der QCD zunächst von masselosen Quarks aus und beschreibt hieraus aufbauend die Effekte, die zu den Quarkmassen beitragen.

1. In der QCD spricht man von „Farbladung“

Chirale Symmetrie und das Quarkkondensat

Im Limit masseloser Stromquarks sind aufgrund von Symmetrien der Lagrangefunktion der Vektor- und Axialvektorstrom erhalten, man spricht von Erhaltung der „chiralen“ Symmetrie, es existieren links- und rechtshändige¹ Quarks, die nicht mischen [1].

Durch die Einführung eines Massenterms für die Stromquarks ist diese Symmetrie *explizit* gebrochen, da nun bereits die Lagrangefunktion nicht mehr invariant unter den zugehörigen Transformationen ist.

Die Kleinheit der Stromquarkmassen von

$$m_u = (5 \pm 2)\text{MeV}/c^2 \quad m_d = (9 \pm 3)\text{MeV}/c^2 \quad (1.1)$$

verglichen mit den typischen Skalen im hadronischen Bereich von einigen hundert MeV ermöglicht es, zumindest von einer "näherungsweise" Symmetrie zu sprechen.

Der Ursprung der Stromquarkmassen soll an dieser Stelle nicht weiter verfolgt werden. Er ist ähnlich den massiven Teilchen der elektroschwachen Wechselwirkung (W^+ , W^- , Z , e) beschreibbar durch den sogenannten Higgs-Mechanismus, in dem die Teilchen ihre Masse durch die Wechselwirkung mit dem bisher experimentell nicht nachgewiesenen Higgs-Feld erhalten, das auch im physikalischen Vakuum einen endlichen Erwartungswert besitzt.

Die näherungsweise Symmetrie der Lagrangefunktion ist darüberhinaus im Vakuum *spontan* gebrochen, d.h. der konkret realisierte Grundzustand erfüllt nicht mehr eine in der Lagrangefunktion nach wie vor vorhandene Symmetrie (als Analogon wird häufig die spontane Ausrichtung der Domänen in einem Ferromagneten angeführt).

Anzeichen der spontanen Symmetriebrechung sind die Existenz (nahezu) masseloser Goldstone-Bosonen² (π , K , η) sowie die Aufspaltung der Paritätsdoublets sowohl im skalaren (π , f_0) als auch vektoriellen (z.B. ρ , a_1) Bereich.

Als Ordnungsparameter für die Stärke dieser Symmetriebrechung kann das Quarkkondensat³ $\langle q\bar{q} \rangle$ betrachtet werden, aus dessen hohem Vakuumerwartungswert von $(230 \pm 25 \text{MeV})^3$ [1] sich ein starker symmetriebrechender Effekt ablesen läßt.

Temperatur- und Dichteabhängigkeit des Quarkkondensats

Mit zunehmender Temperatur und Dichte des Mediums wird ein Abfall des Kondensats und somit eine Wiederherstellung der chiralen Symmetrie erwartet.

Für Baryondichten nahe Null ergeben Gitter-QCD-Rechnungen bei Temperaturen von etwa $150 \text{MeV}/c^2$ einen starken Anstieg thermodynamischer Größen wie der Energie- und Entropiedichte. Dies wird in Verbindung gebracht mit einem Phasenübergang von der hadronischen Materie zu einem „Plasma“ aus Quarks und Gluonen, in dem das Confinement aufgehoben ist [4]. Damit einher geht ein starker Abfall des Quarkkondensats.

1. die sich in der Projektion ihres Spins auf den Impulsvektor unterscheiden

2. Goldstone-Bosonen sind masse- und spinlose Teilchen, die in Theorien spontan gebrochener Symmetrien als langwellige Anregungen erscheinen [2].

3. Unter dem „Quarkkondensat“ oder „chiralem Kondensat“ versteht man den Erwartungswert der Dichte virtueller Quark-Antiquark-Paare mit den Quantenzahlen des Vakuums

Zur Vorhersage des Verhaltens bei endlicher Dichte existieren verschiedene Ansätze, bei denen häufig auch anstelle der Dichte ρ das baryochemische Potential μ verwendet wird. Bei kleinen Temperaturen und Dichten lassen sich aus thermodynamischen Betrachtungen modellunabhängige Aussagen machen [5]

$$\frac{\langle \bar{q}q \rangle_{\mu, T}}{\langle \bar{q}q \rangle_0} = 1 - \sum_h \frac{\Sigma_h \rho_h^s(\mu, T)}{m_\pi^2 \cdot f_\pi^2} \quad \Sigma_h \propto \frac{\partial m_h}{\partial m_q} \quad (1.2)$$

m_π :	Pionenmasse	f_π :	Zerfallskonstante des Pions
m_h :	Hadronenmasse	m_q :	Quarkmasse
ρ_h :	skalare Dichte d. Hadrons h	Σ_h :	Sigma-Kommutator des Hadrons h

Eine Extrapolation dieses linearen Abfalls des Kondensats mit der Dichte unter Zuhilfenahme der experimentell bekannten Werte für die dominanten Beiträge Σ_π und Σ_N führt bereits bei normaler Kerndichte ($\rho_0 = 0,17 / \text{fm}^3$) zu einer Abnahme des Kondensats um 30%.

Berechnungen [3] auf Basis des Nambu-/Jona-Lasinio-Modells ergeben den in Abb. 1.1 gezeigten Verlauf der Abhängigkeit $\langle \bar{q}q \rangle(T, \rho)$, ebenfalls mit einem starken Abfall in Abhängigkeit von der Dichte. In der Abbildung ist erkennbar, daß Modifikationen des Quarkkondensats in einem weiten Bereich von Temperaturen und Dichten stattfinden sollten. Es stellt sich die Frage, inwieweit sich diese Modifikationen auch in Änderungen von Mesonenmassen niederschlagen und in welchen experimentellen Szenarien diese beobachtbar sind.

In Kap. 1.2 sollen daher Grundzüge der relativistischen Schwerionenkollisionen beschrieben werden, mit denen der Bereich mehrfacher Grundzustandsdichte experimentell abgedeckt werden kann. In Kap. 1.3 werden Ansätze zur Beschreibung und Vorhersage von Massenmodifikationen im Medium dargestellt, bevor in Kap. 1.4 auf existierende und zukünftige experimentelle Zugänge zu Mediummodifikationen von Vektormesonmassen eingegangen wird.

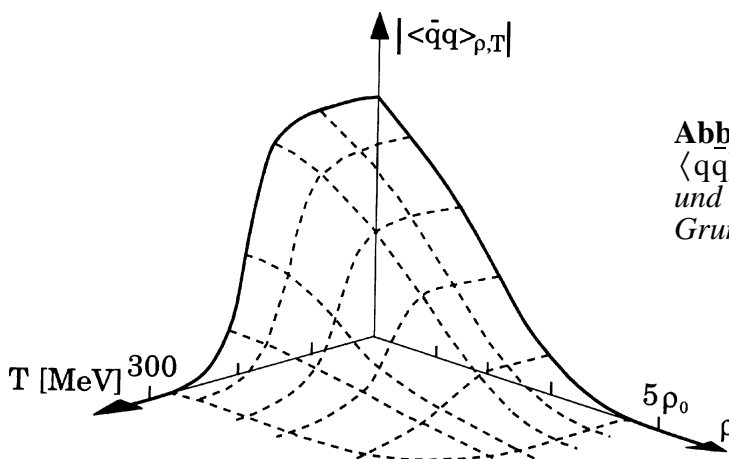


Abb. 1.1: Das Quarkkondensat $\langle \bar{q}q \rangle$ als Funktion von Temperatur und Dichte (in Einheiten der Grundzustandsdichte ρ_0) [3].

1.2 Relativistische Schwerionenkollisionen

Von relativistischen Schwerionenreaktionen spricht man in einem Bereich der Projektilenergie von ca. 1 GeV/Nukleon, wie sie typisch z.B. am Schwerionensynchrotron SIS der GSI¹ Darmstadt erreicht werden. Hier besitzen die Projektilnukleonen eine Geschwindigkeit ($v_{\text{Proj}} = 0,9 \cdot c$), die deutlich über der Schallgeschwindigkeit² in Kernmaterie ($v_{\text{Schall}} = 0,2-0,3 \cdot c$) liegt, so daß die Nukleonen aus der Reaktionszone nicht schnell genug entweichen können und es neben einer Aufheizung der Materie auch zu einer signifikanten Erhöhung der Dichte kommt.

Die Beschreibung einer solchen Reaktion erfolgt im sog. „Participant-Spectator“-Bild, d.h. es wird unterschieden zwischen den Nukleonen, die innerhalb des geometrischen Überlapps der stoßenden Kerne an der Reaktion teilnehmen („participants“), und den Nukleonen der Restkerne von Projektil und Target („spectators“), die im wesentlichen unbeeinflusst bleiben (z.B.[17]). Unter anderem aus den Rapiditätsverteilungen der Reaktionsprodukte geht hervor, daß die Partizipanten im CM-System vollständig abgebremst werden, während die Spektatoren sich nach wie vor im Bereich der Target- bzw. Projektilrapidität befinden.

Die Reaktion selbst wird bei relativistischer Energie als eine Abfolge von Hadron-Hadron-Stößen verstanden, anfangs der partizipierenden Nukleonen, in der Folge auch von angeregten Nukleonenresonanzen und produzierten Mesonen. Hierbei kommt es zu einer zunehmenden Thermalisierung des Systems, die verfügbare Energie verteilt sich auf kollektive Flußeffekte von Nukleonen und Fragmenten, die thermische Energie der beteiligten Hadronen sowie die Anregung von Resonanzen und damit einhergehend die Produktion neuer Teilchen.

Die hochdichte Phase bleibt nur über einen kurzen Zeitraum von ca. 15 fm/c erhalten (s. Abb. 1.2), dann expandiert das System, wobei mit dem Aussterben der inelastischen Wechselwirkungen die Teilchenzusammensetzung des Systems festliegt³ („chemischer Freeze-Out“) und dem Ende der elastischen Baryon-Meson-Kollisionen auch die kinematische Verteilung („thermischer Freeze-Out“).

Hin zu höheren Projektilenergien erreicht man bis zu Energien von ca. 10 AGeV, die z.B. am AGS⁴ erreicht werden [18], noch höhere Baryondichten bis ca. $8 \cdot \rho_0$. Bei weiterer Erhöhung der Energie in den *ultrarelativistischen* Schwerionenkollisionen (E_{Proj} ab 10 AGeV) werden die Kerne zunehmend „transparenter“ füreinander, d.h. es kommt zu keiner vollständigen Abbremsung der Partizipanten mehr, die erreichbaren Baryondichten werden wieder kleiner und es wird angenommen, daß bei Energien weit jenseits von 100 AGeV die Teilchenproduktion aus einem Bereich hoher Energiedichte und Temperatur zwischen den beiden Kernen heraus erfolgt. In diesem Energiebereich werden in naher Zukunft auch Colliderexperimente am RHIC⁵ ($E_{\text{Strahl}} = 70-100$ GeV/Nukleon) sowie am LHC⁶ ($E_{\text{Strahl}} = 3$ TeV/Nukleon) stattfinden.

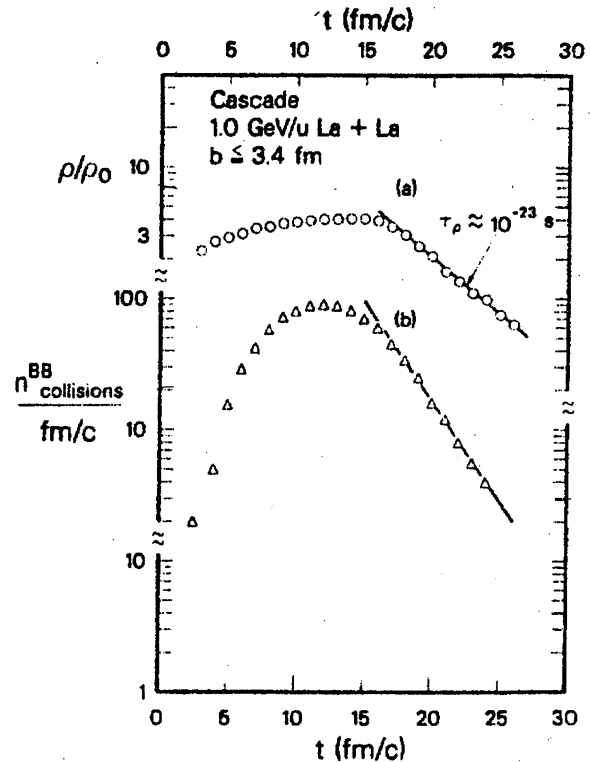
1. Gesellschaft für Schwerionenforschung

2. Diese ist über die Kompressionskonstante K der Kernmaterie festgelegt, die z.B. aus der Monopol-Riesenresonanz bestimmbar ist, oder alternativ über die Fermienergie

3. abgesehen von Teilchenzerfällen

4. Alternating Gradient Synchrotron am Brookhaven National Laboratory

Abb. 1.2: Zeitlicher Ablauf einer zentralen Schwerionenkollision (La+La bei 1 AGeV) nach einer Simulation mit dem CASCADE-Modell. Gezeigt sind der Verlauf der erreichten Kerndichte ρ/ρ_0 und die Zahl der Baryon-Baryon-Kollisionen [19].



Modelle zur Beschreibung relativistischer Schwerionenkollisionen

Zum Verständnis der Observablen einer Schwerionenkollision ist es notwendig¹, Informationen über die erzielten Temperaturen und Dichten zu erhalten.

Diese sind nur mittelbar zugänglich, z.B. über die Maxwell-Boltzmann-artigen Verteilungen emittierter Teilchen, aus denen sich Steigungsparameter T in der Größe von $T = 60$ – 100 MeV (bei 1 AGeV) ablesen lassen, die allerdings mit der betrachteten Teilchenart stark variieren und nicht direkt als eine Systemtemperatur aufgefaßt werden können.

Zur Beschreibung der Observablen und der Abläufe relativistischer Schwerionenkollisionen werden verschiedene Modelle verwendet, denen die benötigten Größen entnehmbar sind.

Makroskopische Modelle

Kollektive Effekte wie Kompression oder Fluß werden in hydrodynamischen Modellen beschrieben.

Thermodynamische Modelle gehen von einem thermischen und chemischen Gleichgewicht in der Reaktionszone aus und machen z.B. Aussagen zu den Spektren emittierter Teilchen. Daneben lassen sich aus Betrachtungen der Reaktion zum Zeitpunkt des Freeze-

5. Relativistic Heavy Ion Collider (Brookhaven National Laboratory)

6. Large Hadron Collider (CERN)

1. z.B. um festzulegen, welcher Bereich der Abb. 1.1 in einem Experiment erreicht wurde

Out, wenn sich die hadrochemische Zusammensetzung des Systems nicht mehr ändert, und aus den produzierten Teilchenraten mittels der Thermodynamik entlehnter Konzepte (Großkanonisches Ensemble) Werte für Temperaturen und chemische Potential bestimmen[20][21].

Für SIS-Energien werden hiermit Temperaturen zwischen 50-90 MeV sowie chemische Potentiale $\mu_B=675-780$ MeV bestimmt.

Mikroskopische Transportmodelle

Informationen über den *Ablauf* einer Schwerionenkollision erhält man aus mikroskopischen Transportmodelle, die die Kollision als eine Abfolge von Teilchen-Teilchen-Stößen betrachten.¹

In Transportmodellen wie z.B. BUU („Boltzmann-Ueling-Uhlenbeck“) [22] wird mit Hilfe einer weiterentwickelten Boltzmann-Transportgleichung die Zeitentwicklung aller Einteilchenphasenraumverteilungen unter dem Einfluß eines zeitabhängigen mittleren Potentials beschrieben. Die Wechselwirkung zwischen Teilchen erfolgt in binären Hadron-Hadron-Stößen unter Berücksichtigung der Wirkungsquerschnitte für Anregung (Resonanzen), Produktion (Mesonen), Absorption sowie weiterer Randbedingungen wie z.B. des Pauli-Prinzips. Zum Teil gehen auch Mehrteilchenkorrelationen in die Modelle ein (Quantum Molecular Dynamics - QMD; z.B. [23]).

Transportrechnungen kann man entnehmen, daß bei Kollisionen schwerer Systeme bei SIS-Energien Dichten von bis zu dreifacher Grundzustandsdichte erzielbar sind.

1.2.1 Teilchenproduktion in relativistischen Schwerionenkollisionen

Für die Untersuchung von Mediummodifikationen stellt sich sowohl im Hinblick auf potentielle Sonden als auch den zu erwartenden Untergrund die Frage, welche Teilchen mit welchen Häufigkeiten in einer relativistischen Schwerionenkollision produziert werden und in welcher Form die beteiligten Partizipanten die Reaktionszone verlassen.

Unter der Annahme der Teilchenproduktion in Nukleon-Nukleon-Stößen lassen sich für die Produktion von Photonen, Pionen, Kaonen und weiterer Mesonen (unter Berücksichtigung einer Vielzahl zur Verfügung stehender Daten über einen großen Energiebereich hinweg und für diverse Projektil-Target-Kombinationen) Zusammenhänge erkennen (s. Abb. 1.3), welche die Produktionswahrscheinlichkeit pro partizipierendem Nukleon als Funktion der zur Verfügung stehenden Energie pro Partizipant beschreiben [25]. Erkennbar ist in der Abbildung z.B. auch, daß Teilchenproduktion schon unterhalb der jeweiligen Schwellen für den freien Nukleon-Nukleon-Stoß stattfindet und hieraus z.B. Informationen über Impulsverteilungen in Kernen oder über mehrstufige Produktionsprozesse gewonnen werden können.

Die in der Folge beispielhaft angegebenen Zahlenwerte produzierter Teilchen beziehen sich alle auf die Reaktion Au+Au bei 1 AGeV, was eines der schwersten am SIS experimentell zugänglichen Systeme darstellt² und damit auch wichtige Randbedingungen für das HADES-Detektorsystem definiert.

1. Ein älteres mikroskopisches Modell ist das für Abb. 1.2 verwendete Cascade-Modell.

2. Die Satzaussage lautet *nicht* „eines der am SIS experimentell am schwersten zugänglichen Systeme“

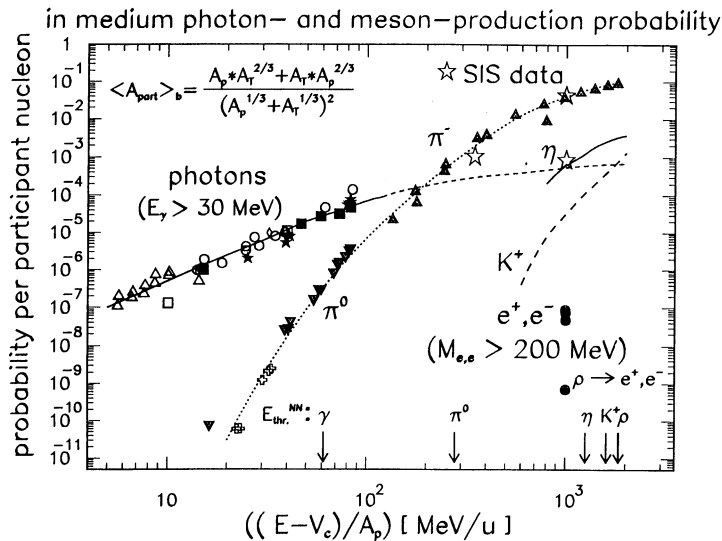


Abb. 1.3: Abhängigkeit der Produktionswahrscheinlichkeit pro partizipierendem Nukleon von der zur Verfügung stehenden Energie oberhalb der Coulombschwelle. Gezeigt sind Kurven für Photonen, Pionen sowie einzelne Messpunkte für weitere Teilchenarten [25].

Die Teilchenhäufigkeiten hängen direkt von der Zahl der partizipierenden Nukleonen A_{part} ab, die sich aus geometrischen Überlegungen in Abhängigkeit vom Stoßparameter b und damit der Zentralität der Kollision parametrisieren lassen [24].

Partizipanten

Für zentrale Ereignisse ergibt sich für die entstehenden Fragmente eine exponentielle Ladungsverteilung $N(Z) \propto e^{-\sigma Z}$ mit einem von der Projektilenergie abhängigen Parameter σ , die bei Projektilenergien von mehreren hundert A MeV noch einige Prozent an höhergeladene Fragmenten ergibt (s. z.B. [26]), bei 1 A GeV Projektilenergie aber im wesentlichen zur Produktion von $Z=1$ -Fragmenten führt. Für die Anzahl an Protonen¹ wird ein Wert von

$$N_p \approx 0,42 \cdot A_{part}$$

angegeben [27], der dem Protonenanteil in Au entspricht.

Mesonenproduktion

Mesonen stammen im Gegensatz zu Nukleonen und leichten Fragmenten nicht aus den ursprünglichen Target- und Projektilkernen, sondern werden in der Reaktion *produziert*, entweder beim Zerfall der in Nukleon-Nukleon-Stößen erzeugten Resonanzen oder direkt.

Die größten Wirkungsquerschnitte bestehen für die Produktion von Pionen, v.a. aus dem Zerfall der niedrigstliegenden Nukleon-Resonanz $\Delta(1232)$. Pionenmultiplizitäten wurden bestimmt [28][29] zu

1. Neutrale Reaktionsfragmente werden unter den hier im Vordergrund stehenden experimentellen Gesichtspunkten nicht weiter betrachtet, da die meisten Detektortypen wie die im folgenden beschriebenen nur auf geladene Teilchen ansprechen.

$$N_{\pi^+} \approx 0,018 \cdot A_{\text{part}} \quad N_{\pi^-} \approx 0,031 \cdot A_{\text{part}} \quad N_{\pi^0} \approx 0,023 \cdot A_{\text{part}}$$

Mit deutlich geringeren Querschnitten ($\eta/\pi^0 \approx 0,014$ [29]) werden das η -Meson (aus der $N^*(1535)$ -Resonanz) und die Strangeness enthaltenden K-Mesonen ($N_{K^+} \approx 6 \cdot 10^{-5} A_{\text{part}}$ [30]) produziert.

Photonen

Der Großteil der außerhalb der Reaktion nachweisbaren Photonen stammt aus dem Zerfall neutraler Mesonen, vor allem dem zu 99,8% in $\gamma\gamma$ zerfallenden π^0 , weshalb auf direkte Photonen abzielende Experimente v.a. unter und in der Region der Pionenproduktionschwelle stattfinden (z.B. [31]).

Direkte Photonen ($E_\gamma > 30$ MeV) stammen aus Proton-Neutron-Bremsstrahlungsprozessen in der Frühphase der Kollision mit einer Produktionsrate in der Größenordnung von $10^{-3} \cdot A_{\text{part}}$ [32].

1.3 Mesonenmassen

Die *freien* Massen der in Schwerionenkollisionen erzeugten Mesonen sind experimentell gut bekannt. Möchte man Mediummodifikationen dieser Massen untersuchen, wird in der Beschreibung unterschieden zwischen Effekten, die sich bei den leichten pseudoskalaren Mesonen ergeben, die als Goldstone-Bosonen der spontanen Symmetriebrechung agieren [1], und Effekten bei Vektormesonen, welche sich aus in Kap. 1.4 darzulegenden Gründen auch für den experimentellen Zugang gut eignen. Die Vektormesonen ρ , ω und ϕ sind daher bevorzugter Gegenstand der in der Folge diskutierten Modelle.

Eine Beziehung zwischen dem in Kap. 1.1 beschriebenen Quarkkondensat und Mesonenmassen läßt sich für den Vakuumfall aus QCD-Summenregeln beziehen, z.B. für die Masse des ρ -Mesons [5]

$$m_\rho^2 = [\text{const} \cdot \alpha_s \cdot \langle \bar{q}q \rangle_0^2]^{1/3} \quad (1.3)$$

Die Frage, ob Mesonenmassen auch bei endlicher Dichte mit dem Quarkkondensat skalieren bzw. welche Effekte des Mediums in die Massen eingehen, wird von verschiedenen Ansätzen behandelt, deren Beschreibungen teils auf hadronischer Basis, teils auf der Ebene von Konstituentenquarks erfolgen.

In der Gruppe der hadronischen Modelle wird die In-Medium-Propagation von Vektormesonen unter Verwendung von Randbedingungen aus der chiralen Symmetrie oder der Phänomenologie der Hadronen beschrieben. Damit ist eine Spektralfunktion¹ für die Vektormesonen bestimmbar. Raten produzierter Teilchen als meßbare Größen ergeben sich hieraus durch die Verknüpfung mit Modellen über die Raum-Zeit-Entwicklung der Schwerionenkollision. Verwendung finden sowohl einfache thermische Modelle (Abkühlung aus thermischen und chemischem Gleichgewicht) oder Transportmodelle, die diese Entwicklung detailliert beschreiben (vgl. Kap. 1.2).

1. d. h. die Verteilung der totalen Energie in Abhängigkeit vom Dreier-Impuls

Für die pseudoskalaren Mesonen werden keine signifikanten Massenmodifikationen vorausgesagt. Ein deutlicherer Effekt ergibt sich allein für Antikaonen, bei denen ein Abfall der Masse mit zunehmender Dichte erwartet wird ($>20\%$ bei ρ_0 [6]). Diese Annahme führt zu Berechnungen von Antikaonenspektren[7], die konsistent mit experimentellen Befunden der FRS- und KAOS-Kollaboration sind: Das KAOS-Spektrometer bestimmte in CC- sowie NiNi-Stößen bei äquivalenten Energien (1AGev für K^+ bzw. 1,8 AGeV für K^- aufgrund der unterschiedlichen Schwellen) vergleichbare Wirkungsquerschnitte für K^+ und K^- -Produktion [33]. Erwartet worden war eine geringere K^- -Rate wegen deren höherer Reabsorption, die einen zusätzlichen Beitrag leisten sollte über den bereits in pp-Stößen nahe der Schwelle vorhandenen relativen K^+ -Überschuß [34] hinaus.

Spektrale Verteilungen der Vektormesonen werden z.B. in Modellen berechnet, die in einer effektiven Lagrangefunktion die Meson-Baryon-Wechselwirkung unter Berücksichtigung chiraler Dynamik und des Vektordominanzmodells¹ beschreiben. Schon bei Grundzustandsdichte ρ_0 wird für das ρ -Meson eine starke Verbreiterung, für das ω -Meson eine Verbreiterung mit einer Verschiebung zu niedrigeren Massen vorausgesagt [8] (s. Abb. 1.4). Für das ϕ -Meson wird eine minimale Massenverschiebung und eine deutliche Verbreiterung erwartet [9].

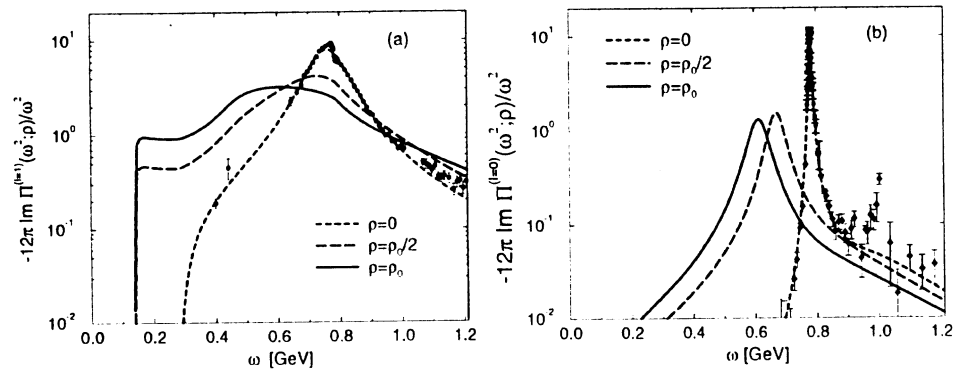


Abb. 1.4: Modifikationen der Spektren der Vektormesonen ρ (links) und ω (rechts) bei Grundzustandsdichte ρ_0 . Zum Vergleich die Vakuumspektren (gestrichelt) [8].

Zu ähnlichen Ergebnissen für das ρ -Meson kommt man bei Verwendung von Transportmodellen, mit denen man die *Erzeugung* von ρ -Mesonen modelliert und eine Spektralfunktion verwendet, die Pionen-Modifikationen im Medium sowie Polarisierungseffekte des ρ berücksichtigt [11].

Modelle auf Basis von Konstituentenquark werden darauf gegründet, daß bei höheren Dichten (2-3 ρ_0) Quarks anstelle von Hadronen als die relevanten Variablen betrachtet werden [12]

1. in dem elektromagnetische Wechselwirkung von Hadronen durch Vektormesonen vermittelt wird

Unter Verwendung einer auf dem Nambu/Jona-Lasinio-Modell basierten Lagrangefunktion erscheinen Konstituentenquarks als ausgedehnte Objekte aus dem Quark und einer umgebenden Quark-Antiquark-Wolke, so daß bei endlicher Dichte Mesonenmassen sich nicht direkt als Summe der Konstituentenquarkmassen ergeben.

Für das Pion werden als Goldstone-Boson keine starken Veränderungen der Masse erwartet.

Auf der Grundlage von QCD-Summenregeln kommt man zu einem ähnlichen Skalierungsverhalten wie in Gl. 1.2 für die chiralen Modelle dargestellt, jedoch mit einem geringeren Abfall mit der Dichte [16]

$$\frac{m^{\rho, \omega}}{m_0^{\rho, \omega}} = 1 - 0,18 \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \quad (1.4)$$

Dieses Ergebnis deckt sich mit der von Brown und Rho vorhergesagten Skalierung der Mesonenmassen mit der Pionzerfallskonstante f_π und damit auch dem Quarkkondensat:

$$\frac{m^\rho}{m_0^\rho} = \frac{m^\omega}{m_0^\omega} = \frac{f^\pi}{f_0^\pi} \quad (1.5)$$

Alle Modelle sagen also mehr oder minder deutliche Mediumeffekte voraus, Unterschiede ergeben sich vor allem bezüglich der Frage, inwieweit es zu *Verschiebungen* oder eher zu *Verbreiterungen* in den Massenspektren der Mesonen kommt.

1.4 Dileptonenspektrometrie von Vektormesonen

1.4.1 Dileptonen als Sonden

Informationen über Medium-Modifikationen sind nur sehr indirekt über hadronische Proben zu gewinnen, da diese über die gesamte Expansions- und Abkühlungsphase hinweg durch Absorptions- und Streuprozesse wechselwirken und somit an Information über die vorangegangene hochdichte Phase verlieren. Geeignet als Sonden sind dagegen Elektronen und Photonen, die keiner starken Endzustandswechselwirkung unterliegen.

Tabelle 1-1. Eigenschaften der Vektormesonen

Vektormeson	Masse [MeV/c ²]	Zerfallsbreite [MeV/c ²]	Zerfallsbreite [fm/c]	Hauptzerfall	Zerfall in e+e-
ρ	768	152	1,3	$\pi^+\pi^-$ (100%)	$4,6 \cdot 10^{-5}$
ω	782	8,43	23,4	$\pi^+\pi^-\pi^0$ (89%)	$7,0 \cdot 10^{-5}$
ϕ	1019	4,43	44,4	K^+K^- (49%)	$3,0 \cdot 10^{-4}$

Als Signal für die in Kap. 1.3 beschriebenen Mediummodifikationen können daher die dileptonischen¹ Zerfälle der Vektormesonen ρ , ω , ϕ dienen. Über die invariante Masse des

1. mit Leptonenpaaren sind in dieser Arbeit in der Regel allein Elektron/Positron-Paare gemeint

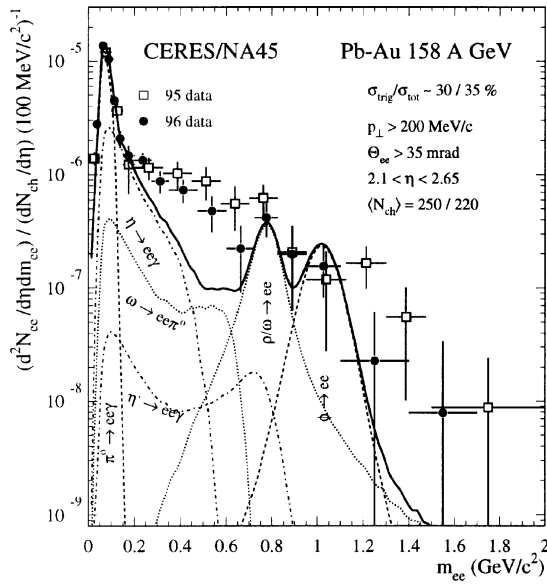


Abb. 1.5: Dileptonenspektrum des CERES-Spektrometers für die Reaktion Pb+Au bei 158 A GeV. Aufgeschlüsselt eingezeichnet sind die bei der Berechnung des Spektrums einbezogenen Quellen, daneben die experimentellen Werte mit einem deutlichen Dileptonenüberschuß v.a. unterhalb der ρ/ω -Region [36].

Leptonenpaars ist die Masse des Vektormesons zum Zeitpunkt des Zerfalls zugänglich. Voraussetzung ist also, daß das Meson noch in der hochdichten Phase zerfällt. Dies ist vor allem beim kurzlebigen ρ (s. Tab. 1-1) gegeben, auch beim ω mit einem signifikanten Anteil, vor allem bei Annahme einer Verbreiterung in Materie und der damit verbundenen kürzeren Lebensdauer im Vergleich zum freien Teilchen.

Die Verzweigungsverhältnisse der Vektormesonen in Dileptonen sind allerdings wegen der elektromagnetischen Natur des Zerfalls sehr klein.

Aus experimenteller Sicht ist daher die Frage zu klären, welche konkurrierenden Quellen für Dileptonen existieren. In Abb. 1.5 sowie Abb. 1.7 sind für SPS- bzw. SIS-Energien die Beiträge zum Dileptonenspektrum aufgeschlüsselt, woraus ablesbar ist, daß in der Massenregion oberhalb $700 \text{ MeV}/c^2$ die ρ/ω -Signale den dominierenden Anteil (zusammen mit der Pion-Annihilation) darstellen.

Dileptonenspektren in (ultra)relativistischen Schwerionenkollisionen wurden in der Vergangenheit von mehreren Experimenten aufgenommen. Dimyonspektren wurden am CERN-SPS von HELIOS und NA50 aufgenommen, Dielektronenspektren von zwei Experimenten:

Vom CERES-Detektor[77] am CERN-SPS in den Reaktionen S+Au bei 200 A GeV bzw. Pb+Au bei 158 A GeV aufgenommene Dileptonenspektren (Abb. 1.5) zeigen im Bereich der invarianten Masse $m_{e^+e^-}$ von $0,2 < m_{e^+e^-} < 1,5 \text{ GeV}/c^2$ einen Dielektronenüberschuß um einen Faktor 3,5-5 verglichen mit den bekannten Komponenten aus Hadronenzerfällen, vor allem im Bereich $300\text{-}700 \text{ MeV}/c^2$ [35][36]. Eine durch das Einsetzen des Überschusses bei $2m_\pi$ nahegelegte Erklärung allein durch Pion-Annihilation $\pi\pi \rightarrow e^+e^-$ erklärt die Stärke des Überschusses nicht [10], einige der in Kap. 1.3. vorgestellten Modelle reproduzieren die Spektren unter Einschluss von Mediummodifikationseffekten [5][11].

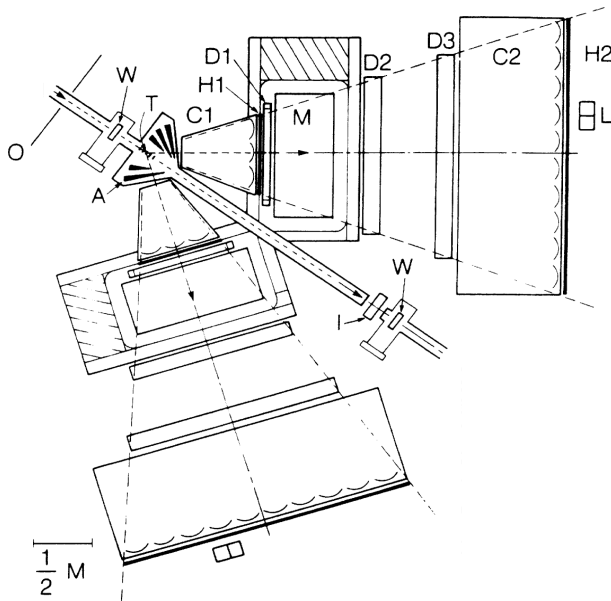


Abb. 1.6: Das DLS am BEVALAC. Gezeigt ist die Aufsicht der beiden Spektrometerarme mit den Driftkammern (D), Hodokopen (H) und segmentierten Gas-Schwellencherenkov-Dektoren (C) jeweils vor und hinter einem Dipolmagneten (M) [37].

Messungen von Dileptonenspektren im Bereich der Projektilenergien bis zu 2,1 AGeV für Kerne wurden bislang allein vom DLS (**DiLepton Spectrometer**, s. Abb. 1.6) am BEVALAC durchgeführt [37].

Das DLS weist Elektron-Positron-Paare in zwei Detektorarmen nach, die unter 40° zur Strahlrichtung angeordnet sind und damit den Bereich mittlerer Rapidität abdecken. Jeder Arm besteht aus Driftkammern, Szintillator-Hodokopen sowie Gas-Schwellencherenkovdetektoren jeweils vor und hinter einem Dipolmagneten.

Untersucht wurden Proton-Kern und Kern-Kern-Kollisionen leichter Systeme (bis Ca+Ca) bei 1 AGeV. Ein beobachteter Dileptonenüberschuß v.a. für $0,2 < m_{ee} < 0,6 \text{ GeV}/c^2$ [38] wird von Modellen unter Verwendung der gängigen Dileptonenbeiträge nicht erklärt, $\pi\pi$ -Annihilation leistet bei BEVALAC-Energien keinen hinreichenden Beitrag, auch eine Begründung durch fallende Mesonenmassen im DLS-Fall ist umstritten [41]. Die von der DLS-Kollaboration ermittelten η -Produktionsraten liegen deutlich über den durch die TAPS-Kollaboration aus neutralen η -Zerfällen ermittelten, Vergleiche sind jedoch wegen der deutlich differierenden Akzeptanzbereiche nur modellabhängig möglich und mit großen experimentellen Unsicherheiten behaftet [38].

Beschränkt wird die Leistungsfähigkeit des DLS vor allem durch die geringe geometrische Akzeptanz aufgrund der Zwei-Arm-Anordnung und durch die geringe Massenauflösung von ca. 12%, die nicht ausreicht, um in der ρ/ω -Region die Signale dieser beiden Mesonen zu trennen.

1.4.2 Das HADES-Spektrometer

Zur Untersuchung von Mediummodifikation der Vektormesonmassen über deren dielektronische Zerfälle wird an der GSI Darmstadt das Dileptonenspektrometer HADES (**H**igh **A**ccceptance **D**i**E**lectron **S**pectrometer, Abb. 1.8) in Betrieb genommen, das mit einer gegenüber dem DLS deutlich verbesserten Akzeptanz und Auflösung Dielektronenspektren aufnehmen soll.

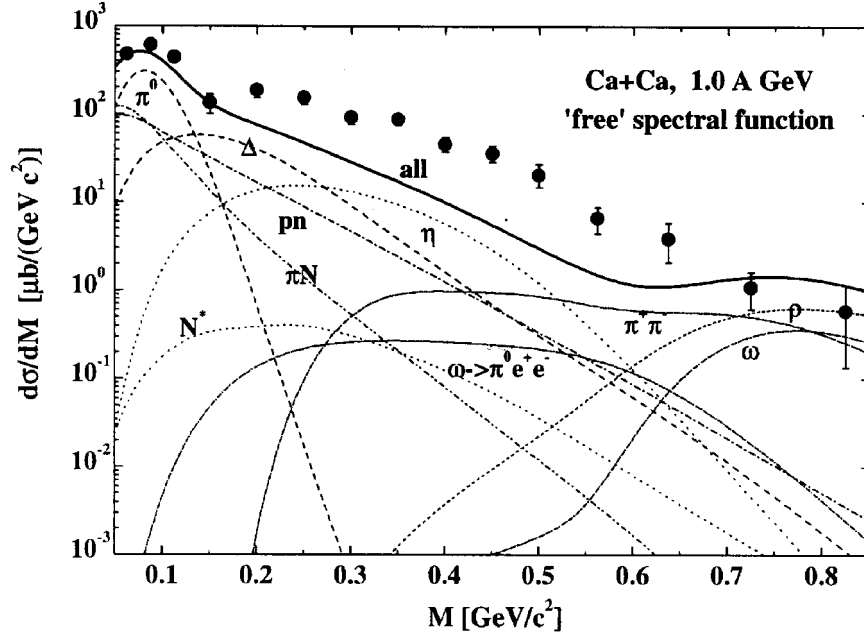


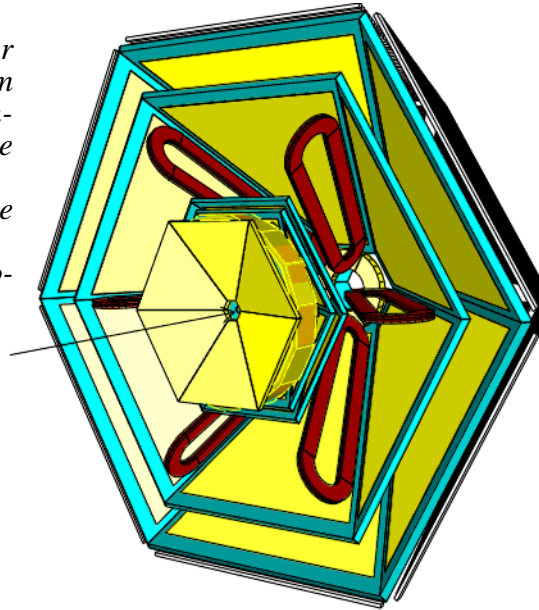
Abb. 1.7: Dileptonenspektrum der Reaktion $Ca+Ca$ bei 1 A GeV unter Berücksichtigung der DLS-Akzeptanz. Simulation nach [39]

Da das experimentelle Szenario der Schwerionenkollisionen die höchsten Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems stellt und damit die Randbedingungen für die Auslegung aller Detektorkomponenten wie auch des Datenaufnahmesystems und des Triggers festlegt, werden im wesentlichen diese in der vorliegenden Arbeit diskutiert. Das Experimentprogramm von HADES umfasst neben der Untersuchung der Mediummodifikationen bei höchsten am SIS erreichbaren Dichten noch weitere Aspekte, die kurz skizziert werden sollen:

Die Anteile der im Dileptonenspektrum unterhalb $500\text{ MeV}/c$ dominierenden Quellen η - und Δ -Dalitz-Zerfall, Nukleon-Nukleon- und Pion-Nukleon-Bremsstrahlung müssen zur quantitativen Interpretation der Daten aus Schwerionenexperimenten bekannt sein. Notwendig ist dazu ihre Bestimmung in proton- und pioninduzierten Reaktionen. Letzteres wird ermöglicht durch die Verfügbarkeit entsprechender Sekundärstrahlen an der GSI seit 1998.

Die elektromagnetische Struktur der Hadronen kann über die Messung zeitartiger Formfaktoren untersucht werden. Für das Nukleon lassen sich aus dem pn-Bremsstrahlungsanteil des Dileptonenspektrums Formfaktoren für den Bereich unterhalb der zweifachen Nukleonenmasse gewinnen, aus den Dalitz-Zerfällen neutraler Mesonen lassen sich deren Formfaktoren bestimmen. Von besonderem Interesse ist hierbei der ω -Formfaktor, der z.B. innerhalb des Vektor-Dominanz-Modells nicht zufriedenstellend erklärbar ist. Zur Untersuchung der Dalitz-Zerfälle ist die Kombination von HADES mit einem elektromagnetischen Kalorimeter (TAPS¹ [40]) zum Photonennachweis geplant.

Abb. 1.8: Der HADES-Detektor in einer 3D-Ansicht. Zu erkennen sind vor allem die Photonendetektoren des innenliegenden RICH, vier der Magnetspulen sowie die äußeren Driftkammermodule. Erkennbar ist die sechsfache azimutale Symmetrie der Detektorkomponenten. Für eine Beschreibung der Teildetektoren s. Kap. 2 und v.a. Abb. 2.1.



In pion- und protoninduzierten Reaktionen mit Wasserstoff- oder Deuteriumtargets können Nukleonresonanzen angeregt und über ihre Zerfälle in Vektormesonen (z.B. $p p \rightarrow N(1520) p \rightarrow \rho_0 p p$) mit HADES nachgewiesen werden. Hieraus lassen sich z.B. durch vergleichende Untersuchungen (Vgl. $p p$ mit $p d$) Informationen über die Isospinabhängigkeit der Vektormesonenproduktion gewinnen [42].

Ein weiterer Zwischenschritt hin zu Schwerionenreaktionen sind Proton-Kern-Reaktionen. Hierbei sind zum einen wie in pp -Reaktionen Vergleiche mit den DLS-Daten (z.B. pp , pCa) möglich, daneben können z.B. mittels eines Pionenstrahls ω -Mesonen in Kernen erzeugt werden. Über eine spezielle Kinematik erfolgt die Produktion in der Reaktion $\pi^- + p \rightarrow \omega + n$ rückstoßfrei und damit der ω -Zerfall innerhalb des Kerns, wodurch Mediummodifikationen bei normaler Kerndichte zugänglich werden [43]; der experimentelle Vorteil liegt im niedrigeren Untergrund wegen der deutlich kleineren Multiplizität verglichen mit Schwerionenreaktionen.

In der vorliegenden Arbeit wird in Kapitel 2 das HADES-Spektrometer mit seinen wesentlichen Designparametern und Teildetektoren unter besonderer Berücksichtigung des RICH-Detektors vorgestellt. In Kapitel 3 wird eine Übersicht über das angesichts der geringen dielektronischen Zerfallsbreiten essentiell notwendige Echtzeit-Triggersystem gegeben, hiernach wird in Kapitel 4 ein Algorithmus für die Ringerkennung zum Elektromessnachweis im HADES-RICH-Detektor diskutiert. Die zugehörige Triggerelektronik wird in Kapitel 5 vorgestellt. Im abschließenden Kapitel 6 werden Erfahrungen aus den bisherigen HADES-Teststrahlzeiten vorgestellt und ein Ausblick auf die weitere Systementwicklung gegeben

2 Der HADES-Detektor

In Kap. 2.1 werden die Anforderungen dargestellt, die an das HADES-Detektorsystem zur Auflösung des aus Vektormesonenzfällen stammenden Dileptonensignals innerhalb des Untergrunds einer zentralen Schwerionenkollision gestellt werden. Die zum Einsatz kommenden Detektorsysteme werden in Kap. 2.2 in ihrer Funktion und Realisierung beschrieben. Ein grundlegendes Verständnis der Detektoren ist notwendig, um die hierauf aufbauenden Triggerkonzepte und -realisierungen motivieren zu können.

2.1 Anforderungen an das Detektorsystem

Aus den Zielen des experimentellen Programms sowie aus physikalischen und apparativen Randbedingungen stellen sich folgende Anforderungen an den Detektor:

Produktions- und Zerfallsraten

Die Raten der elektromagnetischen Zerfälle von Vektormesonen in Dileptonen liegen in der Größenordnung von 10^{-5} (s. Tab. 1-1). Unter Berücksichtigung der Produktionswahrscheinlichkeiten ergibt sich hieraus z.B. in Au+Au-Kollisionen bei 1 AGeV eine Rate von 10^{-6} Dileptonen aus ρ -Zerfällen pro *zentraler* Kollision.

Daher müssen alle HADES-Teilsysteme eine hohe Ratenfestigkeit besitzen und auf Strahlintensitäten von $10^8/s$ und bis zu 10^6 Kern-Kern-Kollisionen/s ausgelegt sein.

Die in den zentralen Kollisionen auftretenden Teilchenmultiplizitäten von bis zu 200 geladenen Hadronen machen eine effiziente Elektronen¹-Identifizierung notwendig, um in den großen Ereignisraten sowie den hohen Teilchenmultiplizitäten innerhalb eines Ereignis solche mit einem potentiellen dileptonischen Zerfall eines Vektormesons zu selektieren.

Durch Konversion von gleichfalls auftretenden Photonen aus π^0 -Zerfällen sowie aus π^0 -Dalitz-Zerfällen entsteht darüberhinaus eine große Zahl von Elektronen, die unkorreliert kombiniert einen Untergrund über den gesamten Massebereich hinweg ergeben („kombinatorischer Untergrund“).

1. Wenn in der Folge Begriffe wie „Elektronen-Identifizierung“, „Elektronenimpuls“ usw. verwendet werden, sind damit -soweit nicht explizit anders gesagt - gleichzeitig Positronen gemeint.

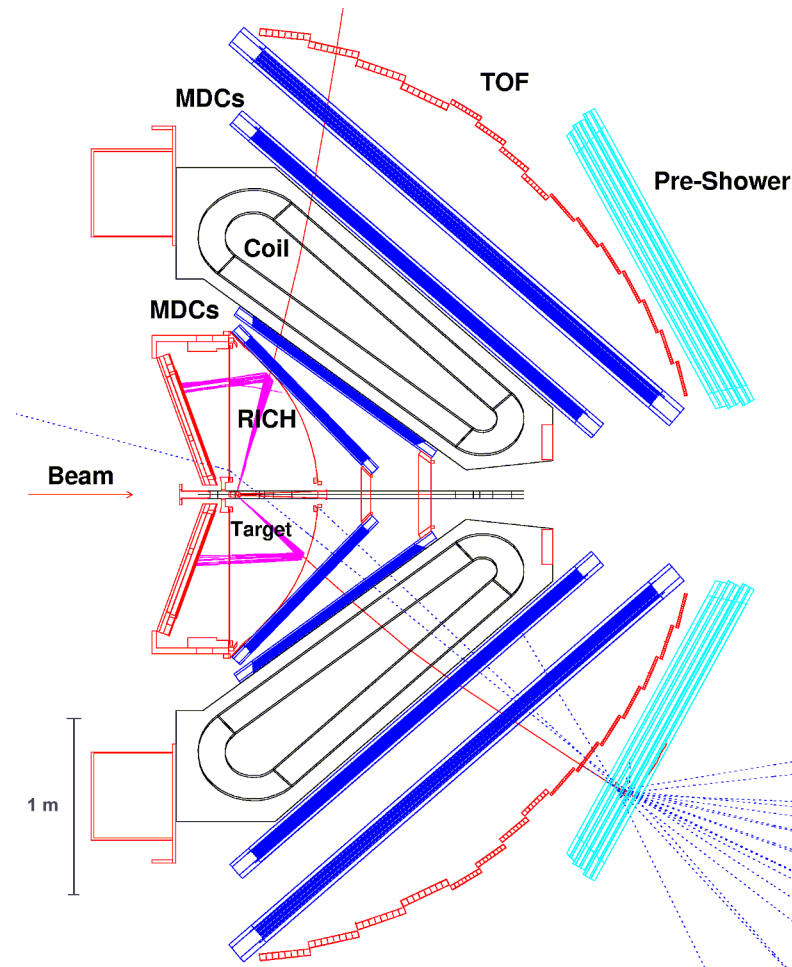


Abb. 2.1: Querschnitt durch das HADES-Detektorsystem (zwei Segmente sichtbar): um das Target der RICH, jeweils zwei MDC-Module vor und hinter den Spulen des Magneten, außen die Flugzeitwand und unter kleinen Polarwinkeln der Schauerdetektor.

Massenauflösung

HADES muß im Bereich invarianter Massen in der ρ/ω -Region eine Auflösung von ca. 1% (σ) erzielen, um ein potentiell schmales ω -Signal nicht auszuschmieren, sondern von der breiten ρ -Massenverteilung trennen zu können (vgl. Abb. 2.2).

Um daher Vielfachstreuung sowie den Untergrund durch Produktion von Sekundärteilchen zu minimieren, ist die Massenbelegung aller Detektorkomponenten möglichst gering zu halten.

Akzeptanz

Aufgrund der großen Öffnungswinkel der Dileptonen aus Zerfällen der leichten Vektormesonen von im Mittel 100° im Laborsystem muß HADES eine große geometrische Akzeptanz besitzen. Durch die verschiedenen Detektorkomponenten wird daher der Polarwinkelbereich zwischen 18° und 85° sowie fast der gesamte Azimutwinkel abge-

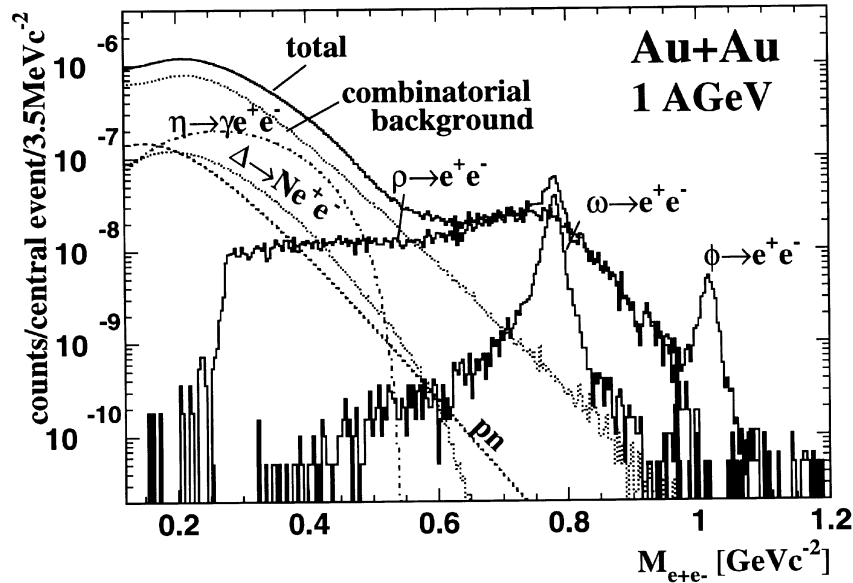


Abb. 2.2: Simulation des Dielektronenspektrum in der Reaktion Au+Au bei 1 AGeV unter Berücksichtigung der Detektorauflösung. Aufgeschlüsselt sind die einzelnen Beiträge: Bei Massen bis ca. $600 \text{ MeV}/c^2$ dominieren Δ - und η -Dalitzzerfälle sowie pn -Bremsstrahlung, darüber die dielektronischen Zerfälle der Vektormesonen. Zusätzlich ist der kombinatorische Untergrund gezeigt. Der Anteil des π^0 -Dalitz-Zerfalls unterhalb $200 \text{ MeV}/c^2$ ist nicht angegeben [44].

deckt. Letzteres wird durch die Aufteilung aller Einzeldetektoren in 6 Segmente erreicht, die jeweils 60° des Azimutwinkels (abzüglich der Rahmen und Trägerstrukturen) abdecken.

Diese Aufteilung in 6 Segmente setzt sich in weiten Teilen der nachgeschalteten Auslese- und Triggerelektronik fort¹. Im erzielten geometrischen Akzeptanzbereich (der ca. 45% des gesamten Raumwinkels entspricht) liegen 45-50% aller Dielektronen-Zerfälle mit $0,2 < m_{\text{inv}} < 1 \text{ GeV}/c^2$.

Die Impulsakzeptanz muß im Bereich von $0,1\text{-}2 \text{ GeV}/c$ hoch sein, um den gesamten Bereich physikalisch interessanter Fragestellungen abdecken zu können und bei der Untersuchung von Kontinuums-Spektren den systematischen Fehler zu minimieren.

In Abb. 2.2 ist ein simuliertes Spektrum des HADES-Detektors unter Berücksichtigung der Detektorakzeptanz dargestellt. Erkennbar ist vor allem die mögliche Trennung der ρ/ω -Signale.

2.2 Die Detektorkomponenten

Aufgrund der beschriebenen Anforderungen ist HADES, das „High Acceptance DiElectron Spectrometer“, als ein „Magnetspektrometer mit effizienter Elektronenidentifikation“ ausgelegt [44][45][46]. Die Anordnung der Teildetektoren ist aus Abb. 2.1 ersichtlich.

1. worauf in der Folge häufiger bezug genommen wird

2.2.1 Der ringabbildende Cherenkovdetektor

Im HADES-Detektor wird eine Komponente benötigt, die in einer Umgebung mit bis zu 200 geladenen Teilchen Elektronen hocheffizient nachweisen kann.

Wünschenswert ist hierzu ein Effekt, der anders als z.B. Identifizierungsmöglichkeiten über Energieverlustmethoden oder Flugzeiten über den gesamten Impulsbereich (d.h. von 0,1-2 GeV/c) hinweg und für alle auftretenden Teilchenarten von leichten Kernen bis zu Pionen und Elektronen ein möglichst exklusives Signal für Elektronen liefert.

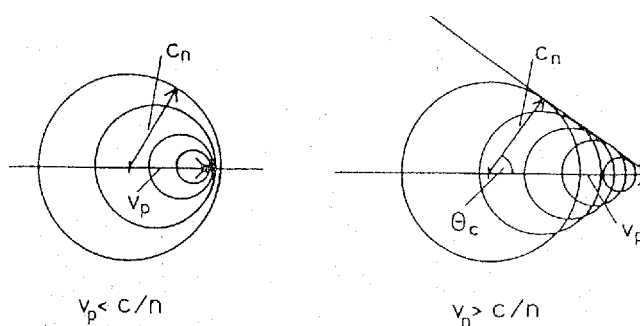
Die Tatsache, daß sich im relevanten Impulsbereich alle Elektronen näherungsweise mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, während selbst die hochenergetischen Pionen deutlich langsamer sind, macht die Anwendung eines Cherenkov-Detektors möglich.

Der Cherenkov-Effekt

Bewegt sich ein Teilchen in einem Medium mit einer Geschwindigkeit v_p , die größer ist als die Phasengeschwindigkeit c_n des Lichts in diesem Medium mit Brechungsindex n , so emittiert es unter einem festen Winkel θ_C zu seiner Flugrichtung Licht (s. Abb. 2.3) [49].

$$\cos \theta_C = \frac{c_n}{v_p} = \frac{1}{\beta n} < 1 \quad (2.1)$$

Die Tatsache der Emission kann erklärt werden aus einer unsymmetrischen Polarisation des Mediums in einer kegelförmigen Umgebung des Teilchens, die von der kleineren Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Störung verglichen mit der Teilchengeschwindigkeit herrührt.



Aus Gl. 2.1 ergibt sich, daß die Emission erst bei einer Teilchengeschwindigkeit $\beta = 1/n$ einsetzt, was man üblicherweise über den Lorentzfaktor $\gamma = E/m = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ ausdrückt

$$\gamma_{\text{thr}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}} \quad (2.2)$$

Der Emissionswinkel θ_C erreicht einen asymptotischen Wert $\theta_{\text{max}} = \arccos(1/n)$.

Da n aufgrund der Dispersion eine Funktion der Wellenlänge λ der emittierten Photonen ist, werden die Schwelle γ_{thr} sowie vor allem der asymptotische Winkel θ_{max} in Abhängigkeit von der Stärke der Dispersion im betrachteten Wellenlängenintervall ausgeschmiert.

Von Interesse für eine Umsetzung in einen Detektor ist die Anzahl N_γ und spektrale Verteilung der auf einer Länge L im Radiatormaterial erzeugten Cherenkov-Photonen[50].

$$\frac{dN_\gamma}{dL} = 2\pi\alpha Z^2 \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} [1 - (1/\beta^2 n^2)] d\lambda / \lambda^2 \quad (2.3)$$

α : Feinstrukturkonstante Ze : Ladung des Teilchens λ_1, λ_2 : Grenzwellenlängen

Das Cherenkov-Licht wird also bevorzugt bei kleinen Wellenlängen abgestrahlt.

Cherenkov-Detektoren

Detektoren auf Grundlage des Cherenkov-Effekt sind seit einigen Jahrzehnten im Einsatz. Im Grundaufbau bestehen alle aus drei Komponenten: dem von den Teilchen durchlaufenen Radiatorvolumen, in dem die Cherenkov-Strahlung entsteht, einem optischen System, daß die Photonen weiterleitet und fokussiert und einem Detektor zum Photonennachweis.

Der einfachste Typ ist der zur Teilchendifferenzierung eingesetzte Schwellen-Cherenkov-Detektor: hier wird das Radiatormaterial so gewählt, daß im betrachteten Impulsbereich eine Teilchensorte unter und eine andere über der Cherenkovschwelle liegt.

Die Detektoren können relativ einfach aufgebaut sein (s. Abb. 2.4), da nur das *Auftreten* von Cherenkov-Licht nachgewiesen werden muß, weitergehende Anforderungen an das optische System werden nicht gestellt, die Zahl der Photonendetektoren (v.a. Photomultiplier) kann klein sein, Teilchendifferenzierung ist in Echtzeit mit einfachster Logik möglich.

Durch Kombination verschiedener Radiatormaterialien können auch mehrere Teilchensorten getrennt werden. Schwellenzähler werden häufig zur Trennung von Pionen, Kaonen und Protonen eingesetzt.

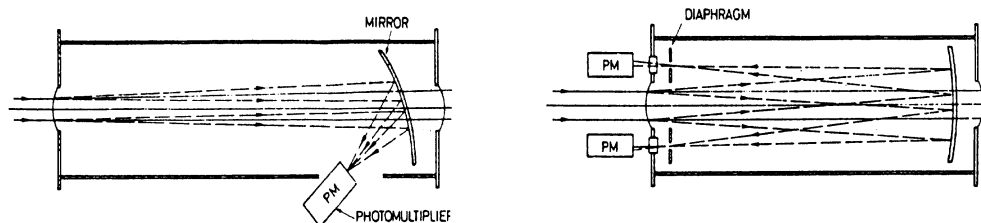


Abb. 2.4: Funktionsprinzip eines Schwellen-Cherenkov-Detektors (links) und eines differentiellen Cherenkov-Detektors (rechts) [51].

Die Weiterentwicklung des Schwellendetektors ist der differentielle Cherenkov-Detektor, der die Cherenkov-Strahlung unter einem vorgegebenen Winkel detektiert. Hierdurch kann eine direkte Geschwindigkeitsbestimmung erfolgen.

Die Komplexität des optischen Systems hängt bei diesem Typ stark von der sensitiven Fläche sowie der Länge des Radiatorvolumens¹ ab, da das auf ganzer Länge emittierte

1. das bei gasförmigen Radiatoren mehrere Meter betragen kann.

Licht auf eine variable ringförmige Apertur abgebildet werden muß, hinter der der Photonennachweis wieder mit wenigen Detektoren erfolgen kann.

Großer Nachteil differentieller Zähler ist der kleine abgedeckte Raumwinkel.

Die Weiterentwicklung der Idee, die vollständige Winkelinformation des emittierten Lichts zu nutzen, sind die ringabbildenden Cherenkov-Detektoren (**Ring Imaging CHerenkov - RICH** [51][52]). Zum Photonennachweis werden hier zweidimensional ortsauflösende Detektoren (z.B. Vieldrahtkammern oder Driftkammern mit Gas- bzw. Festkörper-Photoconvertoren) verwendet, wodurch die sensitive Fläche deutlich vergrößert wird. Aus der Lage der Cherenkov-Ringe lassen sich Ortsinformationen über die Trajektorie des produzierenden Teilchens gewinnen und im Gegensatz zum differentiellen Detektor gleichzeitig Ringe *verschiedener* Emissionswinkel auswerten.

Bei Verwendung von dünnen Festkörperradiatoren bildet das Licht auf der Detektorfläche direkt ringförmige Strukturen, deren Auswaschung klein ist („proximity focussing“). Im Fall von Gasradiatoren ist wie in Abb. 2.5 dargestellt eine optische Abbildung der Cherenkovkegel für den gesamten abgedeckten Raumwinkel notwendig. Als Abbildung ergeben sich die Kegelschnitte Kreis, Ellipse oder auch Parabel (DIRC¹)

Die Entwicklung großflächiger Photonendetektoren und optischer Systeme wurden in den letzten 20 Jahren vorangetrieben und seit den 80er Jahren werden in diversen großen Experimenten RICH-Detektoren eingesetzt.

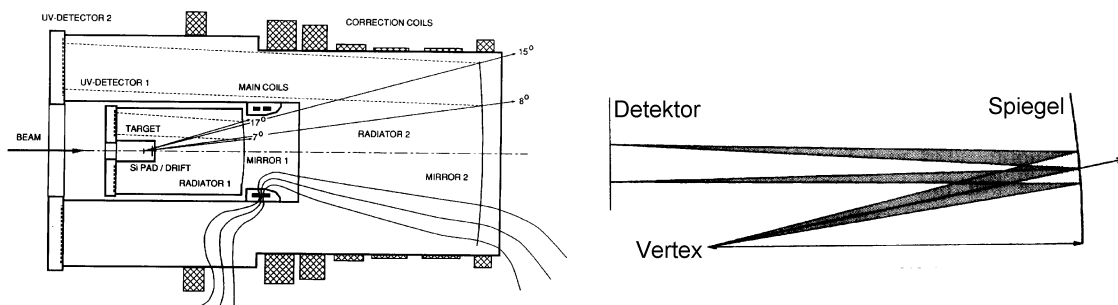


Abb. 2.5: Beispiel eines RICH-Detektors: Der CERES-Doppel-RICH am CERN-SPS (links) und der Strahlengang der abbildenden Optik (rechts) [77].

Der HADES-RICH

Der RICH für den HADES-Detektor [54] besteht aus einem großen Radiatorvolumen um das Target herum, durch das der gesamte geometrische Akzeptanzbereich von HADES abgedeckt wird. Ein sphärischer Spiegel fokussiert das Licht auf unter Rückwärtswinkeln liegende virtuelle Fokalebene, die durch ebene Vieldrahtkammern mit CsI-Photokathode approximiert werden. Eine Übersicht ist in Abb. 2.6 gegeben.

Der HADES-RICH führt keine Teilchen-Identifizierung über Ringdurchmesser durch, der Elektronennachweis erfolgt allein aufgrund des Auffindens der mit asymptotischem Durchmesser erzeugten Ringe.

1. Detection of Internally Reflected Cherenkov Light (z.B. [53])

Die Ortsinformation des RICH wird für den Dileptonen-Trigger sowie für die Teilchenzuordnung bei der Analyse der Trajektorien im Magnetspektrometer genutzt.

Im folgenden werden die einzelnen Komponenten des HADES-RICH vorgestellt.

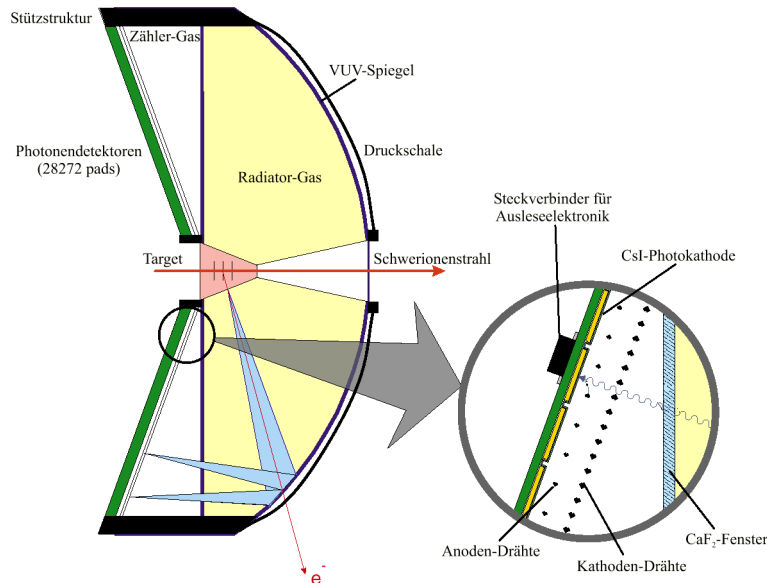


Abb. 2.6: Querschnitt durch den HADES-RICH mit den durch ein senkrechttes Fenster getrennten Radiator- und Zählgasvolumina, dem sphärischen Spiegel und Photonendetektor unter Rückwärtswinkeln. In der Vergrößerung der Aufbau des Photonendetektors [68].

Gasradiator

Als Radiator mit einer geeigneten Cherenkov-Schwelle wird C_4F_{10} verwendet. Durch seinen Lorentz-Faktor $\gamma_{thr} = 18,3$ produzieren alle Elektronen mit Impulsen >10 MeV/c Licht, Pionen erreichen erst oberhalb $2,5$ GeV/c die Cherenkov-Schwelle (die in HADES zu erwartenden Pionenimpulse liegen unterhalb 2 GeV/c). Dies sichert die wichtige Designeigenschaft, hadronenblind zu sein.

Im relevanten Impulsbereich >100 MeV/c emittieren alle Elektronen asymptotisch unter $\theta_c = 3,18^\circ$ Licht, woraus konstante Ringdurchmesser von 5 cm resultieren¹.

Auch die sonstigen Eigenschaften schließen C_4F_{10} nicht aus:

- Die Dispersion von C_4F_{10} ist klein, d.h. hat keinen Einfluss auf die Ausbreitung der Cherenkov-Kegel und damit die Bildqualität.
- Es zeigt kein ausgeprägtes Szintillationsmaximum im genutzten Wellenlängenbereich (im Gegensatz z.B. zu CF_4).

1. Die auftretenden Abbildungsfehler werden im folgenden diskutiert.

- Aus der Strahlungslänge $X_0 = 3220$ cm resultiert eine Konversionswahrscheinlichkeit von ca. 1% auf der durchlaufenen Radiatorlänge. Dieser Wert ist relativ schlecht verglichen mit dem alternativ getesteten CH_4 , das jedoch aufgrund seines Lorentzfaktors $\gamma_{\text{thr}}=31$ und der resultierenden schlechten Photonenzahlstatistik ausschied.
($N_{\text{Phot}} \propto 1/\gamma_{\text{thr}}^2$)
- Die Transmission liegt nahe 100%, im Gaskreislauf muß jedoch durch Reinigung und Überwachung die Konzentration von Verunreinigungen (H_2O , O_2) < 1 ppm gehalten werden. Schon Verunreinigungen von wenigen ppm verringern die Transmission in großen Wellenlängenbereichen um einige 10%.

Das Radiatorvolumen gehört zu den wenigen HADES-Komponenten, die nicht der sechsfachen azimuthalen Segmentierung unterliegen.

Das Gesamtvolumen ist zu den weiteren Detektoren hin durch eine Schale aus 0,4mm dickem Kohlenfaser-Komposit abgeschlossen. Diese Schale bietet die Option, bei Bedarf die Photonenzahlstatistik durch Erhöhung des Drucks (bis 1,3bar) zu verbessern.

Die Trennung zum Zählgas des Photonendetektor hin erfolgt durch ein senkrecht eingebautes CaF_2 -Fenster mit einem Durchmesser von 140 cm. Dieses ist aus 64 miteinander verklebten Hexagonen von 5mm Dicke zusammengesetzt.

Die von Teilchen aus dem Target im Radiator zurückgelegte Wegstrecke liegt in Abhängigkeit vom Polarwinkel zwischen 36 cm und 65 cm, wodurch auch die Photonenzahl um den Faktor 2 variiert.

Optisches System

Um das Cherenkov-Licht auf den unter Rückwärtswinkeln angebrachten Photonendetektor zu fokussieren, ist ein sphärischer Spiegel direkt innerhalb der Druckschale des Radiators angebracht.

Er besteht aus drei trapezförmige Paneelen pro Segment mit einem Krümmungsradius $R = 870$ mm.

Wie auch die Druckschale muß der Spiegel zur Reduktion der Vielfachstreuung¹ möglichst dünn sein, gleichzeitig aber auch hohe Anforderungen in Sachen Verwindungssteifigkeit (Krümmungsfehler $\Delta R < 3$ mm) und optische Abbildungsqualität (Oberflächenrauigkeit < 2 nm) erfüllen.

Als Trägermaterial findet daher eine 2mm starke Glaskeramik aus reinem Kohlenstoff Verwendung (Dichte = $1,5 \text{ g/cm}^3$, $X_0 = 28$ cm \rightarrow Strahlungslänge $x/X_0 < 1\%$). Alternativ werden weiterhin Glassubstrate untersucht, die in der Verarbeitung unempfindlicher sind, allerdings weniger verwindungssteif.

Das Trägermaterial ist mit der für Spiegel im VUV-Bereich üblichen Kombination aus Aluminium und MgF_2 als Oxidationsschutz bedampft. Hiermit wird eine Reflektivität $> 85\%$ über alle relevanten Wellenlängen erreicht.

1. Alle in der geom. Detektorakzeptanz liegenden Teilchen aus dem Target durchlaufen Spiegel und Druckschale, bevor sie die weiteren Detektoren erreichen!

CsI-Photonendetektor

Als Photonendetektoren finden trapezoidale ebene Vieldrahtkammern [55] Verwendung. Jeweils ein Modul pro Segment ist in Annäherung an die beiden Fokalebene des Spiegels unter -20° , d.h. unter Rückwärtswinkeln zur Strahlrichtung angebracht. Diese Position bietet den Vorteil, daß aufgrund der Reaktionskinematik nur wenige Teilchen aus dem Target als Untergrund direkt in den Photonendetektor gelangen.

Als Photokonverter dient CsI, das in den letzten Jahren vermehrt die früher gebräuchlichen gasförmigen Photokonverter (TMAE) mit ihren langen Drift- und damit Totzeiten ablöst und somit für die hohen Ereignisraten bei HADES ohne Alternative ist. Das CsI ist auf die ca. $0,25 \text{ m}^2$ großen Padebene aufgedampft, als Substrat wird eine spezielle poröse Graphit-Beschichtung¹ verwendet, die einen positiven Einfluß auf die Quanteneffizienz besitzt. Die erzielten Quanteneffizienzen zeigen einen ungefähr linearen Anstieg von 210 nm (dies legt die obere Grenze des verwendbaren Wellenlängenintervalls fest) bis zu ca. 40% Effizienz bei 145 nm (dort liegen die Abschneidekanten von Detektor- und Radiatorgas), was in Übereinstimmung mit früheren Messungen steht.

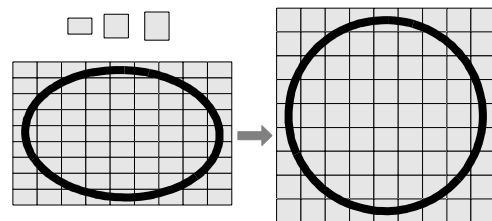
Die Gasverstärkung der aus dem CsI ausgelösten Photoelektronen im CH_4 -Detektorgas beträgt 10^5 , die Photoelektronennachweiseffizienz 95%.

Die Auslese des Ladungssignals erfolgt über 4712 Kathodenpads, auf denen durch die Geometrie der Drähte bis zu 70% der Ladung induziert wird. Die Padebene ist ein konventionelles Printed Circuit Board, auf das direkt die Ausleseelektronik aufgesteckt wird.

Die Abbildung der Cherenkov-Kegel durch den sphärischen Spiegel führt zu unterschiedliche gekrümmten polaren und azimuthalen Fokalfächen. Als Folge erscheinen in der Detektorebene unter großen Polarwinkeln Ellipsoide anstelle von Ringen.

Dieser Effekt wird weitgehend kompensiert durch die in Abb. 2.7 gezeigte Variation der Padhöhe. Während die Padbreite konstant bei 6,6 mm gehalten wird und damit die Ausrichtung der Drähte über den Pads erhalten bleibt, variiert die Höhe der Pads zwischen 4,5 mm und 7 mm.

Abb. 2.7: Die Padstruktur der Kathodenebene des Photonendetektors mit konstanter Padbreite (6,6mm) und azimuthal variierender Padhöhe von 4,5-7mm (an drei Pads beispielhaft dargestellt) und die daraus resultierende Korrektur von elliptischen Abbildungen auf der Detektorfläche in Ringbilder in Einheiten der Padkoordinaten.



2.2.2 Mini-Driftkammern

Um invariante Massen mit der geforderten Auflösung bestimmen zu können, ist es notwendig, Elektronenimpulse mit einer Auflösung von 1% zu bestimmen.

1. Resin Stabilized Graphite (RSG)

Hierzu dient ein Magnetspektrometer bestehend aus je zwei Driftkammermodulen (Mini Drift Chamber - MDC) vor und hinter einem supraleitenden Magneten.

Der Magnet besteht aus 6 Feldspulen, die ein toroidales Magnetfeld erzeugen. Diese Feldgeometrie ermöglicht es, die Region des RICH feldfrei zu halten, die 6 supraleitenden Spulen können bei einer Breite von 8cm in den Rahmenstrukturen zwischen den Detektorsegmenten untergebracht werden und reduzieren daher nicht den azimuthalen Akzeptanzbereich. Eine Ablenkung erfolgt in dieser Feldgeometrie abgesehen von Randeffekten allein in polarer Richtung. Mit einer maximalen Feldstärke von 0,7 T wird bei einer Weglänge von 0,5m ein transversaler Impulsübertrag $<100\text{MeV}$ erzielt, was die Akzeptanz im Bereich niedriger Impulse erhält.

Die geforderte Impulsauflösung ist bei gegebenem „Impulskick“ durch die Eigenschaften der spurrekonstruierenden MDCs gegeben.

Die ebenen Driftkammermodule [56] bestehen aus jeweils 6 Lagen von Driftzellen. Eine Zelle wird gebildet aus zwei Folien-Kathodenebenen und zwei Felddrähten mit dem Anodendraht („Sensewire“) im Zentrum. Die Größe der einzelnen Driftzellen liegt zwischen 5 und 14 mm, woraus die Bezeichnung „Mini-“Driftkammer resultiert. Dieser Aufbau ermöglicht durch die kurzen Driftzeiten $< 1 \mu\text{s}$ eine hohe Ereignisrate und verbessert die Ortsauflösung bei ca. 25 geladenen Teilchen pro Segment.

Die Anodendrähte sind in den sechs Lagen unter 0° , $\pm 20^\circ$, $\pm 40^\circ$ angeordnet. Die Anzahl der Lagen erlaubt ein unabhängiges Tracking vor und hinter dem Magneten. Die Signale der 26828 Anodendrähte werden in speziell entwickelten ASICs analog vorverarbeitet, die Driftzeiten digitalisiert und nullunterdrückt. Daneben wird als grobe Ortsinformation ein Muster der angesprochenen Drähte bereitgestellt.

Die benötigte Impulsauflösung von 1% ist mittels der erzielten Ortsauflösung von $<100\mu\text{m}$ erreichbar, auch für Impulse $<0,4 \text{ GeV}/c$ aufgrund einer hinreichenden Begrenzung von Vielfachstreuung durch Verwendung von Träger- und Füllmaterial¹ niedriger Dichte.

Die Spurinformatoren der MDC werden neben der Bestimmung der invarianten Dileptonenmassen noch zur Ereignischarakterisierung über Verteilungen aller geladenen Teilchen (Multiplizitäten, Winkelverteilungen) verwendet.

2.2.3 Schauerdetektor

Zur Elektronenidentifikation bei Polarwinkeln $<45^\circ$ dient ein elektromagnetischer (Prä)²Schauerdetektor.

Die Funktionsweise basiert auf dem Effekt, daß hochenergetische Elektronen³ im Gegensatz zu Protonen oder Pionen eine Kaskade aus wechselweise Bremsstrahlungsphotonen und Elektron/Positron-Paaren auslösen.

1. d.h. heliumgefüllte Zwischenräume

2. Der Vorsatz „Prä“ ist bedingt durch die Tatsache, daß der sich entwickelnde elektromagnetische Schauer nicht in seiner *gesamten* Längenausdehnung detektiert wird.

3. allgemeiner: geladene Teilchen geringer Masse

Der Schauerdetektor [57] besteht daher aus drei Lagen von Vieldrahtkammern zum Nachweis geladener Teilchen. Die Kammern werden im sog. **Self-Quenching-Streamer-Modus** betrieben, in dem jedes ionisierende Teilchen unabhängig von seiner Geschwindigkeit ($\beta\gamma$) näherungsweise die gleiche Ladungsmenge erzeugt. Zwischen den Kammern befinden sich zwei Bleikonverter mit einer Dicke entsprechend 2 Strahlungslängen, die für Elektronen im gegebenen Energiebereich eine hinreichend hohe Schauerwahrscheinlichkeit gewährleisten und gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit konkurrierender hadronischer Schauer¹ gering halten.

Elektronen lassen sich durch die Entwicklung der Anzahl geladener Teilchen über die drei Drahtkammerlagen hinweg identifizieren. Auf die Teilchenzahl kann aufgrund des SQS-Modus direkt aus der Ladung geschlossen werden, die in einer durch die transversale Schauerausbreitung gegebenen Region induziert wird. Eine Granularität von 32×32 Pads pro Detektorebene ist hierzu ausreichend.

Die insgesamt 18432 Kanäle werden über 32Kanal-Analog-ASICs ausgelesen.

2.2.4 Flugzeitwand

Zur Elektronenidentifizierung für Polarwinkel $> 45^\circ$ sowie zur Ereignischarakterisierung über die Multiplizität geladener Teilchen dient eine Wand aus Plastikszintillatorstäben [58].

Geladene Teilchen erzeugen beim Durchgang durch das Szintillatormaterial Photonen, die an den beiden Kopfenden der Stäbe über angekoppelte Photomultiplier nachgewiesen werden. Diese Signale liefern zum einen Pulshöheninformationen und zusammen mit einem Referenzsignal (z.B. aus einem Startdetektor oder Reaktionstrigger) zwei Zeitinformationen.

Hieraus lassen sich der Durchstoßpunkt im Stab (mit einer Genauigkeit von einigen Zentimetern) und die Flugzeit des Teilchens vom Target zum Stab bestimmen.

Elektronen bewegen sich im gesamten relevanten Impulsbereich näherungsweise mit Lichtgeschwindigkeit und lassen sich daher über die Flugzeit von Pionen und Protonen unterscheiden. Limitierend wirkt hier zum einen die endliche apparative Auflösung der Flugzeitsignale sowie bei den Hadronen deren Geschwindigkeitsverteilung, die sich unter Vorwärtswinkel zu höheren Geschwindigkeiten verschiebt und damit die Diskriminierungseffizienz verschlechtert.

Die Photomultipliersignale der insgesamt 1056 Szintillatoren werden in dedizierten ADC- und TDC-Boards verarbeitet, die direkt über VMEBus auslesbar sind.

Im ursprünglichen HADES-Konzept ist eine Erweiterung der TOF-Szintillatorstäbe in den vom Schauerdetektor abgedeckten Polarwinkelbereich hinein vorgesehen, um dort die Effizienz der Elektronenidentifizierung zu erhöhen.

1. Eine Schauer aus Hadronen verursacht durch inelastische hadronische Wechselwirkungen.

Aus Kostengründen wird dort vorerst der sog. „Tofino“ verwendet, ein Flugzeitdetektor bestehend aus 4 Szintillatorplatten pro Segment, die über jeweils einen Photomultiplier ausgelesen werden.

3 Das Triggersystem

Angesichts der geringen Verzweigungsverhältnisse der Vektormesonen in Dileptonen muß HADES in der zur Verfügung stehenden Zeit eine möglichst hohe Menge an Ereignissen sammeln. Das Detektorsystem soll daher bei Strahlraten des SIS von bis zu 10^8 /sec betrieben werden. Die Erhöhung der Reaktionsrate durch ein dickeres Target wird begrenzt durch die Vielfachstreuung der in einer Schwerionenkollision produzierten Teilchen im Targetmaterial. Simulationen [48] ergaben, daß bei Verwendung eines dünnen segmentierten Targets eine Reaktionsrate von 1% erzielbar ist.

Die resultierende Ereignisrate von 10^6 /s wirft zwei Fragen auf:

1. Sie muß in physikalisch sinnvoller Weise so reduziert werden, daß in der zur Verfügung stehenden Zeit sowohl die Detektoren wieder bereit sind zur Verarbeitung eines neuen Ereignis als auch eine erste Zwischenspeicherung der Daten erfolgt sein kann.
2. Darüberhinaus muß die Ereignisrate weiter reduziert werden: Bei einer von den Detektoren und der Frontendelektronik verarbeitbaren Rate von 10^5 Ereignissen pro Sekunde liegt die anfallende Datenmenge noch in der Größenordnung von 3GByte/s (vgl. Tab.3-1). Eine solche Datenmenge ist weder in Echtzeit auf ein Speichermedium transferierbar noch in der Offline-Analyse mit realisierbarem Aufwand an Zeit und Rechenleistung handhabbar.

Diese Bedingungen machen ein Triggersystem erforderlich, das bereits in Echtzeit eine Analyse der Daten durchführt und aufgrund zu bestimmender Kriterien eine Ereignisselektion vornimmt.

Table 3-1. Datenraten der Teildetektoren

Detektor	maximale Datenmenge / Ereignis (kByte)	mittlere Datenmenge / Ereignis (kByte)	mittlere Datenmenge / sec (MByte) nach First Level Trigger
RICH	60	10	1000
MDC	100	10	1000
Shower	36	7	700
TOF	8	1,6	160

3.1 Das dreistufige Triggersystem

Ein Echtzeit-Triggersystem wird in der Regel mehrstufig aufgebaut. Dies liegt zum einen daran, daß die Ziele Geschwindigkeit bzw. Selektivität unterschiedliche Anforderungen an einen Trigger stellen. Daneben wird es mit zunehmenden Ansprüchen an die Leistung des verwendeten Triggers sinnvoll, eine stufenweise Datenreduktion vorzunehmen, um sukzessive auf eine immer kleinere Datenmenge komplexere Triggeralgorithmen anzuwenden. Das HADES-Triggersystem [59][60] ist dreistufig ausgelegt (Abb. 3.1). Eine erste Stufe reduziert die Ereignisrate auf eine handhabbare Größe und initiiert die Auslese aller Detektoren. In zwei weiteren Stufen werden auf Basis diverser Detektordaten relevante Ereignisse selektiert.

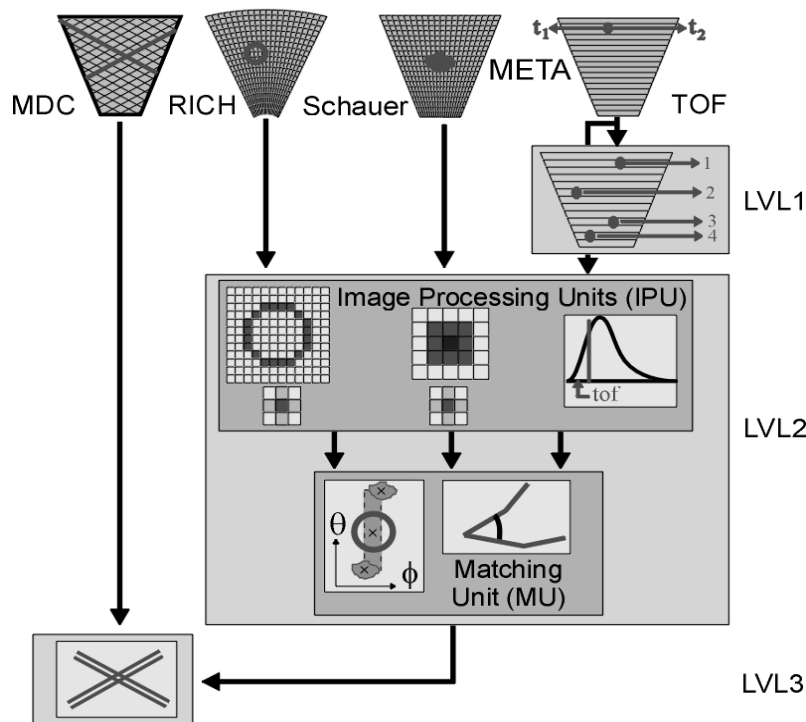


Abb. 3.1: Schematische Übersicht der dreistufigen HADES-Triggersystems mit Zentralitätstrigger (LVL1), Hardware-Dileptonen-Identifizierung (LVL2) und Trackverifikation mit MDC-Daten (LVL3).

3.1.1 Die erste Triggerstufe (Zentralitätstrigger)

Die erste Triggerstufe muß auf Basis möglichst schnell verfügbarer und verarbeitbarer Detektorinformationen eine Ereignisselektion vornehmen. Ideal läßt sie sich als Multiplizitätstrigger realisieren. Als Triggerbedingung wird das Überschreiten einer Schwelle in der Anzahl geladener Teilchen verwendet, die in der Flugzeitwand (TOF-Detektor) nachgewiesen werden.

Der TOF-Detektor bietet für den First Level Trigger den Vorteil, mit einer relativ geringen Kanalzahl einen großen Raumwinkel abzudecken und direkt die schnellen analogen Signale der Photomultiplier als Grundlage für den Trigger verwenden zu können.

Physikalisch werden über die Multiplizität geladener Teilchen *zentrale* Schwerionenkollisionen selektiert (vgl. Kap. 1.2.1). Bei einer Reduktion der Ereignisrate um einen Faktor 10 werden Reaktionen mit einem Stoßparameter $b \leq 3 - 4\text{fm}$ selektiert.

3.1.2 Der Dileptonentrigger

Kriterium zur weiteren Ereignisselektion ist letztlich allein das Auftreten von Dileptonenpaaren mit einer invarianten Masse im Bereich der Vektormesonen. Zu deren Identifizierung stehen in den folgenden Triggerstufen die Daten aller Detektorsysteme zur Verfügung.

Die Vorgehensweise des Dileptonen triggers ist in mehrere Teilschritte gliederbar:

- I. Vermittels Methoden der Teilchenidentifikation werden Elektronen-/Positronenkandidaten ermittelt.
- II. Positionsinformationen der Elektronen/Positronen werden bestimmt.
- III. Die Elektronensignaturen der Einzeldetektoren werden zu konsistenten Spuren durch den gesamten Detektor zusammengefasst.
- IV. Das Auftreten zweier solcher Spuren wird geprüft.
- V. Aus dem Öffnungswinkel der Spuren und der Ablenkung im Magnetfeld wird eine invariante Masse bestimmt.

Realisiert ist diese Vorgehensweise in zwei Triggerstufen:

- 1) Eine in Hardware implementierte Triggerstufe (Second-Level-Trigger), die bereits alle fünf genannten Teilschritte realisiert, jedoch nur auf der Basis von Informationen der Detektoren, die eigenständig eine Elektronenidentifikation leisten können. Der Second Level Trigger wird im folgenden im Detail beschrieben.
- 2) Eine nachgeschaltete Triggerstufe (Third Level Trigger), die einen Konsistenztest (Schritt III) zwischen den im Second Level Trigger ermittelten groben Trajektorien und Teilchenspuren in den MDCs durchführt, deren Daten nicht in den Second Level Trigger eingehen.
Dieser Test führt zum Verwerfen von Ereignissen, bei denen unkorrelierte Ereignisse in RICH (z.B. ein niederenergetisches Lepton) und vor allem TOF (z.B. ein Pion im Flugzeitfenster) stattfinden. Durchgeführt wird er nur unter Verwendung der Information, welche Drähte angesprochen haben, die Driftzeitinformation wird für den Trigger nicht genutzt.

Aufgrund der deutlich reduzierten Ereignisrate und der Möglichkeit des Zugriffs durch Standard-CPU's auf die benötigten Daten wird der Third Level Trigger in Software realisiert werden.

3.2 Der Second-Level-Trigger

Der Second-Level-Trigger ist unterteilt in zwei funktionale Stufen: in einer ersten Stufe werden mit jeweils detektorspezifischer Triggerelektronik Elektronen-/Positronenkandidaten ermittelt. Deren Koordinaten werden in einer gemeinsamen Triggereinheit gesammelt,

wo sie in einer zweiten Stufe zu Trajektorien korreliert werden und eine invariante Masse berechnet wird.

3.2.1 Image Processing Units

Die detektorspezifische Elektronenidentifikation für TOF-, Schauer- und RICH-Detektor findet in sogenannten „Image Processing Units“ (IPUs - „Bildverarbeitungseinheiten“) statt¹

Elektronenidentifikation im RICH

Elektronenidentifikation im RICH liefert eine Ortsinformation vor dem Magnetfeld. Zu den Prinzipien der Elektronenidentifikation mit dem RICH siehe Kap. 4, die zugehörige Triggerelektronik wird in Kap. 5 detailliert vorgestellt.

Elektronenidentifikation im Schauer-Detektor

Elektromagnetische Schauer werden durch ihre Entwicklung über die drei Detektorebenen hinweg identifiziert.

In allen Ebenen werden die Ladungssummen von jeweils 3x3 Pads gebildet, die aufgrund der zunehmenden Anzahl² geladener Teilchen im Schauer größer werden müssen [61]. Daneben wird in der letzten Ebene im zentralen Pad ein lokales Maximum der Ladung gefordert.

Die Schauer-Triggerelektronik verwendet die vollständige Pulshöheninformation des Detektor. Da die Karte gleichzeitig Auslesefunktionalität erfüllt, ist dies ohne Mehraufwand möglich.

Realisiert ist der Schauer-Trigger in FPGAs³, die ähnlich dem RICH-Trigger parallel arbeitende Einheiten des Pipeline-Algorithmus enthalten und die einkommenden Daten zeilenweise bearbeiten [62].

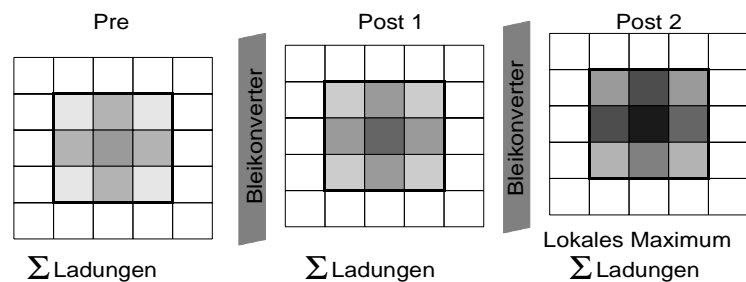


Abb. 3.2: Schematische Übersicht des Triggers für den Schauerdetektor: In allen drei Detektorebenen wird die Ladungssumme über jeweils 3x3 Pads gebildet. In der letzten Detektorebene muß darüberhinaus ein lokales Maximum (8 Nachbarn) vorliegen.

1. Der Begriff „Bildverarbeitung“ ist historisch gewachsen und etwas irreführend. Zutreffender ist „Mustererkennung“ (auch dies nur unter Ausnahme des TOF-Triggers)
2. Aufgrund des Self-Quenching-Streamer-Mode ist allein die Teilchenanzahl für die Ladung entscheidend.
3. **Feld**Programmierbare Gate-Arrays; für eine nähere Beschreibung dieser Logikbauteile s. Kap. 4.2.3.1

Elektronenidentifikation in der Flugzeitwand

Aufgabe des TOF-Triggers ist die Diskriminierung der Elektronen mittels ihrer Flugzeit vom Target zu den Szintillatorstreifen des TOF-Detektors.

Der TOF-Trigger [63] erhält hierzu für jeden angesprochenen Szintillatorstreifen je zwei TDC- und ADC-Datenworte. Die TDC-Werte ergeben sich aus einem Startsignal durch den Szintillatorstreifen selbst und einem (verzögerten) gemeinsamen Stop-Signal durch den HADES-Startdetektor.

Die Daten müssen in der Triggerelektronik mehreren Verarbeitungsschritten unterzogen werden:

Ortskalibration

Bestimmung der Zeitdifferenzen TL/TR (links/rechts)

Zeitkalibration

Zeitkorrektur

Über eine Schwelle auf die Größe Flugzeit/Weglänge werden Elektronen selektiert. Verglichen mit der RICH- oder Schauer-Triggerelektronik sind die Datenmengen deutlich geringer, die durchzuführenden algebraischen Operationen jedoch komplexer.

Zur Anwendung kommen daher digitale Signalprozessoren¹ (DSP) mit einem 32bit-Fließkomma-Rechenwerk. Der Triggeralgorithmus ist in Teilschritte untergliedert in einer Anordnung aus sechs DSPs pro Segment implementiert.

3.2.2 Matching Unit

Die Ortsinformationen der IPU's werden in der Matching Unit [64] zusammengeführt. Dort werden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- I. Die von den IPU's gelieferten detektorspezifischen Koordinaten werden in Polarkoordinaten des Laborsystems transformiert.
- II. Paare von Ringkandidaten mit Öffnungswinkeln $< 30^\circ$ (minimaler Öffnungswinkel in ω -Zerfällen) werden verworfen, da sie wahrscheinlich aus π^0 -Dalitz-Zerfällen (mittlerer Öffnungswinkel 13.4° im Bereich der HADES-Akzeptanz für 1 AGeV AuAu) stammen.
- III. Elektronenkandidaten des RICH werden mit Kandidaten der äußeren Detektoren TOF oder Shower zu einer Elektronentrajektorie korreliert, wenn sie sich in Polar- und Azimutwinkel nur um einen Betrag unterscheiden, der durch die im wesentlichen polare Ablenkung im Magnetfeld erklärbar ist.
- IV. Für jeweils zwei solcher Kandidaten wird aus ihrem Öffnungswinkel vor dem Magnetfeld und der Ablenkung im Magnetfeld eine invariante Masse bestimmt.

$$M_{\text{inv}}^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 \approx 2 \cdot p_1 p_2 \left(1 - \frac{\cos \alpha}{2}\right)$$

für $m \ll p$

1. Analog Devices ADSP2106x (SHARC)

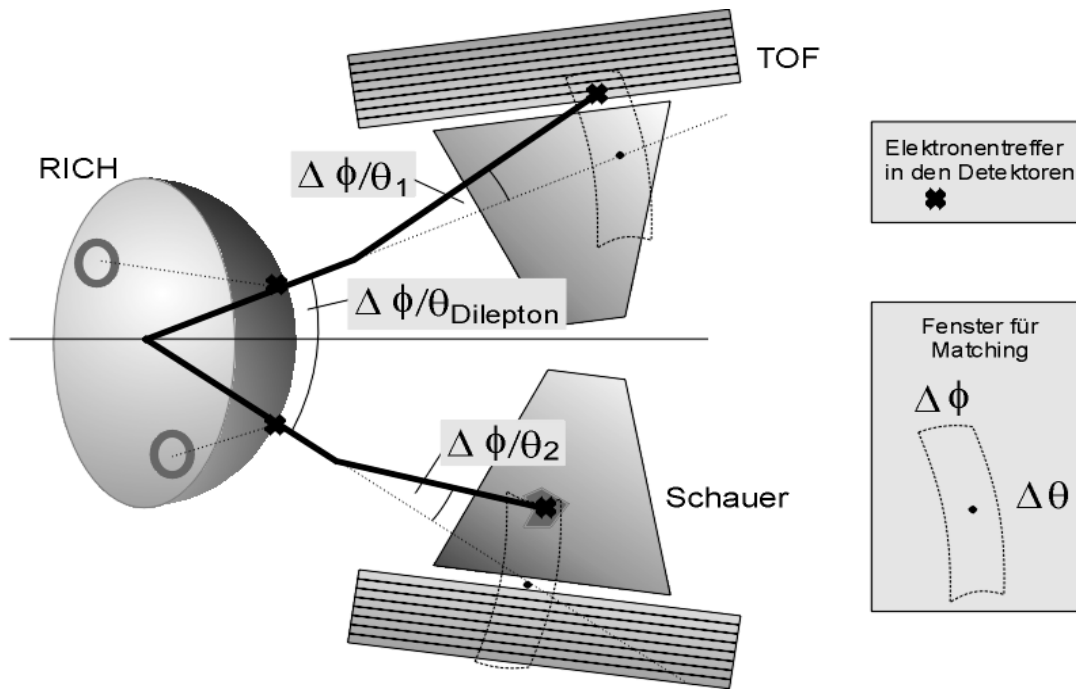


Abb. 3.3: Schematische Übersicht der Funktionalität der Matching Unit des Second Level Triggers: Die Positionen von Treffern im RICH definieren Winkelfenster im Schauer- bzw. TOF-Detektor. Nach zwei erfolgreichen Korrelationen mit Treffern in einem dieser Detektoren kann aus dem Öffnungswinkel vor dem Magnetfeld und der Ablenkung im Feld eine invariante Masse bestimmt werden.

- V. Liegt die invariante Masse in einem Fenster um die Masse der Vektormesonen ρ und ω , ist die Bedingung für einen positiven Second-Level-Trigger erfüllt. Die Triggerentscheidung wird an das HADES-Triggerverteilungssystem weitergegeben.

Die Aufgaben der Matching Unit sind in mehreren DSPs implementiert. Deren Kombination von schnellem Rechenwerk und internen Speicher von bis zu 500 kByte ermöglicht die effiziente Berechnung aller nötigen winkelabhängigen Größen mittels einer Interpolation zwischen Stützstellen, die im Speicher abgelegt sind.

3.3 Trigger-Performance

Der Second-Level-Trigger muß 10^5 Ereignisse/s verarbeiten können. Dies bedeutet nicht, daß zur Durchführung aller beschriebenen Aufgaben nur $10 \mu\text{s}$ pro Ereignis zur Verfügung stehen.

Jeder Teil der Triggerelektronik ist in eine Sequenz von Teilschritten aufgegliedert, nach Durchlaufen eines Teilschrittes werden die Daten eines Ereignis an die Hardware des nächsten Schrittes weitergeleitet ("Pipelining", s. Abb. 3.4).

Nur für jeden der Teilschritte ist sicherzustellen, daß er im Mittel nicht länger als $10 \mu\text{s}$ dauert. Folgen auf Teilschritte, die *streng* dem $10 \mu\text{s}$ -Zeitschema gehorchen, solche mit datenmengenabhängiger Verarbeitungszeit, müssen Zwischenpuffer vorgesehen werden.

Der Second-Level-Trigger ist somit in der Lage, im Mittel alle $10 \mu\text{s}$ neue Eventdaten *übernehmen* zu können.

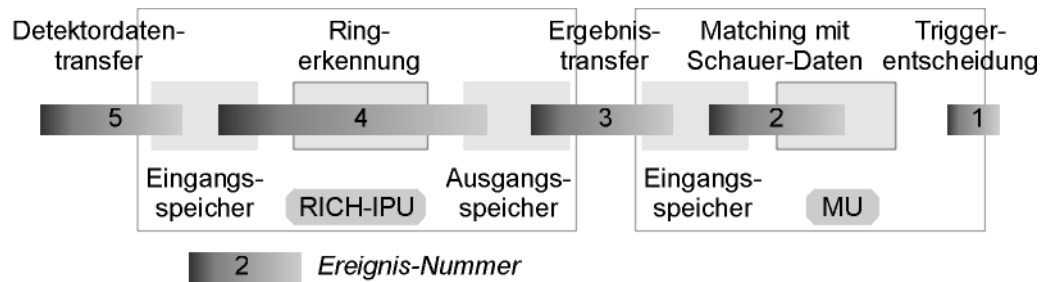


Abb. 3.4: .Konzept des "Pipelining" der Ereignisdaten im Second-Level-Trigger (vereinfachte Darstellung): Keiner der n Verarbeitungsschritte (graue Balken) darf für ein Einzelereignis im Mittel $10\mu\text{s}$ überschreiten, die mittlere Verweildauer eines Einzelereignis im Trigger beträgt $n \cdot 10\mu\text{s}$, eine neue Triggerentscheidung steht alle $10\mu\text{s}$ zur Verfügung.

Von Bedeutung ist daneben die Zeit vom Eintreten eines Ereignisses in den Second-Level-Trigger bis zum Vorliegen der Triggerentscheidung für dieses Ereignis, die sogenannte *Latenzzeit*. Von ihr hängt direkt die Größe der in allen Auslesesystemen notwendigen Fifos und SRAMs ab, welche die vollständigen Eventdaten bis zu einer Triggerentscheidung zwischenspeichern.

Die Latenzzeit des Second-Level-Trigger wird wesentlich bestimmt durch die DSP-basierten Systeme TOF-Trigger und Matching Unit.

Die FPGA-basierten Mustererkennungseinheiten für RICH und Schauer arbeiten mit einer festen Datenmenge, da jeweils die vollständigen Detektorebenen auf Elektronensignaturen überprüft werden müssen. Dies führt zu fixen und wegen der parallelen Verarbeitung kurzen Latenzzeiten ($10\mu\text{s}$ für die eigentliche Mustererkennung + ca. $20\text{-}30\mu\text{s}$ für den Datentransfer zu und von den FPGAs).

Die Latenzzeiten der DSP-basierten Systeme sind aufgrund der sequentiellen Verarbeitung ereignisabhängiger Datenmengen länger und weniger determiniert (s. Tab.3-2).

Für den gesamten Second-Level-Trigger ergibt sich hieraus eine Latenzzeit von $200\mu\text{s}$, worauf die Größe der Auslese-Zwischenspeicher ausgelegt ist (d.h. zur Aufnahme der Daten von 20 Ereignissen¹). Die $200\mu\text{s}$ sind daher bei der Realisierung des Triggers nicht als mittlere Latenzzeit, sondern als *Obergrenze* zu behandeln, deren Überschreiten durch Anhalten der Datenaufnahme Totzeiten zur Folge hat.

1. Dieser Wert entspricht den Spezifikationen. In den realisierten Auslesesystemen können ≥ 40 Ereignisse zwischengespeichert werden. Durch eine Auslegung des Zwischenspeichers auf n Ereignisse *maximaler* Datenmenge wird die zeitliche Randbedingung weniger scharf.

Table 3-2. Einige Leistungsparameter der Komponenten des Second-Level-Triggers

Second-Level-Trigger-Komponente	Verarbeitete Datenmenge (MByte / sec * Segment)	Rechenoperation (10^6 /sec)	Latenzzeit (μ s)
RICH-IPU	Pattern: 116 Koordinaten: 40	14000 ^a	30-40
Schauer-IPU	310	3400 ^a	30
TOF-IPU	56	56	70-80
Matching Unit	12	11	120

a. Die Zahl der Rechenoperationen kann für die kombinatorische Logik nur näherungsweise durch eine Umrechnung in „prozessoräquivalente“ Operationen angegeben werden

3.4 Trigger-Effizienz

Die Ermittlung der Effizienz aller Triggeralgorithmen war eines der wichtigen Ziele während der ausführlichen Detektorsimulationen in der Designphase des HADES-Detektors ([44],[48],[65]).

Zeitlich weit vor der Umsetzung in die Hardware wurden in den Simulationen neben den komplexeren Offline-Analyseverfahren auch in Hardware implementierbare Algorithmen auf ihre Effizienz untersucht.

Neben der Effizienz der Elektronenerkennung ist ein wichtiger Punkt die Anzahl falsch identifizierter Kandidaten: ein zu hoher Wert mindert die Selektionsfähigkeit für Dileptonenereignisse.

Hauptgründe für Fehlidentifikationen sind zum einen durch die Hardwarealgorithmen nicht zu diskriminierende verfälschende Ereignisklassen als auch apparative Limitierungen:

TOF

Die Diskriminierung der Flugzeitverteilung für Elektronen gegenüber derjenigen der Hadronen wird letztlich begrenzt durch die Zeitauflösung der verwendeten Szintillations-Detektoren. Vor allem schnelle Pionen können in das Flugzeitfenster für Elektronen fallen.

Unter kleineren Polarwinkeln laufen die Geschwindigkeitsverteilungen aufgrund des Lorentzboost weiter ineinander. Daher wird hier zusätzlich der Schauerdetektor eingesetzt.

Schauerdetektor

Fehlidentifikationen kommen hier im wesentlichen durch Doppeltreffer zustände (z.B. ein Photon und ein Proton), die in den verschiedenen Lagen eine elektronenartige Signatur ergeben.

Für Elektronenimpulse < 400 MeV/c fällt die Schauererkennungs-Effizienz schnell auf 60-30% ab.

RICH

Eine detaillierte Diskussion der aktuellen Effizienzen und Fehlerraten für die RICH-Trigger Elektronik erfolgt in Kap. 4.3, mögliche Untergrundereignisse werden in Kap. 4.1 beschrieben.

In Tab.3-3 sind die aus den Simulationen gewonnenen Effizienzen und Fehlerraten für die verschiedenen Teilsysteme aufgeführt.

Table 3-3. Elektronennachweis-Effizienzen und Fehlidentifikationen durch die verschiedenen Triggerkomponenten (nach [48])

Detektor	Polarwinkel	Effizienz $m_{inv} = 0,5-1,0 \text{ GeV}/c^2$	Falsch identifizierte Kandidaten / Ereignis
TOF	45°-85°	85 %	6
Schauer	18°-45°		6
RICH	18°-85°	90 %	0,5

Eine Reduktion der Gesamtfehlerrate erfolgt durch die Korrelation in der Matching Unit. Daher führen fehlidentifizierte Elektronen in den Einzeldetektoren nicht zwangsläufig zu einem positiven Trigger und sind daher tolerabel, solange durch ihre Kombinatorik keine zu hohe Rate zufällig korrelierter Ereignisse auftritt.

Mittels der Größe der gewählten Fenster für gültige RICH-Meta-Korrelationen läßt sich *bestimmen*, daß der gesamte Second-Level-Trigger die Ereignisrate um einen Faktor 100 reduzieren kann.

3.5 Simulation des Datenaufnahme- und Triggersystems

Angesichts der Komplexität des HADES-Trigger- und Datenaufnahmesystems, in dem eine Vielzahl von Modulen miteinander in Verbindung treten und Datentransfers realisieren oder steuern müssen, stellt sich die Frage, inwieweit die hierbei auftretenden Abhängigkeiten und Korrelationen noch überschaubar bleiben.

Wichtig ist dies vor allem im Hinblick auf die realisierbaren effektiven Datenraten und damit verbunden auch speziell Triggereffizienzen sowie für die Diagnostik und Behebung auftretender Probleme wie Ineffizienzen oder Stillstände im Gesamtsystem.

Diese Fragestellungen sollten durch eine eigenständige Simulation behandelt werden. Ziel war es, eine Beschreibung des Datenaufnahme- und Triggersystems zu erstellen und auf den Informationsgehalt im Hinblick auf die skizzierten Fragestellungen zu untersuchen.

3.5.1 DAQ- und Trigger-Simulation - eine Abgrenzung

Da der Begriff "Simulation" sowohl im Zusammenhang mit Experimenten der Teilchenphysik als auch bei der Elektronikentwicklung in sehr unterschiedlicher Weise verwendet

wird, soll eine kurze Charakterisierung der angesprochenen Simulation sowie eine Bestimmung der Grenzen und Schnittstellen zu anderen Arten von Simulationen erfolgen.

Bei dem zu entwerfenden Modell handelt es sich um eine Simulation der essentiellen Elemente im Datenaufnahmesystem¹ wie z.B. Analog-Digital-Konverter als Datengeneratoren, Fifos oder Memories als Zwischenspeicher oder der verarbeitenden Elemente (z.B. Logik für Triggerentscheidungen, Komprimierung, Ereigniserstellung) sowie der Datenflüsse zwischen diesen Elementen und der damit zusammenhängenden Steuersignale.

Es handelt sich daher *nicht* um eine Detektorsimulation, wie sie z.B. auf Basis des GEANT-Pakets erstellt werden, oder um eine Erweiterung einer solchen Simulation hin zum Datenaufnahmesystem. Informationen aus den Detektorsimulationen werden zur Bestimmung der eventweise anfallenden Anfangsdatenmengen in den einzelnen Subdetektorsystemen benötigt, dies eventuell auch unter Berücksichtigung lokaler Schwankungen.

Diese Informationen werden in der Simulation nur als phänomenologische Parameter verwendet, eine weitergehende Verzahnung existiert nicht.

Es handelt sich auch *nicht* um eine Simulation der Datenaufnahme- und Triggerelektronik auf dem Niveau einzelner elektronischer Signale, wie sie für die interne Logik programmierbarer Bauteile oder für kleine Gruppen von Bauteilen durchgeführt werden, wenn diese in einer geeigneten Hochsprache wie z.B. VHDL² beschrieben sind. Eine solche Beschreibung enthält zwar alle notwendigen Informationen, ist aber aufgrund ihrer Detailliertheit nicht ansatzweise für das Gesamtsystem verwendbar.

3.5.2 Diskrete Event-Simulation

Der Typ von Simulation, der der Aufgabenstellung angemessen ist, ist die sogenannte "diskrete Event-Simulation", für die diverse Softwaretools zur Erstellung eines konkreten Modells existieren.

In einer Systematik von Modellen zur Simulation unterscheidet man zwischen kontinuierlichen und diskreten Modellen sowohl im Hinblick auf die Modellierung des zeitlichen Ablaufs als auch im Hinblick auf die in der Simulation realisierbaren Systemzustände. In kontinuierlichen Modellen wird das Modellsystem durch Differentialgleichungen beschrieben, zeitlicher Ablauf und mögliche Zustände sind kontinuierlich³, in digitalen Modellen wird in diskreten Zeitabständen zwischen endlich vielen Zuständen gewechselt. Einfache Beispiele digitaler Modelle sind die sog. "State machines", mit denen komplexere Ablaufsteuerungen in programmierbarer Logik realisiert werden.

"Diskrete Event-Modelle" werden gesteuert durch das Auftreten instantaner Ereignisse ("Events"). Verbunden mit jedem Event ist eine Zeitinformation über sein Auftreten und ein Satz von Regeln, der die mit dem Event verbundenen Änderungen an Objekten der Simulation (und damit des Systemzustands) beschreibt. Aufgrund der Flexibilität der Regeln und der Zeitinformation (verglichen z.B. mit festen Zeitintervallen) können prinzipiell kontinuierliche Zeitabläufe und Zustände beschrieben werden; im Gegensatz zu kontinuierlichen Simulationen wird jedoch nur eine *endliche* Anzahl von Zustandsänderungen in einem *endlichen* Zeitintervall beschrieben.

1. Der Begriff "Datenaufnahmesystem" schließt im folgenden das Triggersystem mit ein.

2. VHSIC Hardware Description Language (VHSIC - Very High Speed Integrated Circuit)

3. im Rahmen der Praktikabilität (Ressourcen, Rechengenauigkeit,..)

Typische Anwendungsfälle für diskrete Event-Simulationen sind Produktionsabläufe oder Logistikprobleme.

Zur Durchführung von Simulationen des HADES-Datenaufnahmesystems wurde die Sprache *MODSIM* gewählt, die bereits bei der Simulation diverser kommerzieller Projekte eingesetzt wurde.

Hierbei handelt es sich um eine vollständige Programmiersprache, die damit alle gängigen Konstrukte (Variablen, Kontrollstrukturen, Funktionen) zur Beschreibung der Systemzustände und der Übergänge zur Verfügung stellt.

Die Objektorientiertheit MODSIMs ist gerade zur Beschreibung von Systemen wie dem Fluß von Produkten durch ein Maschinensystem oder von unterschiedlichen Datenpaketen durch ein System aus Fifos, Triggereinheiten usw. gut geeignet.

Neben den herkömmlichen Sprachkonstrukten enthält MODSIM Konstrukte zur Modellierung der Zeitabhängigkeiten, d.h. zur Beschreibung von Wartezeiten zwischen Events, von zeitlichen Abfolgen ("B wartet auf A", "Wenn A, dann B") oder zustandsabhängigen Abläufen (Interrupts, "Falls A, dann B").

Zur Verwaltung der zeitlichen Abfolge der Events existiert ein sogenannter "Scheduler", der eine zeitlich geordnete Liste der anstehenden Events verwaltet, die Ausführung der Regeln des aktuellen Events initiiert, hieraus resultierende neue Events einfügt und die Simulationszeit hiernach auf den Zeitpunkt des nächsten Events weiterstellt.

Weitere wichtige Komponenten des Pakets sind Zufallszahlengeneratoren und Hilfsmittel zur Ergebnissammlung und -analyse.

3.5.3 Modellierung des HADES Datenaufnahme- und Triggersystems

Bei der Konzeption einer Simulation des Datenaufnahmesystems muß unterschieden werden zwischen den eigentlichen (Hardware-)Elementen des Systems, die permanent in der Simulation vertreten sind, temporären Elementen wie Datenpaketen, die zwischen zwei oder mehreren der permanenten Elemente weitergeleitet werden, und Simulationsobjekten, die z.B. die Struktur des Systems bestimmen, Ausgangsdaten generieren sowie Status- und Fehlerinformationen sammeln.

Erstellt wurden Klassen für die Readoutsysteme (Eventerzeugung), für die gängigen Speicherelemente (Fifos, Memorys) mit den benötigten Funktionalitäten¹ (neben dem Speichern z.B. das Verwerfen von Daten, das Zusammenfassen zur Auslese), für die Verteilung von Datenströmen (Multiplexer), für die diversen Arten von datenverarbeitenden Elementen (Nullunterdrückung, Triggeralgorithmen) und ihre detektorspezifischen Varianten.

Klassen für die Daten ermöglichen eine variable Einstellung der Datenmenge (Wortanzahl, Datenbreite) sowie beinhalten Informationen über die Art der Daten, die Eventzugehörigkeit sowie den Fluß durch das System.

Zeitabhängiges Verhalten kann sowohl in den einzelnen Hardwarekomponenten (Verarbeitungszeiten) als auch bei deren Verbindungen (Laufzeiten) eingestellt werden.

1. die in der Hardware zum Teil nur über zugeordnete Logik realisierbar sind

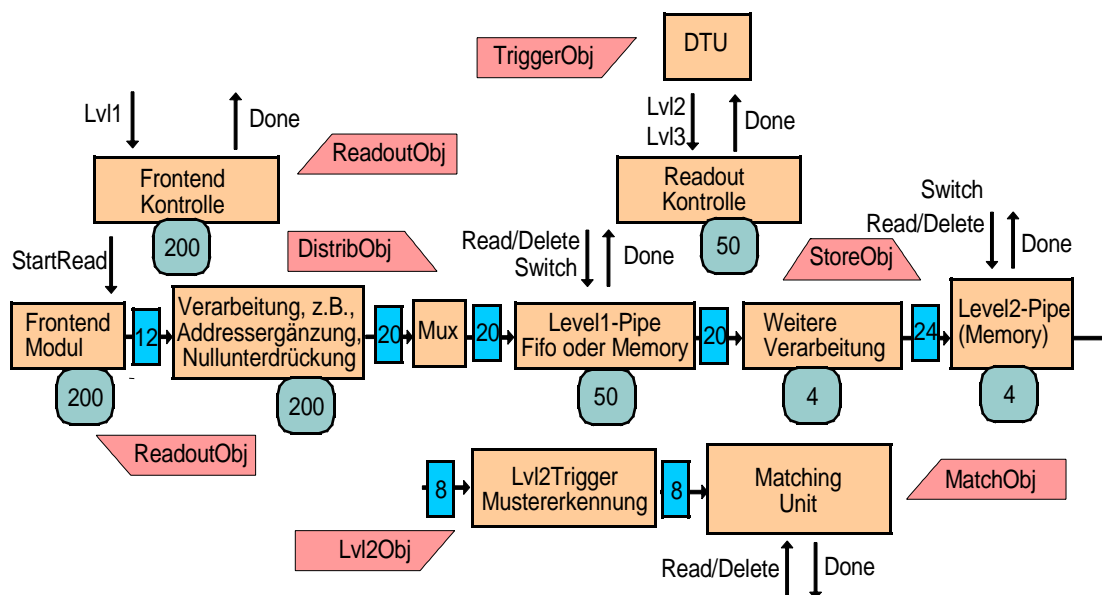


Abb. 3.5: Schematische Übersicht der Umsetzung des Datenaufnahmesystems in die Simulation: In den Kästen die Elemente der Datenaufnahme (Rauten zeigen zugrundeliegende Klassen, z.B. "ReadoutObj"), die Pfeile zeigen Hauptdatenpfade und wichtige Einzelsignale; die Zahlenwerte geben angenommene Zeiten für Datenverarbeitung und -transport an (in ns).

Für Teilsysteme der Datenaufnahme (ein schematisches Beispiel ist in Abb. 3.5 dargestellt) wurden auf Basis der vorliegenden Systemspezifikationen Simulationen der Datenflüsse durchgeführt.

Speziell für das System des Second Level Triggers wurden erste Simulationen durchgeführt, die aber z.B. noch eine FPGA-basierte Matching Unit enthielten. Ablesbar aus diesen ersten Tests ist z.B. neben der kombinatorisch bedingten Abhängigkeit der Latenzzeit des Second-Level-Trigger von der Datenmenge die Abhängigkeit vom Vorhandensein eines Dileptons, die aufgrund des sofortigen positiven Trigger zu einer kürzeren Verarbeitungszeit der zugehörigen Ereignisse führt (s. Abb. 3.6)

Wichtige Aspekte bei der Durchführung der Simulationen sind zum einen der benötigte Personalaufwand, um die Simulation des sich auch jetzt noch ständig verändernden Systems auf einem Stand der Aktualität zu halten, der aussagekräftige Ergebnisse ermöglicht, sowie die möglichst genaue Spezifikation der Fragestellungen an das System, um den Umfang der Simulation in geeigneter Weise einschränken zu können.

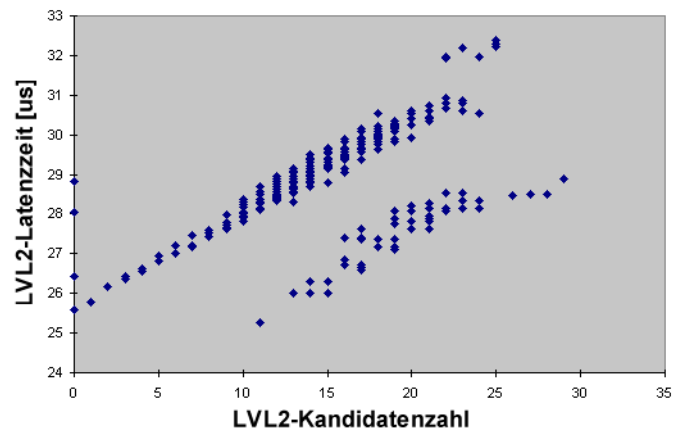


Abb. 3.6: *Abhängigkeit der Latenzzeit des Second-Level-Triggers von der Zahl der Elektronen-Kandidaten in den Einzeldetektoren. Der untere Ast enthält Ereignisse mit positivem Trigger, bei denen nicht alle Kombinationen abgearbeitet werden. Die dargestellten Zeiten gelten für eine FPGA-basierte MatchingUnit.*

4 Ringerkennung

Die Triggerelektronik für den RICH-Detektor hat als wesentliche Aufgabe die Erkennung von Ringmustern auf der Detektor-Padfläche zu leisten. In Abb. 4.1 ist die Detektorbelegung für ein Ereignis einer Schwerionenkollision Au+Au bei 1 AGeV darstellt. Ablesbar sind hierin einige Randbedingungen der Ringerkennungsaufgabe: zu identifizieren sind aufgrund der Photonenstatistik unvollständige Ringe; neben den Ringen existiert ein Untergrund aus vereinzelt Pads sowie aus größeren Gruppen von Pads.

In Kap. 4.1 werden daher kurz die bei HADES relevanten Parameter für die Qualität der Ringe sowie die Untergrundquellen referiert. In Kap. 4.2 werden grundlegende Verarbeitungsschritte bei der Mustererkennung sowie Algorithmen zur Mustererkennung vorgestellt. Unter Berücksichtigung einer effizienten Implementierbarkeit wird der verwendete Hardware-Algorithmus in seiner Grundidee sowie verschiedenen möglichen Variationen

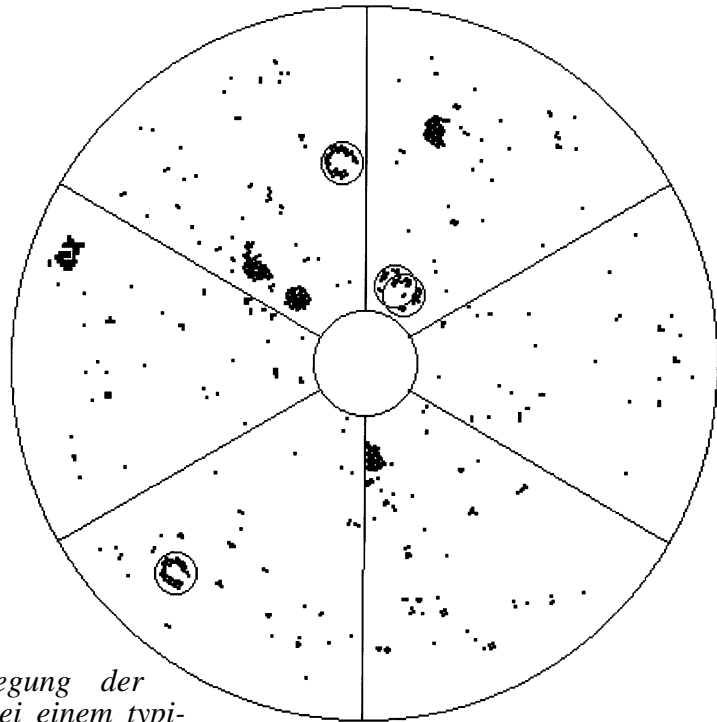


Abb. 4.1: Die Belegung der RICH-Detektorebene bei einem typischen Dileptonen-Ereignis der Simulation Au+Au bei 1 AGeV [44]. Ringe ergeben sich für ein Dileptonenpaar nach einem Vektormesonenzерfall, darüberhinaus ist ein Konversions-Doppelring erkennbar.

vorgestellt. Die Qualität der Hardware-Algorithmen wurde an simulierten Daten getestet. Kap. 4.3 stellt die Bewertungskriterien und die hiermit ermittelte Leistungsfähigkeit der Algorithmen dar.

4.1 Leptonenidentifizierung mit dem RICH

Die Effizienz der Elektronenidentifizierung hängt ab von der Ausprägung des Ringbildes, also der Anzahl an Photonen bzw. Photonenclustern, die den Ring konstituieren, sowie korreliert damit von der Stärke der Untergrundsignale, die unter das Ringbild gemischt sind. Für die in der vorliegenden Arbeit im Vordergrund stehende hardwarebasierte Ringerkennung und die damit erzielbare Ortsauflösung spielen weitergehende Effekte wie Dispersion oder Kleinwinkelstreuung keine Rolle.

4.1.1 Photonenstatistik

Unter Berücksichtigung aller in das in Kap. 2.2.1 beschriebene System eingehenden Effizienz-, Transmissions- und Reflexionswerte kann man mit Hilfe von Gl. 2.3 die Zahl der im HADES-RICH *detektierten* Photonen berechnen.

Vernachlässigt man die Dispersion, kann Gl. 2.3 umgeschrieben werden zu

$$N_{\text{det}} = \frac{L}{\gamma_{\text{thr}}^2} N_0 \quad (4.1)$$

mit N_0 im Fall des HADES-RICH

$$N_0 = 2\pi\alpha \cdot T_{\text{Det}} \cdot \epsilon_{\text{se}} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{\text{Ra}} \cdot R_{\text{Sp}} \cdot T_{\text{F}} \cdot \epsilon_{\text{Q}} d\lambda / \lambda^2$$

λ_1, λ_2 : Grenzwellenlänge des verwendbaren Intervalls

T_{Det} : Transmission der Drähte im Photonendetektor

ϵ_{se} : Nachweiswahrscheinlichkeit für einzelnes Photoelektron im Photonendetektor

T_{Ra} : Transmission des Radiatorgases C_4F_{10}

R_{Sp} : Reflektivität des Spiegels

T_{F} : Transmission des CaF-Fensters

ϵ_{Q} : Quanteneffizienz der CsI-Photokathode

Der Wert von N_0 liegt bei HADES von der Gegend von 109, was in Abhängigkeit vom Polarwinkel und damit der Radiatorlänge 12-21 Photonen pro Ring ergibt [54].

4.1.2 Untergrundzusammensetzung

Der im Photonendetektor auftretende Untergrund, der zum Ansprechen von Pads Beiträge leistet, setzt sich aus den folgenden Quellen zusammen (nach [48]):

- *Direkte Ionisation in der Verstärkungszone des Photonendetektor durch geladene Hadronen aus dem Target.*
Deren Zahl ist aufgrund der -20° -Orientierung der Detektorebene gering, darüberhinaus hinterlassen sie charakteristische große Clusterspuren auf der Padebene.
- *Szintillationslicht im Radiator*
Aus einer mittleren Deposition von 350MeV/Ereignis durch Energieverlust geladener Teilchen im Radiatorgas resultieren einige hundert Szintillationsphotonen und unter Berücksichtigung von Geometrie und CsI-Quanteneffizienz ca. 16 Photoelektronen im Detektor
- *Cherenkov-Licht durch Hadronen im Fenster*
Das CaF_2 -Material des Fensters hat als Festkörper eine niedrige Cherenkovschwelle $\gamma_{\text{thr}}=1,4$, so daß langsame geladene Hadronen aus der Reaktion im Fenster Cherenkovlicht erzeugen können. Wegen des flachen Eintrittswinkels und resultierender interner Mehrfachreflexion ergibt dieses Licht jedoch keine Ringstruktur auf der Detektorebene.
- *Delta-Elektronen*
Die im Radiator entstehenden δ -Elektronen besitzen Energie von 2-25 MeV, der Anteil oberhalb der Cherenkovschwelle bei ca. 10MeV (von Pionen mit $v > 650\text{MeV}/c$) produziert daher Licht.
- *Elektronisches Rauschen*
Elektronisches Rauschen einzelner Pads kann durch die Möglichkeit des Setzens individueller Schwellen für die Auslese minimiert werden.

Daneben gibt es noch Beiträge, die zum Untergrund für ein etwaiges Dileptonensignal aus einem Vektormesonenzерfall zu zählen sind, allerdings anders behandelt werden müssen, da es sich um echte Cherenkov-Ringe aus Untergrundquellen von Elektronenproduktion im Radiator handelt. Die wesentlichen sind:

- *Elektronen aus π^0 -Dalitz-Zerfällen*
Ca. 0,06 Dileptonenpaare /Ereignis liegen in der Detektorakzeptanz.
- *Externe Paarkonversion im Target und Radiator von Photonen aus π^0 -Zerfällen*
Ca. 0,15 Konversionspaare / Ereignis liegen in der Detektorakzeptanz.

4.2 Algorithmen zur Muster- und Ringerkennung

Trotz der Bezeichnung „IPU“ („Image Processing Units“) wird in der Trigger Elektronik eher Mustererkennung als Bildbearbeitung betrieben. Dies liegt in erster Linie an dem begrenzten Merkmalsreichtum der bearbeiteten „Bilder“, daneben an den Schwerpunkten und Limitierungen des Triggers (enger Zeitrahmen, Implementierung in programmierbare

Logik, Verwendung reiner Treffermuster), die in dieser Form für eine softwarebasierte Offlineanalyse nicht gelten. Diese kann sich daher in stärkerem Maß an Verarbeitungsabläufen „echter“ Bildverarbeitung (s. [73]) orientieren, wo man die Arbeitsschritte Bildvorverarbeitung (Rauschunterdrückung, Kontrastveränderung), Segmentierung (hier: Ring, Cluster, Einzelpad), Formerkennung (z.B. Art und Anzahl von Photonenmaxima in der Ringstruktur), Objekterkennung (Dalitz-/Konversions-/sonstiger Ring, direkt ionisierendes Teilchen, Einzelphoton) unterscheidet. Hierdurch können auch im Fall der RICH-Detektorebene Aussagen über Objekte gemacht werden, die über die Möglichkeiten des Echtzeittriggers hinausgehen.

Für die hardwarebasierte Ringerkennung steht eine rudimentäre Bildvorverarbeitung sowie eine -aufgrund der Einfachheit der zu erkennenden Objekte- kombinierte Form- und Objekterkennung mittels Masken oder äquivalenter Transformationen zur Verfügung.

4.2.1 Bildvorverarbeitung

Im Sinne einer Bildvorverarbeitung steht der Mustererkennung in der RICH-Triggerelektronik die Möglichkeit des Setzens von triggerspezifischen Schwellen für das Treffermuster zur Verfügung. Dies kann im Sinn einer Rauschreduktion (über das elektronische Rauschen hinaus) oder Kontrasterhöhung verstanden werden.

Die Hardware der RRU bietet darüberhinaus die Möglichkeit, das Treffermuster in den FPGAs zu bearbeiten und erst anschließend den Ringerkennungseinheiten zur Verfügung zu stellen. Möglich wäre z.B. eine Eliminierung von Einzelpads unter der Voraussetzung, das Photonen mit hinreichend großer Wahrscheinlichkeit mindestens zwei benachbarte Pads ansprechen lassen.

4.2.2 Verfahren zur Ringerkennung

Der wesentliche Schritt ist die Erkennung des gesuchten Musters. Hierfür gibt es mehrere mögliche Ansätze.

4.2.2.1 Masken

Die naheliegende Methode zur Identifizierung einer bekannten Struktur oder Kurve ist die Verwendung einer Referenzmaske, die exakt die gesuchte Kurve enthält. Eine Übereinstimmung ergibt sich als Maximum in einem z.B. nach

$$C(u, v) = \frac{1}{\sum_{(i, j) \in V} |f(i + u, j + v) - h(i, j)|}$$

f: Gesamtbild

h: Suchmaske

V: Satz aller Bildpunkte der Suchmaske

evaluierten Algorithmus [73]. Für eine Ringerkennung mittels des Treffermusters ergibt sich hierbei die Möglichkeit, allein den Ringumfang zu verwenden oder in die Maske auch Negativbereiche innerhalb bzw. außerhalb einzubeziehen.

4.2.2.2 Hough-Transformationen

Der Einsatz einer festen Maske zur Erkennung einer vorgegebenen Kurve ist limitiert durch deren mögliche Verzerrungen, Drehungen oder Skalierungen.

Effektiver ist unter solchen Umständen die Anwendung einer Hough-Transformation.

Hough-Transformationen bieten verglichen mit anderen Algorithmen zur Kanten-erkennung den angesichts der aus vereinzelt Photonenclustern bestehenden Cherenkov-Ringe notwendigen Vorteil, tolerant gegenüber unvollständigen oder ausgewaschenen Kurven zu sein.

Anwendbar sind sie, wenn die gesuchte Kurve durch einen analytischen Ausdruck der Form

$$f(x_1, \dots, x_n; a_1, \dots, a_m) = 0 \quad (4.2)$$

x_1, \dots, x_n : Bildkoordinaten

a_1, \dots, a_m : Kurvenparameter

beschreibbar ist¹. Der m-dimensionale Parameterraum wird in geeigneter Auflösung diskretisiert („Akkumulatorraum A“) und für jeden Bildpunkt der Wert aller Akkumulatorzellen $A(a_1, \dots, a_m)$ inkrementiert, durch deren Parametersatz die Kurvengleichung erfüllt ist. Maxima im Akkumulatorraum ergeben die wahrscheinlichsten Parametersätze.

Im Fall der Ringsuche ist der Ausdruck

$$(x_1 - a_1)^2 + (x_2 - a_2)^2 = a_3^2 \quad (4.3)$$

(a_1, a_2) : Ringmittelpunkt a_3 : Ringradius

zu verwenden. Die Diskretisierung ist im Fall der HADES-Detektorebene direkt durch die Padstruktur gegeben, der dreidimensionale Akkumulatorraum $A(a_1, a_2, a_3)$ mit den sich hierin ergebenden Kegeln vereinfacht sich aufgrund des bekannten Ringradius zu einem zweidimensionalen, innerhalb dessen um jeden Bildpunkt im Akkumulatorraum Ringe der zugehörigen potentiellen Mittelpunkte gezogen werden.

Die in der Folge besprochenen Hardwarealgorithmen sind im wesentlichen maskenorientiert, wobei die Behandlung des Hitpattern innerhalb einer Maske variieren kann. Eine Aufsummierung innerhalb einer Ringumfangsmaske entspricht dabei exakt einer Hough-Transformation.

4.2.3 Hardware-implementierbare Ringerkennungsalgorithmen

Die mit der Verwendung von RICH-Detektoren verbundenen Mustererkennungsaufgaben werden in der Regel im Rahmen der Offline-Analyse von komplexen, softwarebasierten Algorithmen behandelt (s. z.B. [75][76]).

Erst mit dem Einsatz von RICH-Detektoren in Experimenten hoher Ereignisraten ergab sich die Notwendigkeit, Algorithmen an den Einsatz in schneller Hardware anzupassen und

1. Es existieren auch allgemeinere Hough-Algorithmen auf Basis von Referenztabellen.

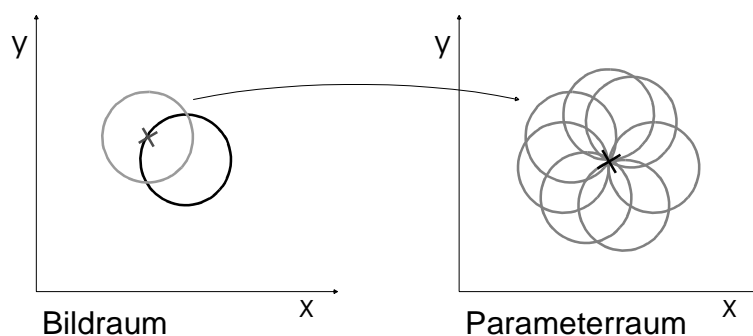


Abb. 4.2: Hough-Transformation zur Ringerkennung bei gegebenem Radius. Die Transformation erfolgt vom (x,y) -Raum der Umfangspads in den (x,y) -Raum potentieller Mittelpunkte.

zu optimieren sowohl im Hinblick auf Ringerkennungseffizienz als auch Hardwareaufwand und Kosten.

Vorreiter auf diesem Gebiet war die Erkennung asymptotischer Elektronen-Cherenkov-Ringe im CERES-Spektrometer ([77][78]) am CERN-SPS. Der dort verwendete Hardwarealgorithmus (SLT) evaluiert allein das Treffermuster innerhalb fester Suchmasken. Implementiert ist der Algorithmus in einer Matrix aus dedizierten Prozessor-Elementen, die in eigens entwickelten VLSI¹-Chip realisiert wurden.

Schwierigere Randbedingungen bei HADES ergeben sich v.a. aus dem kürzeren mittleren Ereignisabstand von 10 μs sowie des in Pad-Einheiten kleineren Ringdurchmessers.

Als Architektur für den Ringerkennungsalgorithmus wurden **Feld**Programmierbare **Gate**-Arrays (FPGAs) gewählt. Zur Verdeutlichung der resultierenden Randbedingungen werden relevante Eigenschaften der FPGAs kurz vorgestellt:

FPGA-Struktur

Ein FPGA enthält eine große Zahl identischer Logikblöcke mit kombinatorischer Logik und Registern, die in Abhängigkeit von der implementierten Funktionalität variabel zusammengeschaltet werden können.

Bei den FPGA der Firma Xilinx [74] werden die Logikblöcke als CLB (**C**omplex **L**ogic **B**locks) bezeichnet. Jeder CLB (Abb. 4.3) enthält als kombinatorische Logik zwei „Funktionsgeneratoren“, das sind Lookup-Speicher mit je vier Eingangssignalen und einem Ausgangssignal, worüber beliebige logische Verknüpfungen der Eingänge realisierbar sind. Die beiden Ausgänge können mit einem weiteren externen Signal in einem dritten Funktionsgenerator verknüpft werden. Darüberhinaus enthält jeder CLB noch zwei Register, als deren Eingänge externe Signale oder die Ausgänge der internen Funktionsgeneratoren verwendet werden können. CLBs können über verschiedene Routingniveaus mit direkten bzw. entfernteren Nachbarn oder beliebigen anderen CLBs verbunden werden.

1. Very Large Scale Integrated (Circuit) - Hochintegrierte Schaltung

Allen im folgenden beschriebenen Hardwarealgorithmen gemein ist der Ansatz, durch das Zusammenfassen von drei bis vier Pads zu einer gemeinsam evaluierten Gruppe eine effiziente Implementierung des Algorithmus in die Logikressourcen (Funktionsgeneratoren) der verwendeten Xilinx-FPGA zu ermöglichen.

4.2.3.1 Der HADES-Trigeralgorithmus zur Ringerkennung

Der Hardwarealgorithmus evaluiert jedes Pad der 96×96 -Patternmatrix als potentiellen Ringmittelpunkt.

Ausgehend vom aktuellen Zentrumspad wird die lokale Padumgebung ausgewertet. Hierbei werden nicht alle Pads einbezogen, sondern Untergruppen von Pads gebildet. Grundsätzlich werden hierbei zwei Regionen unterschieden:

Ringregion

Der asymptotisch konstante Durchmesser der Cherenkov-Ringe von im Mittel 5cm wird durch die adaptive Struktur der Padebene des Detektors auf einen konstanten Durchmesser von 8 Pads in der Patternmatrix transformiert (vgl. Kap. 2.2.1).

Daher lassen sich um das Zentrumspad diejenigen Pads bestimmen, die mit Radius $R=4$ auf dem Ringumfang liegen. Uneindeutigkeiten ergeben sich hierbei aufgrund der Granularität des Ringbildes.

Vetoregion

Neben den Pads auf dem Ringumfang muß auch die Nachbarschaft dieser Pads ausgewertet werden, um Ringe als solche zu identifizieren und z.B. von kompakten Clustern zu trennen. Es werden also Pads sowohl innerhalb als auch außerhalb des Rings als sogenannte Veto-regionen definiert.

Direkte Nachbarn der Ringpads ($R=3$ bzw. $R=5$) werden hierzu nicht verwendet, da diese nicht eindeutig von der Ringzugehörigkeit ausgeschlossen werden können (siehe auch unten „Lokale Maximumsuche“):

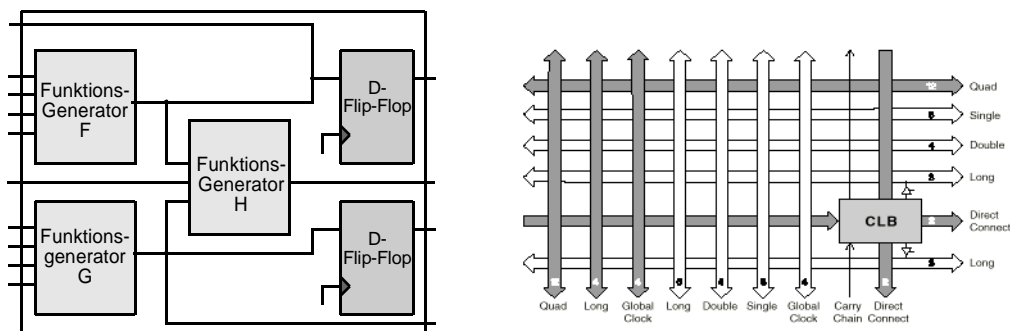


Abb. 4.3: Struktur eines Xilinx-FPGA: a) CLB (Logikblock) mit 2 Funktionsgeneratoren und 2 D-Flip-Flops (vereinfachte Darstellung) b) Hierarchie von Routingmöglichkeiten an einem CLB [74].

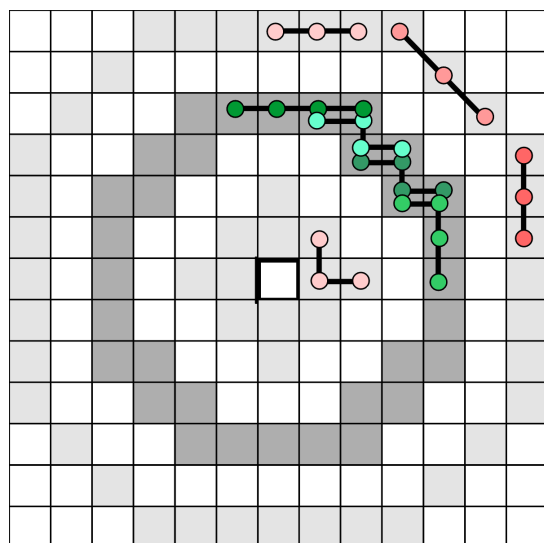


Abb. 4.4: Die Pads der Ringregion (dunkelgrau) und Vetoregionen (hellgrau). Zusätzlich sind die Padgruppen des Algorithmus SOC1 für ein Viertel der Maske eingetragen. Mit Linien verbundene Punkte gehören zur selben Padgruppe.

- Die durch die Padstruktur ausgeglichenen Verzerrungsfehler auf der Padebene sind begleitet von einer Ausschmierung der Ringbilder, die nicht ausgeglichen ist. Daher können lokal auch direkte Nachbarn der Ringpads echte Signale von Cherenkovphotonen enthalten.
- Im Photonendetektor sprechen neben dem zentralen Pad pro Photon noch im Mittel 1,1 weitere Pads durch die influenzierte Ladung an [81]. Das Zentralpad kann nur über die Pulshöheninformation identifiziert werden, im Hitpattern sind beide gleichberechtigt, die Zwei-Pad-Gruppe kann aus dem Ringumfang herausragen.

Als Vetoregionen werden daher Pads auf dem Ring mit Radius $R=6$ sowie das Zentrum des Rings ($R = 0,1,2$) verwendet.

Insgesamt muß damit eine Region von 13×13 Pads zur Evaluierung eines potentiellen Ringzentrums herangezogen werden.

Die Art der Auswertung in den verschiedenen Regionen variiert in verschiedenen Modifikationen des Algorithmus.

Die grundlegenden Gemeinsamkeiten werden daher bei der Beschreibung einer Variante des Algorithmus dargelegt. Hiernach werden die Varianten erläutert und die Algorithmen verglichen.

Der Algorithmus SOC1 (Separate Overlapping Correlations)

Ring- und Vetoregionen werden separat ausgewertet. In der Vetoregion wird nicht zwischen innerer und äußerer Vetoregion unterschieden.

Innerhalb jeder Region werden Gruppen von 3-4 (benachbarte) Pads für die Auswertung zusammengefasst. Innerhalb einer Padgruppe („Korrelation“) können konkrete Treffermuster („Pad 1 und Pad 3 haben nicht, Pad 2 hat angesprochen“) oder Größer/Kleiner-Relationen der Form „mindestens/höchstens/genau n Pads der Gruppe haben angesprochen“

optimal in einzelne Funktionsgeneratoren der FPGAs implementiert werden. Direktes Zählen aller Einzelpads ist aufwendiger in der Implementierung.

Genutzt wird in der Regel ein einfaches logisches „ODER“, das heißt eine Padgruppe liefert ein positives Ergebnis, sobald mindestens eines ihrer Pads einen Treffer aufweist. In den Vetoregionen reicht diese grobe Art der Zählung aus, um ein Maß für die Größe des Untergrunds zu erhalten.

In der Ringregion wird eine Verfeinerung erreicht, indem sie zweifach komplett durch Gruppen von 4 Pads abgedeckt wird, die jeweils um zwei Pads versetzt sind. Jedes Pad geht also hier in zwei Gruppen ein (s. Abb. 4.4).

Im nächsten Schritt werden die gültigen Padkorrelationen separat für Ringregion und Vetoregion aufsummiert. In der Implementierung werden hierfür spezielle Makros mit dezidiertem Zähllogik sowie Standard-Addierer eingesetzt.

Die Summen werden für beide Regionen mit Schwellenwerten verglichen. Erfüllung der Schwellenbedingung in beiden Regionen ist die Bedingung für einen Ringmittelpunkt.

Variationen des Algorithmus

Die in Abb. 4.5 dargestellten Variationen des Algorithmus wurden ebenfalls getestet.

SRS (Separate with Ring Sum)

Um die Effektivität der überlappenden Padgruppen zu prüfen, wurde alternativ in der Ringregion direkt die Summe aller angesprochenen Pads gebildet und hierauf eine Schwelle gesetzt. In der Vetoregion wurden weiterhin nicht überlappende Padgruppen ausgewertet.

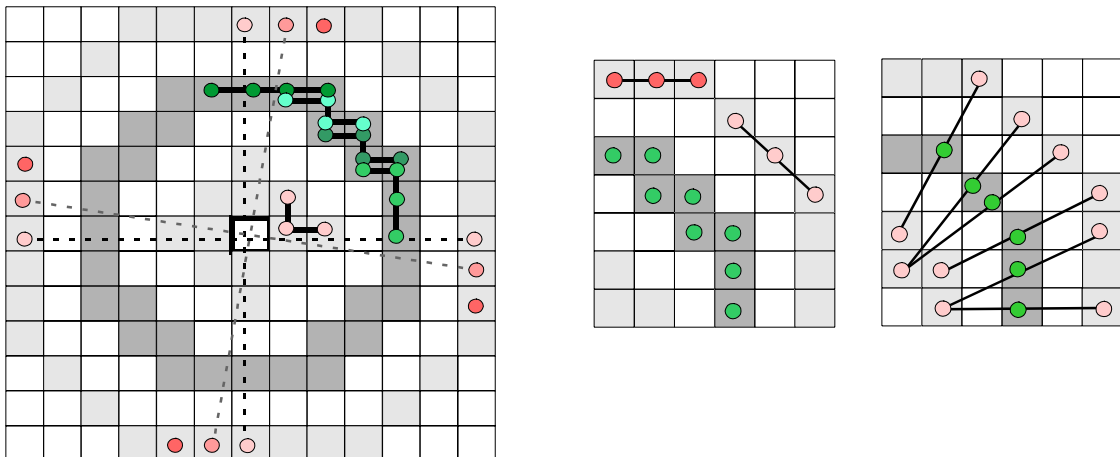


Abb. 4.5: Padgruppen der Varianten des Ringerkennungs-Algorithmus: Links der Algorithmus SOC2 mit einer Gruppierung *auseinanderliegender* Pads in der Vetoregion, in der Mitte der Algorithmus SRS mit einer Summenbildung über alle **Einzelpads** der Ringregion sowie rechts der Algorithmus LCC unter Verwendung von Korrelationen *zwischen* Ring- und Vetoregion.

SOC2

In der Vetoregion werden nicht benachbarte Pads gruppiert, sondern jeweils um 90° zueinander versetzt. Hierdurch wird das Gewicht von Clustern in der Vetoregion erhöht und die Vetoschwelle kann entsprechend stärker variiert werden.

LCC (Local Cross Correlation)

Nachteilig bei der separaten Auswertung von Ring- und Vetoregion ist der Verlust jeglicher Information über lokale Korrelationen zwischen Treffern in den beiden Regionen.

Als Abhilfe wurde schon früh vorgeschlagen und getestet ([44][79]), Treffermuster zwischen benachbarten Pads der Ring- und Vetoregion auszuwerten und damit solche Ringpads zu verwerfen, die von Untergrund in der Vetoregion begleitet sind.

Die nachgeschaltete lokale Maximumsuche

Aufgrund der oben beschriebenen Ausschmierung der Ringmuster erfüllen bei allen beschriebenen Hardwarealgorithmen häufig 3-4 benachbarte Pads das Ringkriterium.

Um einen der Kandidaten als den besten zu identifizieren, wird die Anzahl gültiger Korrelationen in der Ringregion als Qualitätsparameter verwendet und unter den Kandidaten das lokale Maximum dieses Wertes ermittelt. Da sich die Werte häufig nur wenig oder nicht unterscheiden, ist die Bedingung für ein Maximum asymmetrisch definiert¹, um in jedem Fall ein Maximum zu erhalten.

4.2.4 Software-Ringerkennungsalgorithmen

Auf Houghtransformationen basiert die Ringerkennung der ursprünglichen HADES-Simulationen [80]. Eine erste Transformation gemäß Gl. 4.3 ergibt eine gute Ringeffizienz, allerdings keine Diskriminierung gegen große Untergrundcluster. Daher wird eine zweite Hough-Transformation mit aus der ersten gewonnenen Gewichtungsfaktoren durchgeführt. Ein Schnitt im nun zweidimensionalen Raum der Akkumulatorresultate ergibt eine Effizienz von 95% bei einer Fehlerrate von 0,1/Ereignis für Au+Au bei 1AGeV.

In der aktuellen Offline-Analyse wird ein mehrschrittiges Verfahren zur Ringerkennung eingesetzt. In einer ersten Stufe werden die Daten bereinigt, indem Einzelpads ohne nahe Nachbarn sowie die zu Spuren geladener Teilchen gehörigen Pads entfernt werden. Hierbei werden auch Regionen definiert, in denen eine Ringsuche sinnvoll ist. Die eigentliche Ringsuche wird mit zwei Algorithmen durchgeführt: einer Hough-Transformation (s.o.) und einer Maske, bei der alle Pads der untersuchten Region mit ihrer vollen Pulshöheninformation und unterschiedlichen Gewichtungen eingehen. Ringkandidaten, die die Bedingungen beider Algorithmen erfüllen, werden noch anhand weiterer Kriterien wie Paddichte in der Suchregion oder Schwerpunkt der Pads im Ring untersucht, bevor eine positive Entscheidung gefällt wird [81].

1. d.h. eine „größer als“-Bedingung zur einen Seite und eine „größer gleich“-Bedingung zur anderen Seite

4.3 Leistungsfähigkeit der Algorithmen

Die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Algorithmen wurde auf Basis der Daten aus den ersten vollständigen HADES-Detektorsimulationen für schwere Kern-Kern-Systeme untersucht. Die Ergebnisse für die Ringerkennung werden im folgenden resümiert.

4.3.1 Dileptonen aus ω -Zerfällen in der Reaktion Au+Au bei 1 AGeV

Als Standardsystem der ursprünglichen HADES-Simulationen wurde die Reaktion Au+Au bei 1 AGeV verwendet. Die komplette Detektorgeometrie war in GEANT(3.15) implementiert, das Tracking der Cherenkov-Photonen erfolgte unabhängig davon, die in Kap. 4.1.2 genannten Untergrundquellen waren einbezogen [65]. In jedes Ereignis wurde ein Dileptonenpaar aus einem ω -Zerfall eingefügt. Die Gesamtdetektorfläche ist hinreichend groß, um dennoch Aussagen über die Fehlidentifizierungsrate in den überwiegenden dileptonenfreien Ereignisse machen zu können.

Mittels dieses Simulationspaketes wurden nach geringfügigen Aktualisierungen (Änderung der CaF₂-Fensterlage von -20° nach 0°, Anpassung von Geometrieparametern) die verschiedenen Varianten des Hardware-Algorithmus untersucht.

Ermittelt wird jeweils die Ringerkennungseffizienz des Algorithmus

$$\text{Eff} = \frac{N_{\text{Det}+}}{N_{\text{EI}}} \cdot 100 \quad [\text{Prozent}]$$

N_{EI} : Anzahl der simulierten Elektronen, deren Cherenkovphotonen in der Detektorakzeptanz liegen¹.

$N_{\text{Det}+}$: Anzahl detektierter Ringmittelpunkte, die simulierten Elektronen zugeordnet werden können.

sowie die Anzahl fälschlich identifizierter Ringe

$$N_{\text{Fake}} = \frac{N_{\text{Det}-}}{N_{\text{Ev}}}$$

$N_{\text{Det}-}$: Anzahl detektierter Ringmittelpunkte, die keinem simulierten Elektronen zugeordnet werden können.

N_{Ev} : Zahl der Ereignisse

Eine hohe Effizienz ist nötig, um möglichst wenige Ereignisse mit Elektronen zu verwerfen, was bei einer Nichtidentifizierung durch die RICH-IPU zwangsläufig geschieht. Eine hohe Effizienz ist für jeden Algorithmus erzielbar bei gleichzeitigem Ansteigen der Fehlidentifizierungsrate. Eine zu hohe Fehlerrate führt jedoch in Verbindung mit der von vornherein höheren Anzahl von Fehlidentifizierungen in Schauer- und TOF-Detektor zu einer Reduzierung der Unterdrückungseffizienz des gesamten Second-Level-Triggers.

1. Zu jedem Elektron im Radiator wurde die Spur eines in Flugrichtung des Elektrons emittierten Photons bis in den Photonendetektor simuliert, die den zu erwartenden Ringmittelpunkt ergibt.

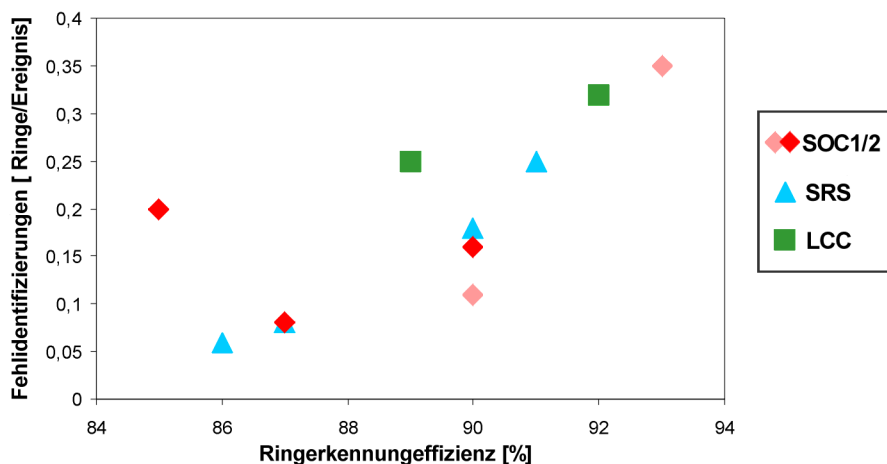


Abb. 4.6: Effizienzen und Fehlerraten der untersuchten Algorithmen für Elektronen in simulierten Daten der Reaktion $Au+Au$ bei 1A GeV. Dargestellt ist der Bereich geeigneter Effizienzen/Fehlerraten. Bei höheren Effizienzen erreichen die Fehlerraten schnell Bereich von 1-2/Ereignis.

Die innerhalb einer Algorithmusvariante (d. h. eines vorgegebenen Suchmusters) veränderlichen Parameter sind die beiden Schwellenwerte für Ring- und Vetoregion bzw. die Schwelle für die Erstellung des Hitpattern.

In Abb. 4.6 ist für die einzelnen Algorithmen und verschiedene Schwellenwerte die Fehlerrate gegen die Effizienz aufgetragen.

Kleine Variationen der Patternschwelle haben keinen großen Einfluß auf die erzielten Effizienzen, daher wurden im wesentlichen die Schwellen in der Ring- und Vetoregion variiert. Die Algorithmen reagieren verschieden empfindlich auf die Variation v.a. der Ringschwelle, z.B. kann bei SOC1/2 die Effizienz feiner eingestellt werden als bei LCC.

Da jedoch alle Algorithmen in die FPGA implementiert werden können und dies keinen größeren Aufwand darstellt¹ als das Laden neuer Schwellen, ist aus Abb. 4.6 der insgesamt zugängliche Bereich von Effizienzen und zugehörigen Fehlerraten absehbar, die Entscheidung für eine konkrete Variante sollte von den realen Detektordaten abhängig gemacht werden.

Erreichbar sind auf Basis der Simulationsdaten Effizienzen oberhalb 90 % bei Fehlidentifizierungsraten unter 0.5 fehlidentifizierten Ringen / Ereignis.

1. sobald der Algorithmus in ein FPGA-Design übersetzt ist

5 Die RICH-Triggerelektronik

Die Triggerelektronik für den HADES-RICH ist im Datenfluß angesiedelt zwischen der RICH-Detektorauslese und der Matching Unit des Second Level Triggers. In Kap. 5.1 wird kurz das Auslesekonzept des RICH-Detektors mit den sich hieraus für die Triggerelektronik ergebenden Randbedingungen dargelegt. In den folgenden Unterkapiteln werden die Karten der RICH-Triggerelektronik in ihrer Funktionalität, Realisierung sowie Anbindung an Ausleseelektronik und Matching Unit vorgestellt.

5.1 Die Datenauslese des RICH-Detektors

Die Triggerelektronik für den RICH-Detektor erhält ihre Informationen von der Ausleseelektronik des RICH, die aus ca. 70 Frontend-Modulen pro Segment besteht, die über zwei Readout-Controller zur Datenaufnahme und zur Triggerelektronik ausgelesen werden.

Direkt auf die Backplane der Detektor-Kathodenebene aufgesteckt sind sogenannte Frontend-Module („Preprocessing Frontend Module“ - PFM[67]), von denen jedes mit 64

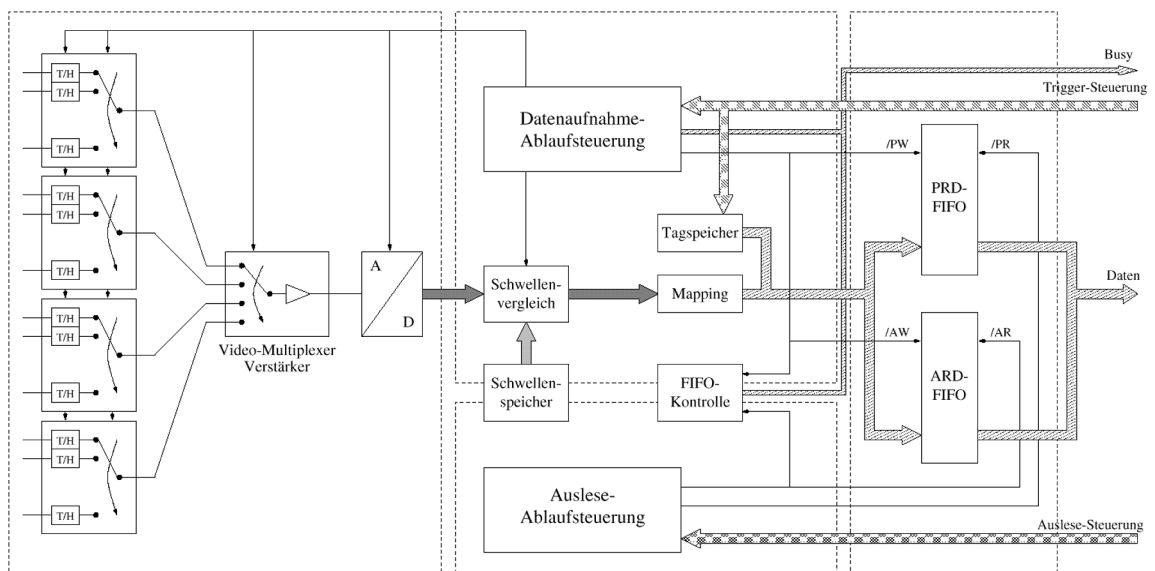


Abb. 5.1: Blockschaltbild des RICH-Frontend-Moduls mit Analog-Multiplexing und Digitalisierung, Datenvorverarbeitung innerhalb eines FPGA sowie den Fifo-Speichern für Pulshöhendaten und Treffer-Koordinaten für die RICH-IPU [68].

RICH-Kathodenpads verbunden ist. Wie in Abb. 5.1 dargestellt, umfassen die PFM eine Sample-und-Hold-Stufe für die Analog-Informationen mit nachgeschaltetem Analog-Multiplexer, einen 10bit Analog-zu-Digital-Konverter, einen FPGA, der die Rohdaten vorverarbeitet (Nullunterdrückung unter Berücksichtigung individueller Schwellen), ein Fifo als Zwischenspeicher für die Auslese (LVL1-Pipe) sowie ein weiteres Fifo mit den Daten für die Triggerelektronik. Diese unterscheiden sich von den Analogdaten durch die Möglichkeit der Verwendung triggerspezifischer Schwellenwerte.

Ketten von jeweils 4 oder 5 PFM sind über einen Port mit einem sog. Readout-Controller (RC) verbunden [66][68]. Pro Detektorsegment werden zwei RC benötigt. Der RC (Abb. 5.2) beinhaltet die Steuer- und Überwachungslogik für die Auslese der Frontend-Module, die Schnittstelle zur RICH-Triggerelektronik sowie die LVL2-Pipe.

Die Auslese der Frontend-Module wird über die RC von der DTU initiiert und erfolgt in drei Modi. Die Abfolge dieser drei Auslesezyklen, die von der Anzahl vorliegender LVL1- bzw. LVL2-Trigger abhängt, wird von der DTU arbitriert. Ihre jeweilige Dauer hängt von der Datenmenge innerhalb des Ereignis ab. Daher kann auch für die in die Triggerelektronik eingehenden Daten keine konstante Ereignisrate angenommen werden.

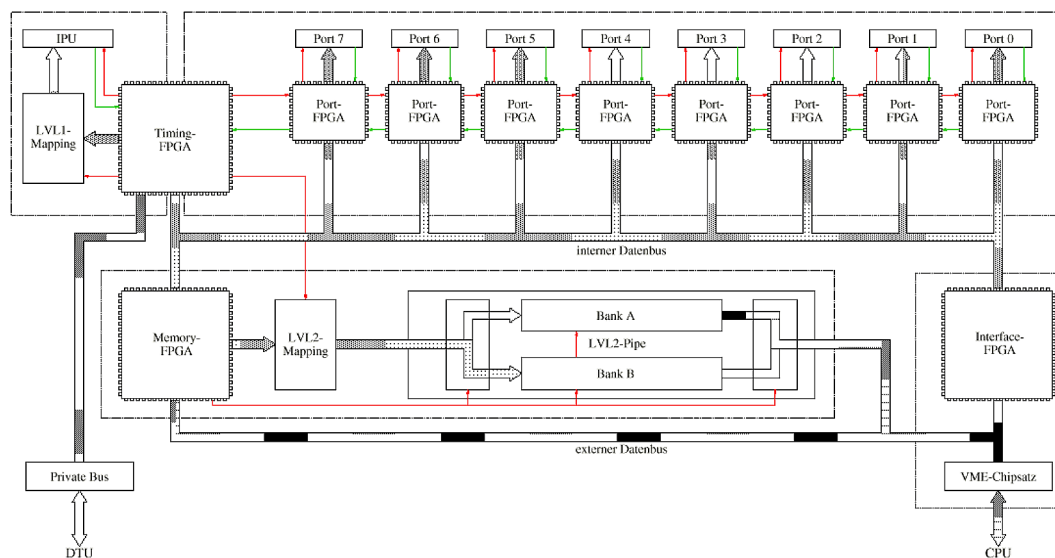


Abb. 5.2: Blockschaltbild des RICH-Readoutcontrollers mit acht Frontend-Ports, umschaltbarem Datenspeicher(LVL2-Pipe), Steuerlogik und Schnittstelle zur Triggerelektronik [68].

Analog Readout

Die Daten eines Events mit positiver LVL2-Entscheidung werden sequentiell aus allen Frontend-Module in die LVL2-Pipe auf dem Readout Controller ausgelesen.

Analog Delete

Die Daten eines Events mit negativer LVL2-Entscheidung werden parallel in den LVL1-Pipe-Fifos aller Frontend-Module gelöscht.

Der für die Triggerelektronik wichtige Zyklus ist der dritte:

Pattern Readout

Die Daten mit den triggerspezifischen Schwellen werden sequentiell aus allen Frontend-Modulen ausgelesen. Die Datenworte der 8 parallel ausgelesenen Frontend-Ketten eines Readout Controllers werden wechselweise („gemultiplext“) zur Triggerelektronik weitergeleitet.

Die maximale Datenrate beträgt 16 MHz. Datenworte aus Frontend-Ketten ohne anstehende Daten entfallen hierbei, der Datenstrom erfolgt also nicht mit konstanter Rate. Die Datenworte werden auf dem RC ergänzt um die Information, aus welchem Frontend-Modul das Wort ausgelesen wurde. Diese eindeutige Adresse aus Modul- und Padnummer wird verwendet, um ein Lookup-Memory zu adressieren. In diesem wird die detektorspezifische Padadresse in eine triggerspezifische umgewandelt, die so gewählt ist, daß die Rekonstruktion des Treffermusters (vgl. Kap. 5.3.1) vereinfacht wird.

Für die Triggerelektronik ergeben sich hieraus die folgenden Konsequenzen:

- Zur Triggerelektronik werden nicht die vollständigen Analoginformationen übertragen, sondern nur die Koordinaten derjenigen Pads, deren Pulshöhe oberhalb eines wählbaren Schwellenwerts liegt. Die Ringerkennung erfolgt allein auf Basis eines Treffermusters („Hitpattern“).
- Der Datenstrom von der Ausleseelektronik zur Trigger-IPU unterliegt sowohl auf der Event-Ebene als auch auf der Datenwort-Ebene Schwankungen, die keine Auswirkungen auf den Datentransport in der Triggerelektronik haben dürfen.

5.2 Die Triggerelektronik für den RICH

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Triggerelektronik für den RICH wurde wie alle anderen in der Gießener HADES-Gruppe realisierten Komponenten des Second Level Triggers vollständig in Eigenarbeit entwickelt und erstellt. Dies beinhaltet die Konzepterstellung und Auswahl geeigneter Elektronikkomponenten, das funktionale und elektrische Layout der Platinen, die Bestückung und Inbetriebnahme der Karten sowie alle Funktionstests und die Systemintegration.

Für die RICH-Triggerelektronik wurde eine große Anzahl programmierbarer Logikbausteine (s. z.B. [69]) verwendet, CPLD¹s für alle Steuerfunktionalitäten sowie FPGAs für den Ringerkennungsalgorithmus. Angesichts der großen Anzahl parallel und unabhängig voneinander durchzuführender Aufgaben schieden sowohl Standardlogikkomponenten als auch prozessorbasierte Lösungen als Alternativen aus. CPLDs bieten für alle Ablaufsteuerungen die Vorteile eines gut vorhersagbaren Zeitverhaltens der Signale sowie ausreichender Logikressourcen.

Um die komplexe Aufgabe der Ringerkennung unter den durch die Ereignisraten vorgegebenen Randbedingungen durchführen zu können, ist eine massiv parallele Realisierung dieser Aufgabe sowie die Verwendung gepipelinteter Algorithmen notwendig. Der hierfür notwendige hohe Aufwand an Logikressourcen macht FPGAs zum idealen Typ program-

1. Complex Programmable Logic Device

mierbarer Logik. Darüberhinaus erlaubt deren Rekonfigurierbarkeit die einfache Modifikation der verwendeten Algorithmen abhängig von der experimentellen Situation.

Für die programmierbaren Logikbausteine existieren diverse Entwicklungsumgebungen. Sowohl mit graphischen Tools (z.B. Workview) als auch mit codeorientierten Werkzeugen (ABEL, VHDL) kann die Funktionalität der Bausteine entworfen werden.

Ein Großteil des Entwicklungsaufwandes für die Triggerelektronik besteht daher darin, nach der elektrischen Inbetriebnahme der Karten die benötigte Funktionalität in die programmierbaren Bausteine zu implementieren.

5.2.1 Hardware-Konzept

Die Triggerelektronik für den RICH-Detektor besteht aus zwei Karten unterschiedlicher Funktionalität pro Detektorsegment, einer **Pattern Reconstruction Card (PRC)** und einer **Ring Recognition Unit (RRU)**. Beide Karten sind als 6U-VME-Karten [71] realisiert und werden im selben VME-Crate wie die zugehörigen Readout-Controller betrieben.

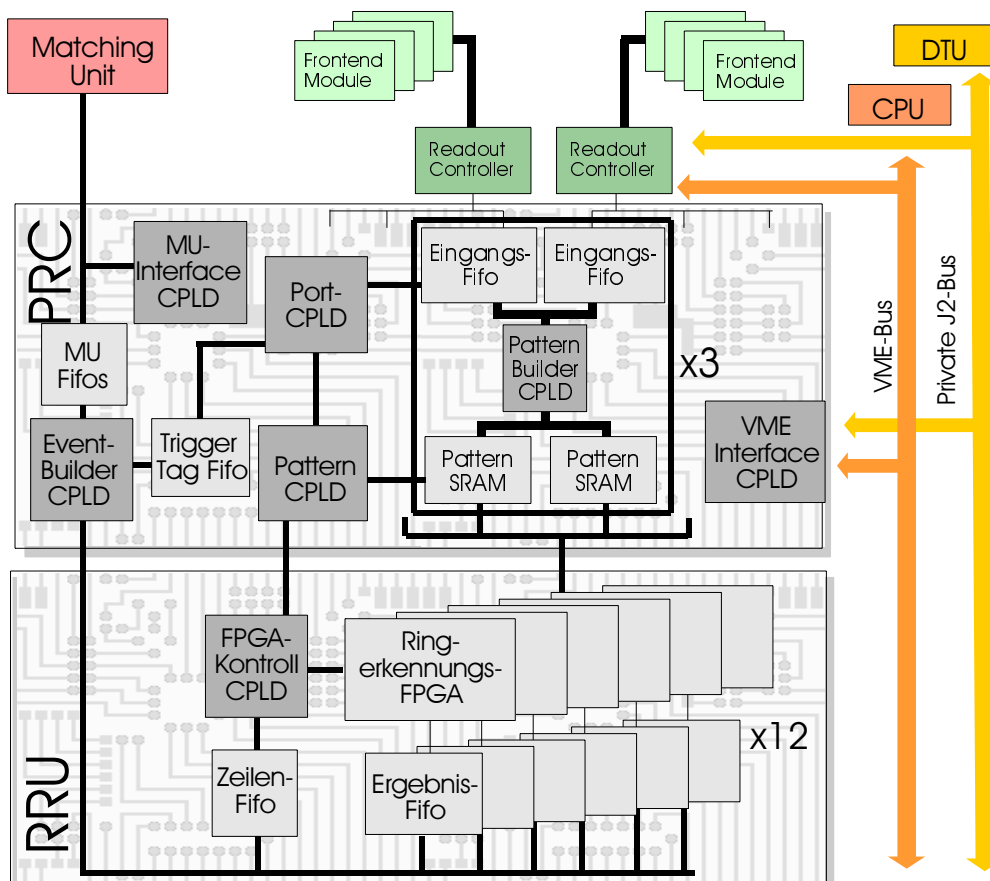


Abb. 5.3: Funktionale Übersicht der Pattern Reconstruction Card (PRC) und der Ring Recognition Unit (RRU). Schnittstellen existieren zu RICH-Auslese, Matching Unit, zum VME-Bus und der Detector Trigger Unit (DTU).

Aufgabe der PRC ist es primär, aus den Koordinateninformationen der Readout-Controller vollständige Hit-Pattern der virtuellen¹ 96x96-Pad-Detektorebene zu rekonstruieren, auf deren Grundlage die Ringerkennung erfolgt.

Frühe Triggerkonzepte sahen die zeilenweise Übertragung des kompletten Hitpattern vom Readoutcontroller zur Triggerelektronik vor. Die dadurch notwendigen Einschränkungen bei der Verkabelung der Frontend-Module und der Organisation ihrer Auslese sowie die nach ersten Detektortests (s. Kap. 6.1) absehbare geringere Belegung der Pad-Ebene führten jedoch dazu, stattdessen die *Koordinaten* der angesprochenen Pads zu übertragen. Da deren Übertragungsreihenfolge sich aus der Zuordnung von Pads zu Frontendmodulen und Ports ergibt und völlig willkürlich sein kann (für die realisierte Zuordnung s. Abb. 6.3), erfordert dieses Konzept *eine* zentrale Rekonstruktion des Hit-Patterns und verhindert eine Realisierung der Ringerkennung auf z.B. zwei identischen Karten für jeweils eine Detektorhälfte mit der kompletten Trigger-Funktionalität.

Die Koordinateninformationen werden aufgrund der variierenden Datenrate in Eingangsfifos zwischengespeichert und in einem zweiten Schritt hieraus das eigentliche Hitpattern in **Dual-Ported-RAMs** erzeugt. Diese DPRs werden unabhängig hiervon über ihren zweiten Port parallel ausgelesen und stellen damit komplette Patternreihen zur Verfügung.

In der Ring Recognition Unit erfolgt die eigentliche Ringerkennung für alle 96 Spalten der Ebene. Der verwendete Algorithmus ist in 12 FPGAs implementiert, von denen jeder 8 Spalten der Padebene bearbeitet. Der Erkennung potentieller Ringmittelpunkte folgt eine lokale Maximumsuche, um unter benachbarten Kandidaten, die aufgrund der Ausschmierung der Ringabbildungen häufig auftreten, den besten zu ermitteln. Die Ergebnisse der Ringerkennung werden in Fifos zwischengespeichert und nach Abarbeitung eines Events über die PRC, die neben der Patternerstellung auch die Schnittstelle zur Matching Unit enthält, zur dieser ausgelesen.

5.3 Die Pattern Reconstruction Card (PRC)

5.3.1 Schnittstelle zum Readout Controller

Die PRC ist mit zwei Readout Controllern über jeweils einen Bus verbunden, über den die unidirektionale Datenübertragung erfolgt. Die Hardware-Komponenten und das Busprotokoll werden im folgenden beschrieben.

Eingangsports

Zum unabhängigen Datentransfer von den beiden Readout Controllern des Detektorsegments zur PRC existieren zwei identische Eingangsports, die schematisch in Abb. 5.4 dargestellt sind. Der komplette vom RC kommende Bus wird zu einem Port-CPLD² geführt. Dieser handhabt das Transferprotokoll zum RC, ermöglicht aufgrund der kurzen Setup-Zeiten seiner internen Register eine schnelle und damit fehlerunanfällige Registrierung der

1. Die Bezeichnung „virtuell“ bezieht sich auf die Tatsache, daß aufgrund der Detektorgeometrie nur ein torfentförmiger Bereich des 96x96-Pad-Quadrats realen Pads entspricht (vgl. Kap. 2.2.1).

2. Lattice ispLSI 1048E-70

einkommenden Datenworte, prüft das korrekte Format der Daten und steuert das Schreiben der Datenworte in eines der drei angeschlossenen Eingangsfifos entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu jeweils einem 32-Spaltenbereich der Padebene. Die Verwendung von drei Fifos ermöglicht es, die nachfolgende langsamere Pattern-Rekonstruktion dreifach parallel durchzuführen und damit die zeitlichen Randbedingungen einzuhalten.

Die Eingangsfifos¹ sind mit einer Tiefe von 1024 Worten hinreichend dimensioniert, um selbst bei ungünstiger Padaufteilung innerhalb eines Events alle Datenworte aufnehmen zu können.

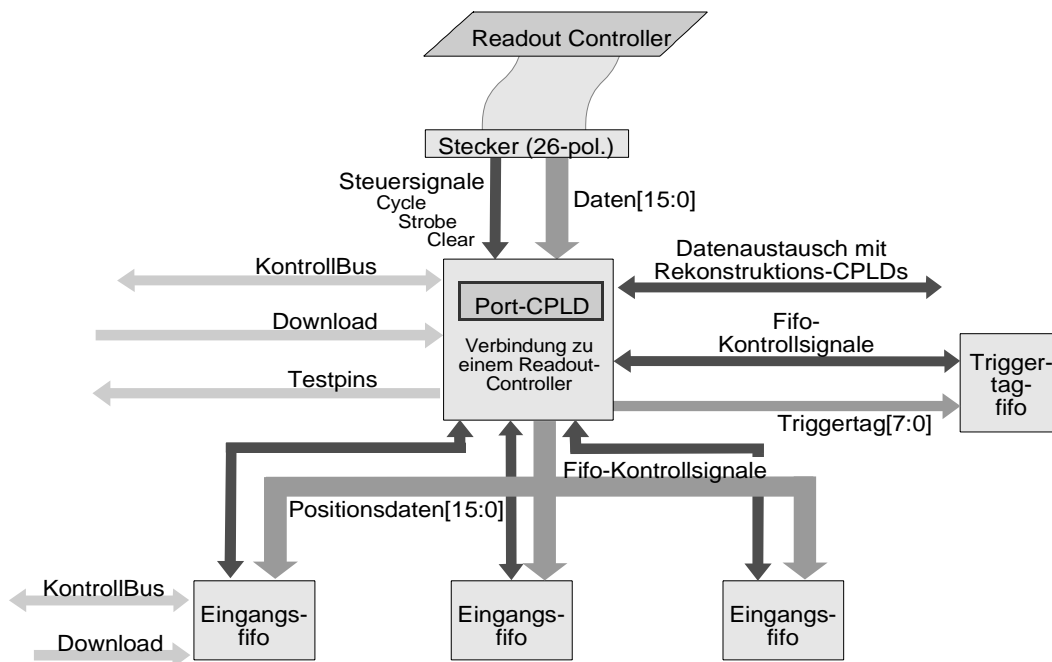


Abb. 5.4: Funktionale Übersicht eines Eingangsports der PRC bestehend aus Eingang-CPLD, drei parallelen Fifos zur Zwischenspeicherung und Trigger-Tag-Fifo.

Signale und Protokoll

Die Datenübertragung vom Readout Controller zur PRC erfolgt über ein 26poliges Flachbandkabel². Die Signalpegel entsprechen TTL-Standard, die vorgesehene Übertragungsrate beträgt 16 MHz. Da die Karten sich in benachbarten Einschüben desselben VME-Crates befinden, kann die Kabellänge zur Minimierung von elektrischen Störungen klein (ca. 10cm) gehalten werden.

Die Schnittstelle umfasst 16 Datenleitungen und 3 Steuerleitungen (s. auch Abb. 5.10).

1. Cypress CY7C4225 1kx18bit Synchrones Fifo

2. 0,635mm Rastermaß, ERNI-SMC-Stecker

Data[15:0]

Die Datenbits enthalten die Koordinateninformation eines Pads in einer kodierten Form, welche die Verarbeitung auf der PRC vereinfacht:

7 Bits kodieren die Zeilennummer in der Detektorebene, die direkt zur Adressierung einer Speicherzelle im Pattern-Memory verwendet wird.

4 Bits kodieren die Bitposition des Pads innerhalb des 16bit-Datenworts des Pattern-Memory, das einem 16-spaltigen Bereich der Padebene entspricht.

5 Bits werden zur Auswahl eines der sechs 16-Spalten-Bereiche verwendet. 3 Bits entsprechen in einer „One-Hot“-Kodierung¹ den 32-Spalten-Bereichen und selektieren direkt eines der 3 Eingangsfifos, 2 Bits in gleicher Kodierung wählen hierin den 16-Spalten-Bereich und damit ein Memory. Die Redundanz dieser Kodierung ermöglicht eine begrenzte Erkennung fehlerhafter Datenworte.

Write

Das *Write*-Signal ist ein vom RC angelegtes Strobe-Signal. Eine steigende Flanke validiert ein angelegtes Datenwort. Jedes mit *Write* übertragene Datenwort entspricht einer Padkoordinate.

Cycle

Das *Cycle*-Signal wird vom RC zu Beginn der Datenübertragung eines Events angelegt. Es bleibt aktiv bis zum Ende der Übertragung für dieses Event. Nach Anlegen von *Cycle* wird mit jedem *Write* ein Datenwort im Port-CPLD registriert und in die Fifos geschrieben.

Mit der steigenden Flanke von *Cycle* wird ein letztes Datenwort im CPLD übernommen. Hierbei handelt es sich um das Trigger-Tag des Events (s.u.).

Clear

Das vom RC angelegte *Clear*-Signal ist vorgesehen, um während der Übertragung ein ungültiges Ereignis anzuzeigen.

Als ungültig gilt ein Ereignis, wenn eine unrealistisch hohe Detektorbelegung (z.B. aufgrund von Problemen im Photonendetektor) vorliegt, die von vornherein sinnvolle Ergebnisse des Triggerprozessors verhindert. Um die hiermit verbundenen langen Totzeiten zu vermeiden, wird nach Überschreiten einer zu definierenden Padanzahl *Clear* angelegt und die Datenübernahme durch die Eingangsfifos unterbunden. Die Übertragung vom RC zur PRC kann aufgrund der Struktur des RC-Auslesezyklus nicht abgebrochen werden, ermöglicht wird allein das Leeren der Eingangsfifos schon während der weiteren Übertragung. Das unvollständige Event wird von der RICH-IPU normal verarbeitet, jedoch für die Matching Unit als ungültig markiert.

Ein weiteres Signal dient dazu, den Beginn neuer Übertragungszyklen bis zur Abarbeitung des aktuellen Zyklus zu unterbinden:

IPU-Busy

Notwendig ist ein von der IPU generiertes Signal, um nach Ende eines Übertragungszyklus den Start des folgenden Zyklus so lange zu verzögern, bis die Auslese der Eingangs-

1. d.h. jeder kodierte Zustand (sprich Spaltenbereich) wird durch *genau ein* gesetztes Bit repräsentiert.

fifos beendet ist. Da der Pattern-Auslesezyklus von der DTU initiiert wird, wird dieses *IPU-Busy* nicht an den RC, sondern über einen Bus auf der VME-J2-Backplane direkt an die DTU übertragen. *IPU-Busy* wird mit Beginn eines Zyklus angelegt und erst nach Ende der Fifo-Auslese zurückgenommen.

Datenraten

Die Dauer eines Übertragungszyklus von RC zu PRC hängt ab von der Zahl der Pads über einer Schwelle und damit von der Detektorbelegung. Die maximale Transferrate von 16 MHz erlaubt in den im Mittel erlaubten 10 μ s den Transfer von bis zu 320 Datenworten unter der Voraussetzung einer ausgeglichenen Verteilung auf die beiden Readout-Controller. Die Auslese der Eingangsfifos und Rekonstruktion des Pattern erfolgt mit 10 MHz, was bei gleicher Verteilung auf die drei Fifo-Bereiche der Verarbeitung von 300 Pads entspricht.

Tests mit dem Prototyp-RICH-Detektor (Kap. 6.1) zeigten, daß weniger als 0.1% aller Events eine Belegung von mehr als 300 Pads¹ hatten und damit die 10 μ s Zyklusdauer überstiegen.

Trigger-Tag

Ein acht Bit breites Trigger-Tag wird zentral von der CTU verteilt und allen Datenpaketen in Auslese und Trigger beigefügt, um fehlerhaftes Zusammenfügen von Daten verschiedener Events (z.B. aufgrund von Logikfehlern oder bei elektrischen Übertragungsfehlern v.a. bei wohlformatierten Daten) zu verhindern.

Es wird auf der PRC mit steigender Flanke von *Cycle* in den beiden Port-CPLDs registriert. Das Trigger-Tag von Port B wird zu Port A weitergeleitet, wo ein Vergleich der beiden Tags stattfindet. Sind diese nicht konsistent, ist dies eine Fehlerbedingung mit den entsprechenden Konsequenzen (s. Kap. 5.3.5, „IPU-Error“).

Daneben wird das Tag A in ein Fifo geschrieben, von wo es in die zur Matching Unit transferierten Event-Daten eingefügt wird.

5.3.2 Rekonstruktion des Hit-Patterns

Rekonstruktionseinheiten

Die Patternrekonstruktion erfolgt parallel für jeden der drei Bereiche von 32 Spalten, denen jeweils ein Eingangsfifo entspricht, durch identische Rekonstruktionseinheiten, deren Aufbau in Abb. 5.5 wiedergegeben ist.

Im Zentrum einer solchen Einheit steht ein schneller CPLD², der alle in der Folge beschriebene Funktionalität beinhaltet.

Infolge der zwei Eingangsports existieren zu jedem 32-Spalten-Bereich 2 Eingangsfifos, die Daten für diesen Bereich enthalten. Die Auslese der Fifos beginnt erst nach Übertragung einiger Datenworte in die Fifos gesteuert durch ein „Programmable Almost Empty“- („programmierbares Fast-Leer“-) Flag (PAF) des Fifos. Sobald alle Datenworte eines Fifos

1. skaliert auf die volle Padanzahl und unter Annahme einer niedrigen Pad-Schwelle.

2. Lattice ispLSI 1032E-125

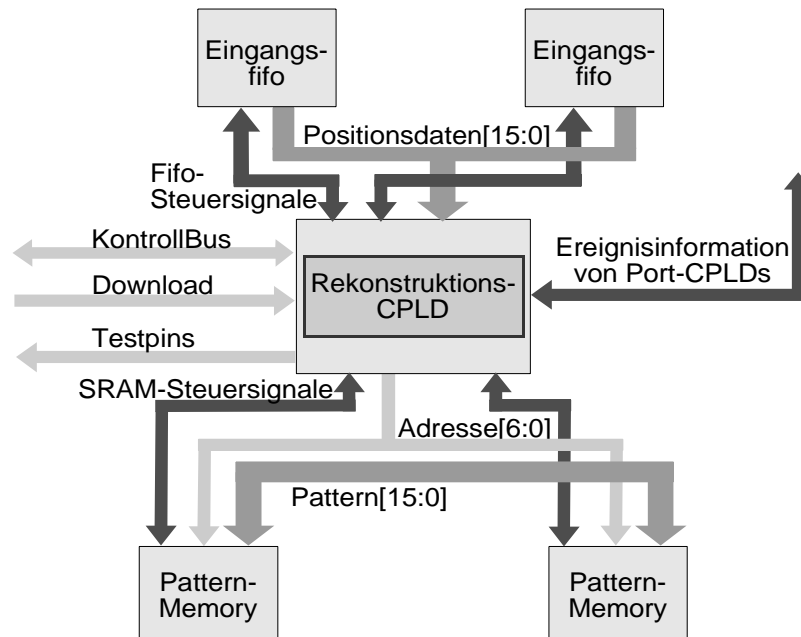


Abb. 5.5: Funktionale Übersicht einer Rekonstruktionseinheit bestehend aus zwei Fifos (eines von jedem Port), einem CPLD und zwei DualPorted SRAMs, in denen das Treffermuster für jeweils 16 Spalten erzeugt wird.

ausgelesen sind, wird zur Auslese des zweiten Fifos umgeschaltet. Die Verwendung des PAF verringert die Anzahl der Umschaltvorgänge gegenüber dem Fall, daß direkt mit dem ersten Wort im Fifo ausgelesen wird. Alternativ kann direkt das Empty-Flag des Fifos verwendet werden.

Ein Auslesezyklus endet, sobald nach Beendigung des Transferzyklus vom RC beide Fifos vollständig ausgelesen sind.

Das Hit-Pattern wird erzeugt in jeweils zwei 16 Bit breiten Dual Ported SRAMs¹, die 16 Spalten des Detektors repräsentieren. Hierbei wird das Hitpattern *eines* Events in einem 128 Worte tiefen Adressbereich abgelegt.

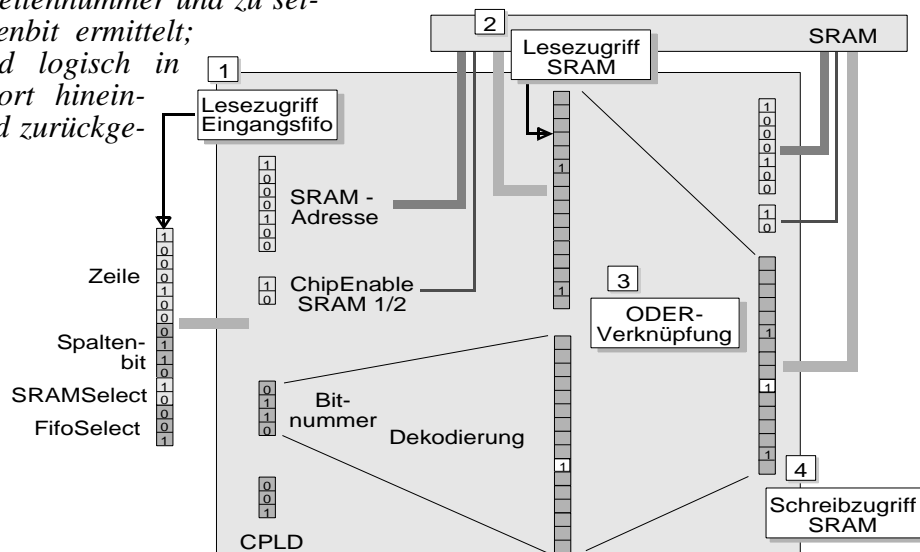
Bei der in Abb. 5.6 gezeigten Rekonstruktion eines Bits des Hitpattern erfolgen Fifoauslese und Zugriffe auf das SRAM synchron:

Das aus dem Fifo ausgelesene Datenwort wird im CPLD registriert. Der Teil, welcher der Reihen-Nummer entspricht, wird als Adresse² an beide SRAMs angelegt. Über die beiden Memory-Select-Bits wird eines der SRAMs mittels seines „Chip-Select“-Signals ausgewählt und ein Patternwort ausgelesen. Aus den vier Spaltenbits des neuen Datenworts wird gleichzeitig über einen Demultiplexer das 16bit-Wort erzeugt, in dem genau das eine neue Bit gesetzt ist. Dieses Wort wird mit dem aus dem SRAM gelesenen Patternwort mittels eines logischen „ODER“ verknüpft und in dieselbe Speicherzelle zurückgeschrieben.

1. IDT 7024-15 4kx16 Dual Ported SRAM

2. genauer: als untere Adressbits 6..0 (die höheren Adressbits werden durch die Arbitrierung der Pattern-Pages bestimmt, s.u.)

Abb. 5.6: Schematische Darstellung des Vorgangs der Patternerstellung (für ein Bit): Aus dem Datenwort des RC werden Zeilennummer und zu setzendes Spaltenbit ermittelt; letzteres wird logisch in das Patternwort hineingeODERT und zurückgeschrieben.



Gleichverteilung der Datenmengen

Eine Zuordnung der drei Rekonstruktionseinheiten zu den geometrischen Spaltenbereichen 0-31, 32-63, 64-95 würde aufgrund der Dreiecksform der realen Pads zu einer sehr ungleichen Auslastung der Einheiten führen. Daher werden in jeder Einheit zwei 16-Spalten-Bereiche so kombiniert (s. Abb. 5.7), daß die Padanzahl in allen drei Einheiten ungefähr gleich ist. Durch Umordnen auf dem 96bit-Patternbus zur RRU wird dies wieder korrigiert. (1-4, 2-6, 3-5)

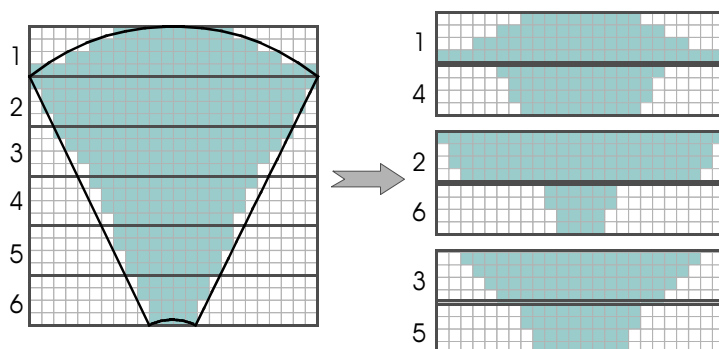


Abb. 5.7: Zuordnung zwischen Detektor-Padebene und Spaltenbereichen der Rekonstruktionseinheiten, um diese gleichmäßiger auszulasten.

5.3.3 Patterntransfer zur RRU

Ein weiterer CPLD steuert die globalen Aspekte der Verwaltung der Pattern-SRAMS, d.h. die Auslese zur RRU sowie die Arbitrierung der Ereignisse im SRAM.

Die sechs SRAMS werden über ihren zweiten Port mit dem Prozesstakt der RRU von 12 MHz parallel ausgelesen, d.h. eine Patternzeile pro Takt. Die Patterndaten werden in IO-Registerstufen der FPGAs gespeichert. Im Wechsel mit diesen Lesezugriffen erfolgen Schreibzugriffe auf die SRAMs, bei denen die FPGA-IOs als Ausgänge mit dem Wert 0 geschaltet sind. Auf diese Weise werden die Speicherzellen der SRAMs für neue Events gelöscht. Die effektive Zugriffsgeschwindigkeit auf den RRU-seitigen Port der SRAMs beträgt also 24 MHz.

Die Pattern-SRAMs ermöglichen das Zwischenspeichern des Hitpattern von bis zu 32 Ereignissen. Ein solcher Buffer ist zwingend notwendig, da die RRU zur Verarbeitung *jeden* Ereignisses 10 μ s benötigt, während die Rate der von den RC übertragenen Ereignissen nur im Mittel diesen Wert einhält, wegen der zwischengeschalteten Analog-Readout und -Clear-Zyklen jedoch auf den Frontend-Modulen zwischengespeicherte Events auch mit kurzfristig höherer Eventrate zur PRC übertragen werden können.

Die Verwaltung dieser 32 sog. „Pages“ für Patternerstellung bzw. -auslese inklusive der Überwachung von Überläufen oder Leerlesen erfolgt über den Auslese-CPLD, der die oberen Adressbits der SRAMs ansteuert. In den Dual Ported SRAM ist damit die völlig unabhängige und gleichzeitige Patternerstellung und -auslese sichergestellt, da die im DPR prinzipiell möglichen Zugriffskonflikte qua Aufteilung in 32 Pages nicht auftreten können.

5.3.4 Schnittstelle zur Matching Unit

Neben der Patternrekonstruktion ist auf der PRC das Interface zur Matching Unit realisiert. Dies umfasst die Auslese der Ergebnisse der Ringerkennung aus den Fifos der RRU und die Formatierung eines Event-Datenpaketes für die Matching Unit sowie die Abwicklung des Transferprotokolls zur Matching Unit.

Eventerstellung

Die Eventerstellung ist in einem CPLD¹ realisiert.

Ein Auslesezyklus der RRU-Ergebnisfifos umfasst die Auslese des Fifos, das die Zeilennummer enthält sowie der 12 Fifos mit dem Ringpattern für diese Zeile (vgl. Kap. 5.4.3). Ein Zyklus wird gestartet über eine Fifo-Arbitrierungslogik im RRU-Kontroll-CPLD. Leere Ringpattern werden bei der Auslese unterdrückt, aus allen weiteren wird ein 32bit-Datenwort erzeugt, das Ringmittelpunkte in der folgenden Weise kodiert:

Zeilennummer

Dies ist der aus dem Zeilenfifo ausgelesene Wert inklusive eines Offsets wegen der Latenzzeit des Ringerkennungsalgorithmus.

Spaltennummer

Diese ergibt sich aus zwei Angaben: die mitgezählte Nummer des ausgelesenen Ergebnisfifos bestimmt einen Bereich von 8 Spalten, das aus dem Ergebnis-Fifo ausgelesene Pattern bestimmt die Spalte(n).

Dies bedeutet, dass ein an die MU übertragenes 32bit-Datenwort mehr als einen Ringmittelpunkt enthalten kann. Die Dekodierung des Ringpattern erfolgt in der MU mittels eines kleinen² DSP-internen Lookup-Speichers.

1. Lattice ispLSI 1032E-70

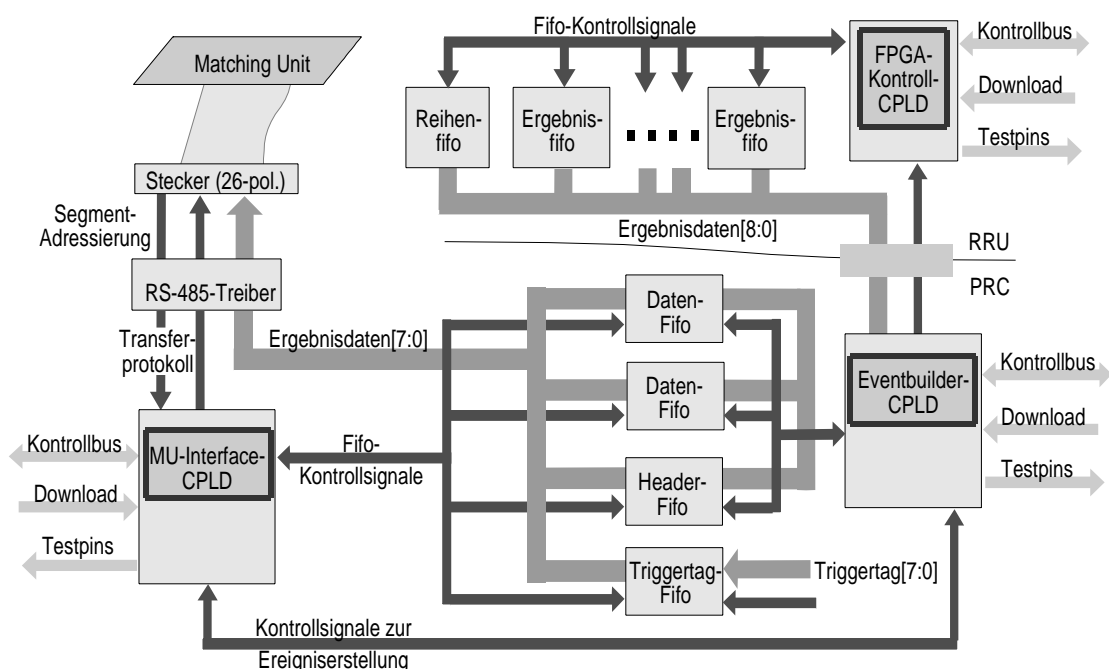


Abb. 5.8: Funktionale Übersicht der Ergebnisauslese und Schnittstelle zur Matching Unit.

Kontrollwort

Dies enthält die auf der PRC fest eingestellte Segmentnummer(0..5).

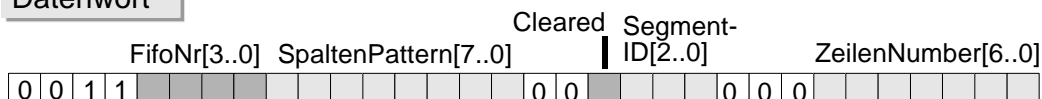
Die Datenworte werden in zwei Schreibzugriffen auf zwei parallele 8bit-Fifos erzeugt. Ein drittes Fifo enthält die Informationen für den von der MU benötigten Event-Header: Die Anzahl der im Event erzeugten Datenworte wird gezählt. Beim Lesen der von der RRU kommenden Event-Ende-Markierung wird diese Zahl in das Header-Fifo geschrieben, darauf wird ein Trigger-Tag aus dem Tag-Fifo ausgelesen und angehängt. Da die Ereignis-Reihenfolge in der RICH-IPU erhalten bleibt, ist diese Verfahrensweise möglich.

HeaderWort



Abb. 5.9: Zur Matching Unit übertragene Datenformat (für ein Ereignis)

Datenwort



2. Ausreichend sind 256Worte (8bit-Pattern) x 16bit (maximal 4 Ringmittelpunkte aufgrund der lokalen Maximumsbedingung mit je 4bit-Adresse), z.B. 00100010 --> 0001 1001 0000 0000

Datentransfer zur Matching Unit

Die Ringerkennungsdaten der PRCs aller sechs Detektorsegmente werden über einen gemeinsamen Bus zur Matching Unit übertragen. Aufgrund der Entfernung zur MU (ca. 10-25 m) ist der Bus mittels differentieller RS-485-Signale¹ realisiert.

Er umfasst die folgenden Signale:

Adressierung

AddressData

Ein Transferzyklus wird von der MU initiiert. Über eine serielle Adressierung wird eine der sechs PRC selektiert. Da der MU keine Informationen über bereitstehende Events zur Verfügung stehen, wird eine PRC adressiert, sobald die MU Daten empfangen kann. Der Beginn der eigentlichen Datenübertragung wird durch die PRC bestimmt und erfolgt, sobald auf dieser ein vollständiges Event vorliegt.

AddressValid

Zeigt einen gültigen Adressierungszyklus an.

AddressStrobe

Zeigt gültiges Adressbit an.

Datenübertragung

Data[7..0]

Datenleitungen

DataValid

Zeigt aktiven Transferzyklus von der PRC zur MU an. Zurücknahme von *DataValid* ermöglicht der MU die Adressierung des nächsten PRC-Moduls.

DataStrobe

Qualifiziert gültiges Datenwort.

Ein Auslesezyklus überträgt zunächst den EventHeader und dann über einen Multiplexer die Daten der beiden MU-Fifos. Die Datenstruktur eines Events wird aus Abb. 5.9 ersichtlich.

Die zu erwartende Datenrate liegt bei 5,6 MByte, die für den RS-485-Standard spezifizierte Übertragungsrate von 10 MHz ermöglicht die Übertragung von im Mittel 12 Ringdatenworten pro Ereignis²

1. TI SN75LBC172 4bit-Treiber bzw. SN75LBC173 4bit-Empfänger

2. Ein Wert, bei dem keine sinnvolle Ereignisreduktion durch den Second Level Trigger mehr möglich ist.

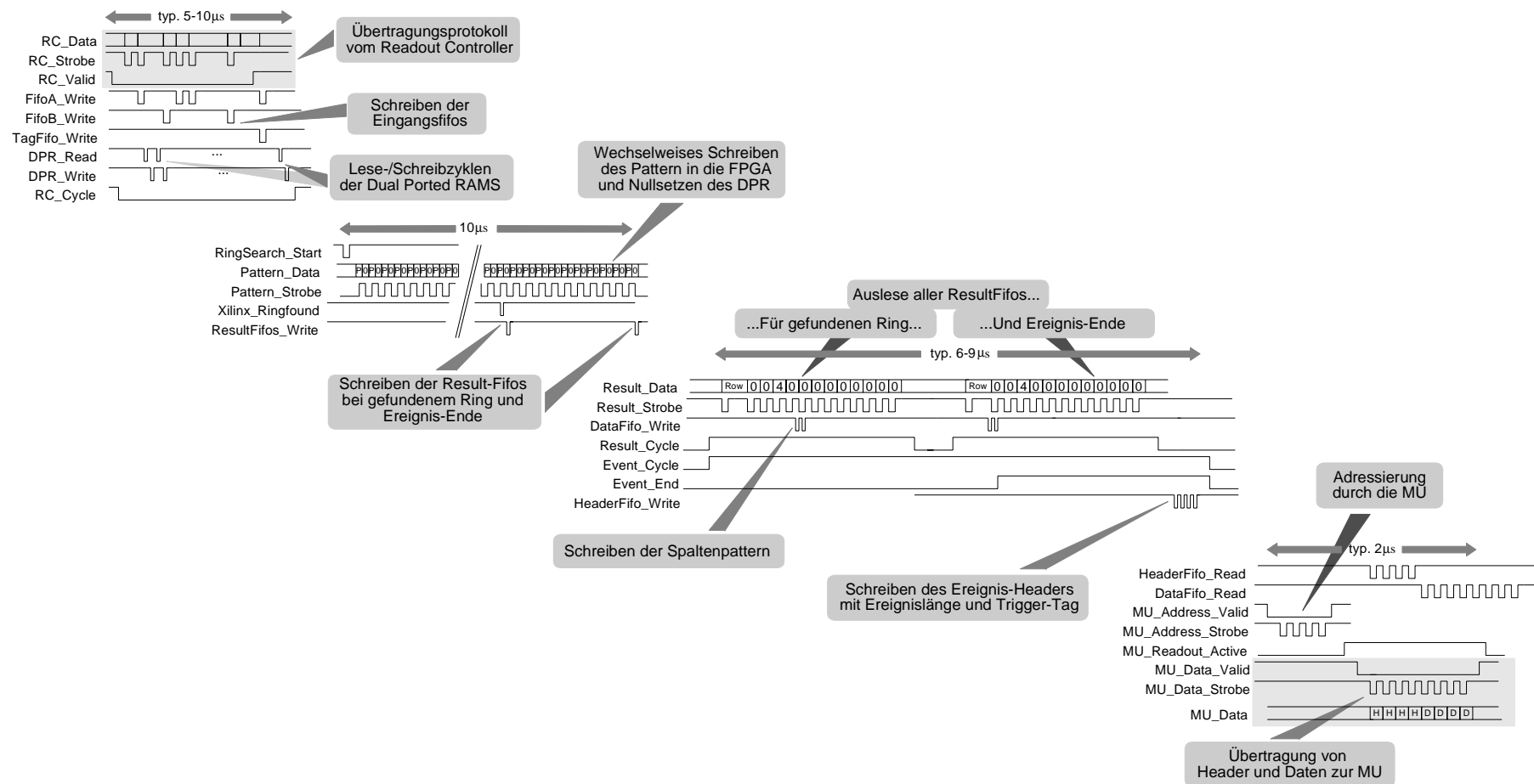


Abb. 5.10: Timingdiagramm für die Bearbeitung eines Ereignisses mit einem gefundenen Ring in der RICH-IPU. Getrennte Blöcke von Signalen stellen die Teilschritte dar, die jeweils über Zwischenspeicher entkoppelt sind. Die Abläufe der Einzelblöcke erfolgen daher bei hohen Ereignisraten gleichzeitig.

5.3.5 Kontrollfunktionalität

Externer Zugriff auf die IPU-Funktionalität ist über ein A24/D16-VME-Interface realisiert. Über den VME-Bus erfolgt im Standardbetrieb keinerlei Transfer von Detektor- oder Triggerdaten, er dient den folgenden Zwecken:

Konfiguration der FPGA

Da die Konfiguration der SRAM-basierten FPGAs flüchtig ist, müssen sie nach jedem Einschalten des VME-Crates konfiguriert werden.

Slow-Control

Über den VME-Bus erfolgt die grundlegende Ablaufsteuerung und -kontrolle der IPU-Funktionalität: Das HADES-Slow-Control-System hat über das VME-Interface die Möglichkeit, die IPU in ihre Betriebsmoden zu schalten sowie Status- und Fehlerregister auszulesen. Der Zugriff auf die einzelnen CPLD erfolgt über einen lokalen Bus, über den alle Kontroll-CPLD angesprochen werden können und auf den VME-Schreib- und Leszugriffe umgesetzt werden können.

Testauslese

Zu Testzwecken können über einen konfigurierbaren Umschalter verschiedene Datenpfade auf den Karten über VME-Zugriffe ausgelesen werden.

Über zwei Signale auf dem VME-J2-Stecker kann die IPU direkt auf die DTU zugreifen und damit Einfluß auf die komplette HADES-Triggerverteilung nehmen:

IPU-Busy

Über diese Leitung teilt die IPU mit, daß sie keine weiteren Events von den Readout Controllern entgegennehmen kann(s.o.). Von der DTU werden keine weiteren Pattern-Readout-Zyklen initiiert, solange *IPU-Busy* aktiv ist.

Lokal wird *IPU-Busy* aus mehreren CPLD-spezifischen *Busy*-Signalen gebildet, die von den Füllständen der Fifo- bzw. SRAM abgeleitet sind. *IPU-Busy* wird so frühzeitig angelegt, daß keine Überläufe und damit Datenverluste auftreten können.

IPU-Error

Über diese Leitung teilt die IPU das Auftreten eines Fehlers mit, der eine ordnungsgemäße Verarbeitung der Daten durch die IPU unmöglich macht. Eine solche *Error*-Bedingung stoppt das gesamte Datenaufnahmesystem, über Zugriffe des HADES-Slow-Control-Systems auf die Fehler-Register muß die Ursache lokalisiert werden.

Auch dieses Signal kann von mehreren Kontroll-CPLD aktiviert werden. Mögliche *Error*-Quellen müssen ausmaskierbar sein, um einen u.U. auch eingeschränkten Betrieb mit auftretenden Fehlern zu ermöglichen.

Die zwei in einem Crate befindlichen PRCs teilen diese beiden Leitungen. Es handelt sich um Open-Collector-Signale, so daß die DTU ein logisches ODER der beiden *Busy*- bzw. *Error*-Signale sieht.

5.4 Die Ring Recognition Unit (RRU)

Die Ring Recognition Unit ist mechanisch und elektrisch als eigenständige VME-Karte realisiert, funktional aber eine Ergänzungskarte zur PRC, die alle wesentlichen Kontrollfunktionen des Gesamtsystems übernimmt.

Aufgrund der großen Anzahl zwischen PRC und RRU auszutauschender Signale sind die beiden Karten über vier 48polige Steckverbinder direkt miteinander verbunden.

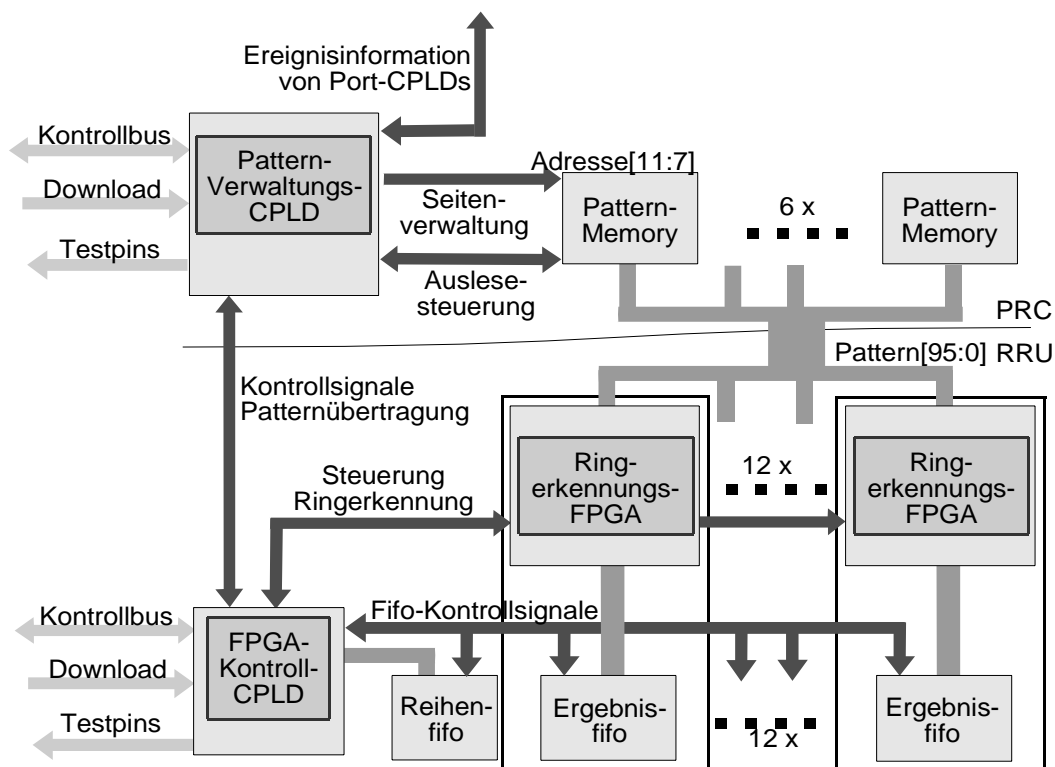


Abb. 5.11: Funktionale Übersicht der Ring Recognition Unit mit 12 FPGA für Algorithmen und nachgeschalteten Ergebnisfifos. Ein CPLD ist für die Ablaufsteuerung verantwortlich.

5.4.1 Ringerkennungs-FPGAs

Der Ringerkennungs-Algorithmus ist implementiert in 12 FPGAs vom Typ Xilinx XC4028EX-4. Jeder FPGA enthält die Logik zur Ringerkennung für 8 Spalten der Detektorebene als potentielle Ringmittelpunkte. Dies beinhaltet ein 13×20 Pad großes Registerarray für den aktuell bearbeiteten Bereich des Hit-Pattern, 8 unabhängige Einheiten mit der Logik für den eigentlichen Ringerkennungsalgorithmus, die gleiche Anzahl von nachgeschalteten Einheiten zur lokalen Maximumsuche auf Grundlage eines vom Ringerkennungsalgorithmus gelieferten Qualitätsparameters mit einem 3×9 Worte großen Registerarray für die Parameterwerte. Die Patterndaten von der PRC sind auf der Karte fest mit den zugehörigen FPGAs verdrahtet, ein Überlapp lässt Raum für Erweiterungen.

Benachbarte FPGA tauschen die Randwerte der Qualitätsparameter aus, die im jeweils anderen FPGA benötigt werden. Darüberhinaus ist auch ein begrenzter (6 Bit) Austausch von Patterndaten möglich, um dem Nachbar-FPGA vorverarbeitete Patterndaten verfügbar zu machen¹.

Die Logikressourcen der XC4028EX-FPGAs werden von den verwendeten Algorithmen zu ca. 65% ausgelastet. Timing-Simulationen der implementierten FPGA-Designs ergeben

1. Dieses im Augenblick ungenutzte Feature könnte z.B. zur Eliminierung von Einzelpads dienen.

hierbei eine maximale Taktrate von 22 MHz. Diese Werte lassen noch Raum für eventuelle Erweiterungen¹.

5.4.2 Kontroll-CPLD

In den FPGAs sind ausschließlich die Ringerkennungsalgorithmen implementiert. Alle darüber hinausgehende Funktionalität wie z.B. Start und Stop eines Ringerkennungszyklus, Patternauslese und Ergebnisverwaltung sind extern in einem CPLD² realisiert, so daß Änderungen im Algorithmus und damit im FPGA-Design keine Auswirkungen auf die grundlegende Ablaufsteuerung haben [72].

5.4.3 Ergebnis-Verwaltung

Ergebnis der Ringerkennung in den FPGAs sind in jedem Taktzyklus (d.h. unter Berücksichtigung der Latenzzeit des gepipelineten Algorithmus in jeder Patternzeile) 12 8bit-Worte („Ringpattern“), die angeben, in welcher Spalte ein potentieller Ringmittelpunkt gefunden wurde. Jeder FPGA erzeugt hieraus ein *RingFound*-Signal. Diese Signale werden im Kontroll-CPLD ODER-verknüpft. Ein positives Signal (d.h. in mindestens einer Spalte ein Ringkandidat) initiiert das Schreiben der Ringpattern-Worte aus allen FPGAs in nachgeschaltete Fifos³. Der Wert eines im Kontroll-CPLD implementierten Zeilen-Zählers wird in ein dreizehntes Fifo geschrieben.

Im letzten Taktzyklus der Ringerkennung wird in jedem Ereignis ein Datenwort zur Markierung des Ereignis-Endes in die Fifos geschrieben.

5.4.4 Lokale Variationen des Algorithmus

Zur Erhöhung der Ringerkennungseffizienz kann es notwendig sein, den verwendeten Algorithmus in Abhängigkeit von Polar- und Azimutwinkel zu variieren. Dies kann zum einen geboten sein aufgrund von ortsabhängigen Verzerrungen der Geometrie (die nicht vollständig durch die Padstruktur ausgeglichen sind) oder der Ausschmierung der Cherenkov-Ringe bzw -ellipsen, daneben auch an den Rändern der Detektorsegmente mit ihren durch die Detektorrahmen beschnittenen Ringbildern.

Variation des Algorithmus kann bedeuten Variation der verwendeten Suchmaske zur Anpassung an geometrische Verzerrungen oder nur Variation der Schwellenwerte für die im Algorithmus verwendeten Qualitätsparametern zur Anpassung an unvollständige Ringe an Detektorrändern oder an die lokale Photonstatistik (Radiatorlänge).

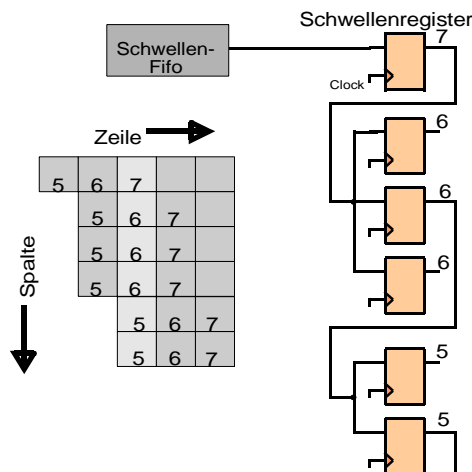
Variationen in direkter Abhängigkeit von Polar- oder Azimutwinkel wären nur sehr aufwendig zu realisieren. Aufgrund der adaptiven Geometrie der Padstruktur in der Detektorebene können jedoch Spalten des Hitpattern näherungsweise mit Polarwinkeln identifiziert werden. Da jeder Pattern-Spalte eine dedizierte Hardware-Ringerkennungseinheit zuge-

1. Die Größen Logikressourcen und max. Taktrate (d.h. max. Laufzeit zwischen Registerstufen) sind gerade bei höherer Auslastung miteinander korreliert, da dann zusätzliche Logik zunehmend die Verwendung ineffektiverer Routing-Ressourcen (z.B. durch Logik-Blöcke hindurch) erforderlich macht.

2. Lattice ispLSI1032E-70

3. Cypress CY7C219 512x9bit

Abb. 5.12: Verteilung zeilenabhängiger Schwellenwerte durch Propagation der aufeinanderfolgenden Schwellenwerte durch die FPGAs entsprechend der Kante des realen Detektors.



ordnet ist, könnten polare Variationen sowohl der Suchmasken als auch der Schwellen mit der beschriebenen Hardware realisiert werden.

Variationen mit dem Azimuthwinkel sind nur durch zeilen- (d.h. taktzyklus-) und darüberhinaus spaltenabhängige Änderungen möglich. Die Zyklusabhängigkeit schliesst Variationen der Suchmaske aus¹, eine Variation der Schwellenwerte ist zumindest für die Bereiche der Rahmen mit dem folgenden Verfahren möglich: ein Fifo enthält die aufeinanderfolgenden Werte einer Schwelle. Das Fifo ist wie in Abb. 5.12 dargestellt in einer Kette mit allen Ringerkennungseinheiten verbunden. Mit jedem Taktzyklus werden die Schwellenwerte jeweils zu allen Einheiten weiterpropagiert, die dem nachfolgenden Azimuthbereich entsprechen. In der Praxis wird jeweils ein Fifo für den vorderen bzw. den hinteren Rand der Detektorfläche benötigt.

In den abschließenden beiden Abbildungen sind die fertugbestückten Karten der RICH-PRC und der RICH-RRU mit den wesentlichen Funktionsgruppen gezeigt.

1. Dies würde eine Rekonfigurierung des FPGAs erfordern oder eine komplexere Logik mit vollständig implementierten aber taktabhängig evaluierten Teilmasken.

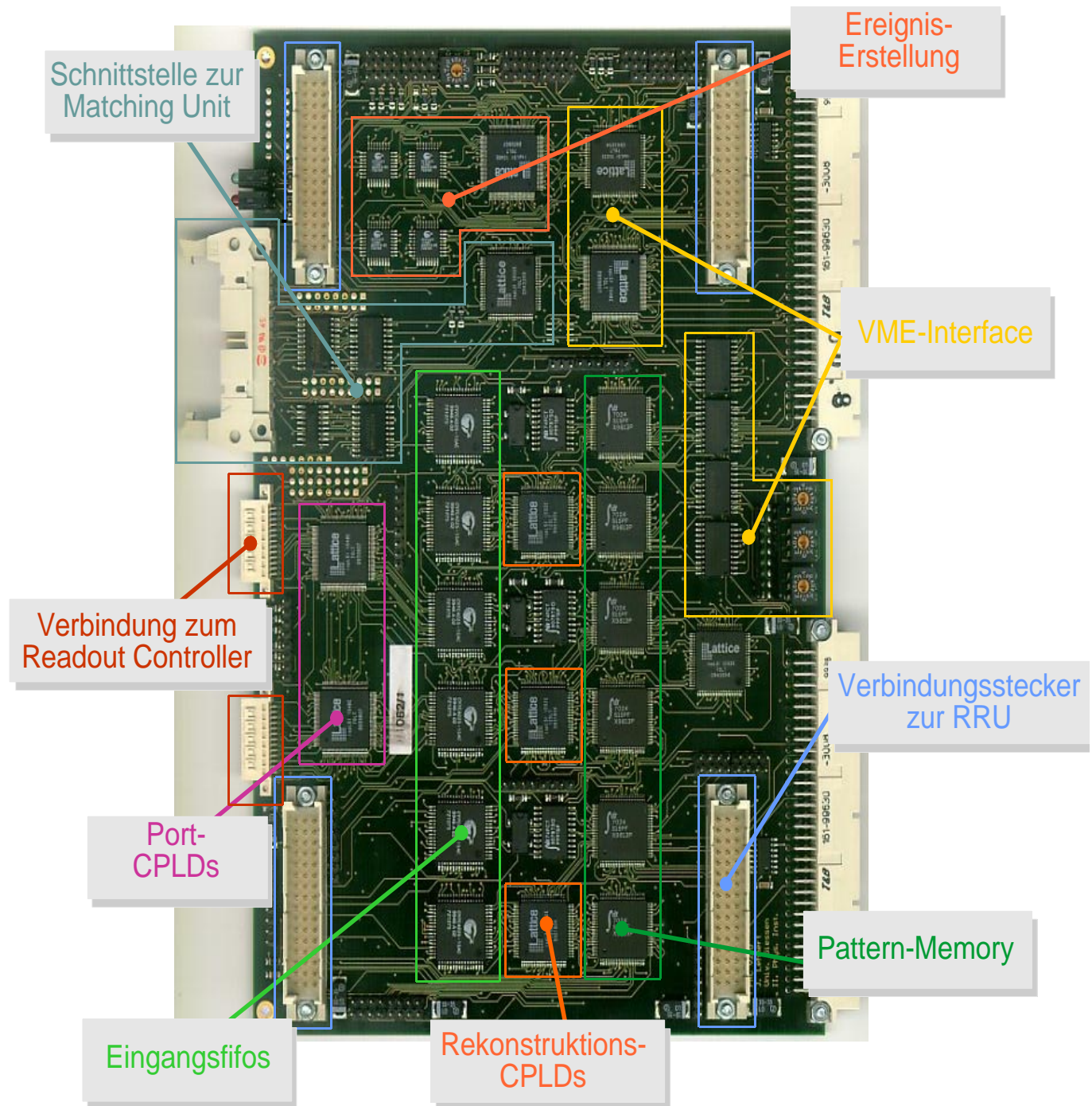


Abb. 5.13: Die Pattern Reconstruction Card als VME-Karte
 Farbig zusammengefasst die beschriebenen Funktionseinheiten. Links die Schnittstellen zu den beiden Readout Controllern und zur Matching Unit, zentral die Eingangsfifos mit zugehörigen Pattern-Rekonstruktionseinheiten und Pattern-SRAMS, in den vier Ecken die Verbindungsstecker zur RRU, oben rechts die Schnittstelle zum VME-Bus.

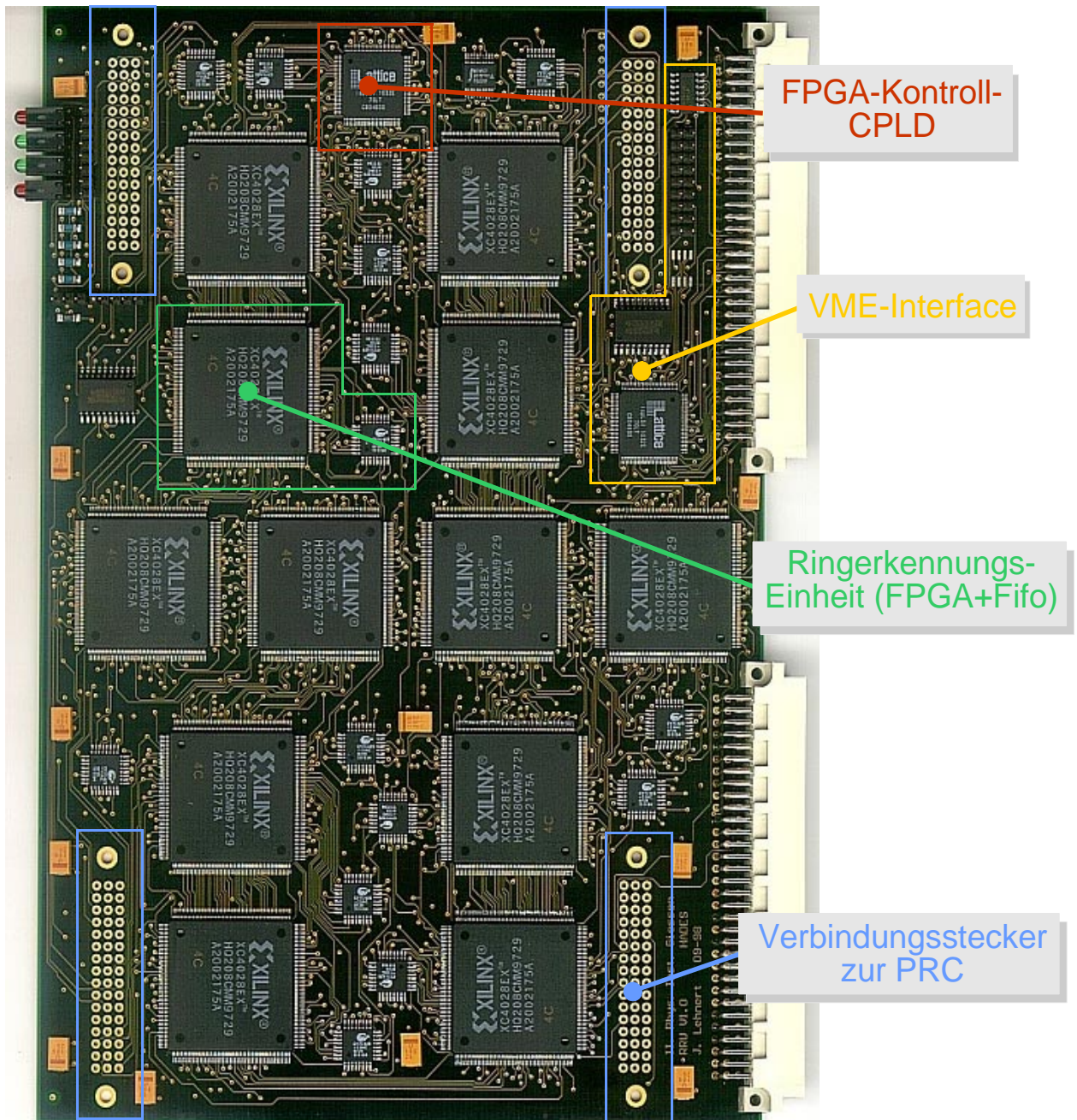


Abb. 5.14: Die Ring Reconstruction Unit als VME-Karte

Farbig zusammengefasst jeweils die Funktionseinheiten: In den vier Ecken die Steckverbindungen zum Patterntransfer von und Ergebnistransfer zur PRC, ein CPLD zur Ablaufsteuerung der ereignisweisen Ringerkennung sowie 12 Einheiten bestehend aus jeweils einem FPGA mit nachgeschaltetem Ergebnisfifo zur Ringerkennung in 8 Spalten der Detektorebene.

6 Ergebnisse und Ausblick

Die Ringerkennungshardware und der Hardwarealgorithmus wurden einer Reihe von Tests unterzogen. Die Hardware wurde intensiv in verschiedenen Konfigurationen getestet, der Algorithmus mit Daten aus HADES-Testexperimenten. Die bisherigen Ergebnisse werden in diesem Kapitel zusammengefasst.

6.1 Daten aus dem Prototypentest 97

Im Sommer 1997 wurde an der GSI Darmstadt eine Teststrahlzeit mit Prototypen von RICH-, TOF- und Präschauerdetektor durchgeführt. Im Fall des RICH kam kein Originalmodul zum Einsatz, sondern ein quadratischer Prototyp des Photonendetektor mit 64×64 Pads und unter 30° zur Strahlrichtung ein kastenförmiges Radiatorvolumen (40cm Radiatorlänge) mit einem 1mm dicken Glasspiegel. Die Geometrie entspricht damit nicht der endgültigen HADES-Anordnung.

Der Test wurde durchgeführt mit einem Uran-Strahl bei 1 AGeV und einem Blei-Target mit 10% Wechselwirkungslänge. Bei den detektierten Elektronen handelt es sich daher im wesentlichen um Konversionspaare aus dem Target nach $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ -Zerfällen.

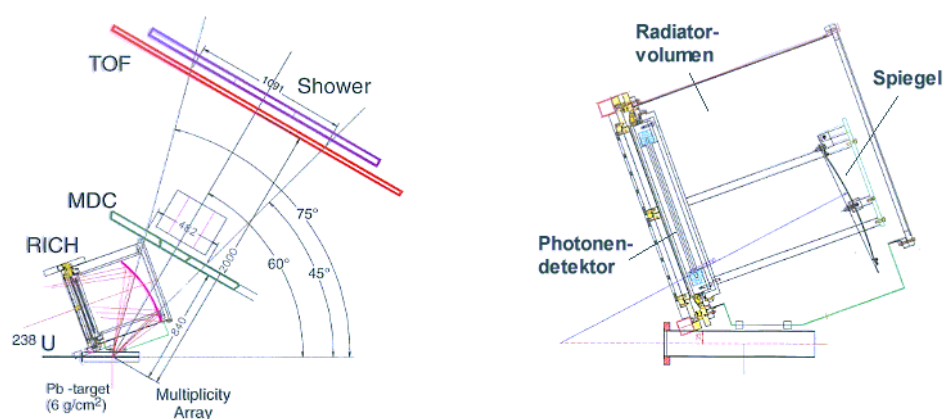


Abb. 6.1: Detektoraufbau bei der Teststrahlzeit im Sommer 97: links die Anordnung aller Teildetektoren, recht ein Querschnitt durch den Prototyp-RICH

Die Analyse der RICH-Daten ergab eine mittlere Belegung von 26 Pads/Ereignis (0,8% Belegung) [54]. Die zugehörige Offline-Ringerkennung (vgl. Kap. 4.2.4) fand im Mittels 15 Pads in einem erkannten Ring sowie 6 lokale Maxima [81]. Auf die Photonenzahl kann hieraus wegen der geringen Ringgröße nicht direkt geschlossen werden.

Tabelle 6-1. Effizienzen und Fehlidentifizierungsrate für einige Sätze von Schwellen des Algorithmus, angewandt auf Ereignisse der 97er-Teststrahlzeit mit einer Padmultiplizität größer 10. In Klammern Werte für alle Ereignisse mit mindestens einem durch den Software-Algorithmus identifizierten Ring und einer Padmultiplizität kleiner 200;

Schwelle Ringregion	Schwelle Vetoregion	Schwelle Pads	Effizienz [%]	Fehlidentifizierungsrate [Ringe/Ereignis]
10	4	2	78	0,32
9	4	4	88,5 (85,6)	0,48 (0,71)
8	3	5	86,5	0,58
8	3	4	90	0,8
8	4	5	94,5 (93,6)	1,02 (1,45)

Mit den Resultaten der Offline-Ringerkennung wurde der Hardwarealgorithmus in der Version SOC2 (s. Kap. 4.2.3.1) getestet. In den zur Verfügung stehenden kalibrierten Daten fand der Software-Algorithmus 508 Ringe. Die vom Softwarealgorithmus erreichten Effizienzen sind für einige Schwellenwerte in Tab. 6-1 dargestellt. Das Einstellen höherer Effizienzen führt zu einem starken Anstieg der Fehlerrate (Zeile 5). Berücksichtigt wurden dabei alle Ereignisse mit mehr als 10 Pads (zur Ereignisauswahl vgl. Kap. 6.3) bzw. die Ereignisse mit mindestens einem durch den Software-Algorithmus gefundenen Ring. Bei diesen Daten ergibt sich eine deutliche Abhängigkeit von der Pulshöhenschwelle. Über diese Schwelle werden die in das Pattern für den Hardwarealgorithmus eingehenden Pads selektiert. Während die Fehlidentifizierungsrate mit steigender Schwelle abnimmt, zeigt die Effizienz ein Maximum. Dieser Effekt könnte auf zu niedrig eingestellte Schwellen in

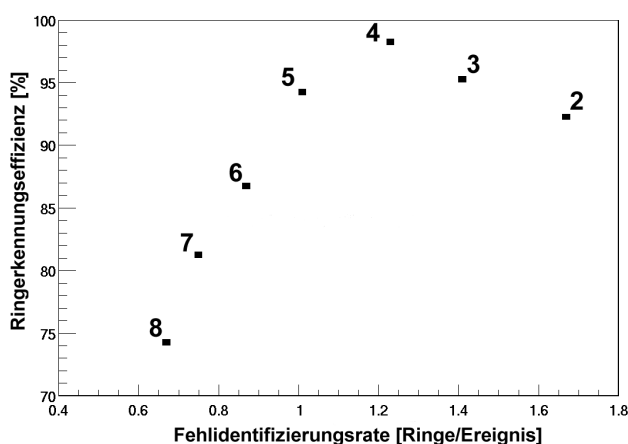


Abb. 6.2: Effizienzen und Fehlerraten für einen festen Schwellensatz und variierende Padschwellen (an den Datenpunkten eingetragen), angewandt auf die Daten der Teststrahlzeit 97 mit dem Offline-Algorithmus als Referenz: Die Fehlerrate nimmt kontinuierlich ab, die Effizienz zeigt ein Maximum.

der Ausleseelektronik zurückzuführen sein, wodurch der zusätzliche Abzug von 4 Pads ein Grundrauschen effektiv unterdrückt und erst bei höheren Triggerschwellen auch zur Effizienz beitragende Pads entfernt werden.

6.2 Hardwaretests

Im Rahmen der Inbetriebnahme der Triggerelektronik wurden umfangreiche Board- und Systemtests der Hardware durchgeführt.

Im Labor wurde die grundlegende Funktionalität beider Karten der RICH-IPU getestet. In einem Testaufbau erhielten die Karten über den Readoutcontroller-Bus Daten von einer für diesen Zweck modifizierten VME-Karte.

Auf diese Weise wurden mit den Daten von Einzelereignissen die Datenpfade nach Spezifikation auf Funktion und Geschwindigkeit getestet: die Datenübertragung vom Readout Controller mit 16 MHz Datenrate, die Patternerstellung mit 10 MHz, der Ringerkennungsalgorithmus mit 12 MHz, die Ergebnisauslese mit 10 MHz sowie der Transfer zur Matching Unit mit 20 MHz.

Die Schnittstelle zum RICH-Readoutcontroller wurde in mehreren Laboraufbauten (GSI, München, Gießen) eingesetzt und getestet. Nach dem Inbetriebnahme stand ein vollständiges Readout-System mit Triggerdistribution (CTU, DTU) sowie einem Readout-Controller als Datenquelle für die weiteren Tests zur Verfügung.

Die Schnittstelle zur Matching Unit wurde zum einen mit auf der IPU generierten Ereignisdaten bei Raten oberhalb 50 kHz getestet, daneben unter Verwendung des vollen Readoutsystems und der gesamten IPU-Funktionalität mit einer Ereignisrate von 36 kHz (begrenzt durch das Readoutsystem).

In den folgenden Tests zur Systemintegration wurde ein vollständiges „Mini-System“ bestehend aus RICH- und Showerreadoutkarten mit den zugehörigen Second-Level-Trigger-Einheiten sowie Matching Unit, Triggerdistribution (vollständiger Entscheidungskreislauf) und Datenauslese mit festen Testdaten bei 10 kHz Ereignisrate dauerhaft betrieben.

6.3 Testexperiment Mai/Juni 2000

Die nächste Stufe der Inbetriebnahme bestand in einem Trigger- und Readouttest kombiniert mit einer HADES-Teststrahlzeit.

6.3.1 Hardwareintegration

Die Testziele bezüglich der Triggerelektronik waren hierbei:

- Betrieb mit hohen Ereignisraten sowie -erstmalig- mit hohen Datenmengen innerhalb der Ereignisse, da für diesen Test die vollständige RICH-Frontend-Elektronik für die Readoutcontroller zur Verfügung stand.
- Betrieb direkt am Detektor mit allen möglichen elektrischen Störquellen der dortigen Umgebung.

- Betrieb mit realen Detektordaten und damit ereignisweise variierenden Daten, während vorher mit festen und speziell generierten Datenmustern getestet wurde.

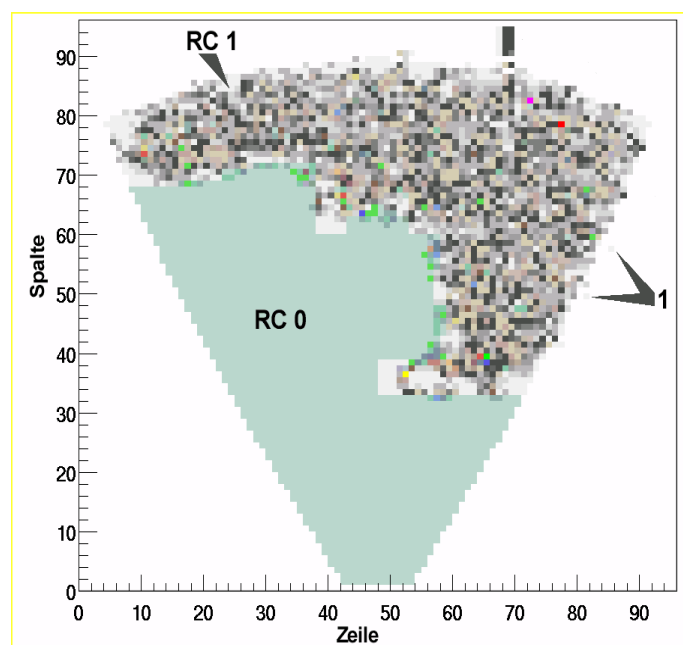
Die RICH-IPU konnte aufgrund der Rahmenbedingungen dieses Tests nur über drei Tage hinweg am Detektor betrieben werden. In dieser Zeit wurden anfangs elektrische Probleme behoben, die aus dem dortigen Aufbau resultierten.

Daher wurde die IPU nur am letzten Tag der Strahlzeit in einem reduzierten Aufbau mit einem angeschlossenen Readoutcontroller (für ein halbes Detektorsegment) eingesetzt.

Das gesamte Trigger- und Readoutsystem wurde bei einer Ereignisrate von einigen hundert Hertz betrieben, die Entscheidungen der Second-Level-Trigger-IPUs wurden über die Matching Unit vom HADES-Datenaufnahmesystem ausgelesen, die Triggerentscheidung jedoch als einfache 1:1-Untersetzung gefällt ohne Berücksichtigung der IPU-Daten.

In Abb. 6.3 ist der vom Readoutcontroller 1 ausgelesene und damit von der RICH-Trigger-elektronik abgedeckte Bereich des Detektorsegments zu sehen. Dargestellt ist darüberhinaus die Verteilung erkannter Ringmittelpunkte; die Ringerkennungshardware arbeitet also im gesamten Bereich des RC1, Ringe werden bis an den Rand des Bereichs und knapp darüber hinaus erkannt (Abb. 6.3, Markierung „1“).

Abb. 6.3: Verteilung der von der RICH-IPU gefundenen Ringmittelpunkte auf Basis der Daten von RC1. Erkennbar ist die Zuordnung der Pads zu den beiden Readoutcontrollern. Mit (1) markiert einige Pads, bei denen aufgrund der niedrigen Schwellen auch außerhalb des Bereichs von RC1 Ringmittelpunkte gefunden wurden.



6.3.2 Test des Ringerkennungsalgorithmus mit Strahlzeitdaten

Mit den Daten der Teststrahlzeit wurde ein Vergleich zwischen den Ergebnissen des Offline-Algorithmus und der Software-Implementierung des Hardware-Algorithmus durchgeführt.

Der Offline-Algorithmus war dabei mit den Daten der vorangegangenen Detektortests optimiert, eine Verifikation der gefundenen Elektronenkandidaten mit Hilfe von Daten der anderen Detektorsysteme konnte im Rahmen des Testexperiments nicht durchgeführt werden.

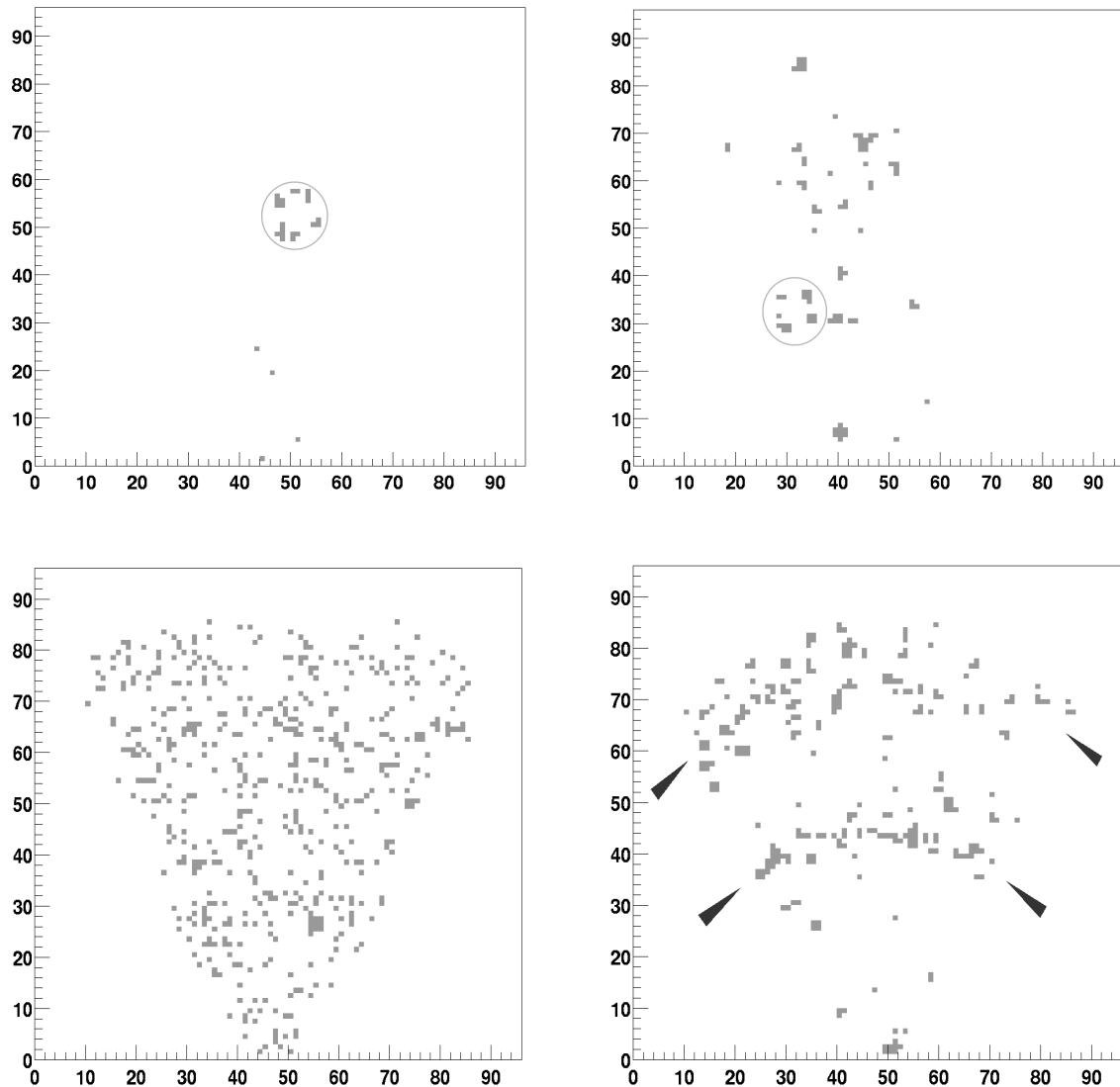


Abb. 6.4: Beispiele für Ringereignisse der Teststrahlzeit 2000 (Kreise markieren identifizierte Ringe): ein Ring hoher Qualität (oben links), ein Ring durchschnittlicher Qualität (oben rechts), ein typisches Rauschereignis mit einer Padmultiplizität größer 500, in dem der Hardwarealgorithmus 39 Ringe identifiziert (unten links) sowie ein Untergrundereignis mit zwei großen Ringsegmenten verursacht durch den Festkörpereradiator (Pfeile zeigen den Verlauf an).

Die Qualität der vorliegenden Testdaten wird durch einige Faktoren begrenzt, die auch Aussagen über die Effektivität der Ringerkennung erschweren:

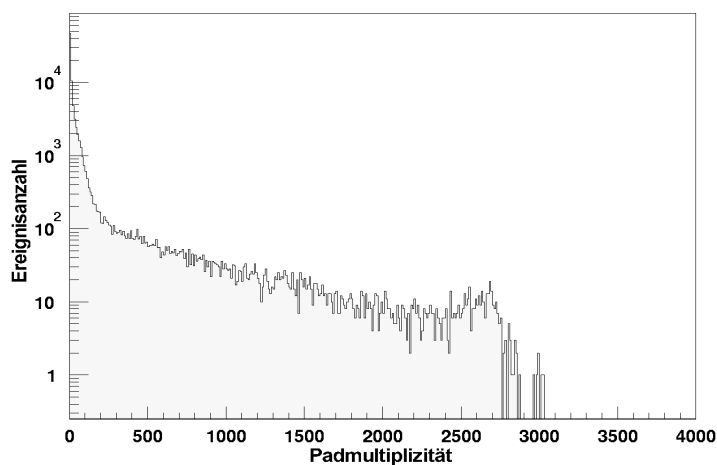
- Eine größere Zahl von Ereignissen zeigt Rauschen auf einem hohen Niveau, das zu einer größeren Zahl ansprechender Pads führte, die entweder über die komplette Detektorfläche oder entlang der durch den Aufbau der Padebene vorgegebenen Teilflächen gleichmäßig verteilt sind.
- Unter den Ereignissen hoher Detektorbelegung findet sich eine Reihe solcher, die vom Durchgang geladener Teilchen durch einen nah am Strahl montierten Festkörperradiator verursacht wurden, der für einen Test des RICH-Detektors benötigt wurde und dessen Cherenkovlicht weite Teile des Detektors beleuchtete.
- Die Betriebsparameter des RICH-Detektors (v. a. Gastransmissionen, Quanteneffizienz) sowie die Eigenschaften neuer Komponenten (Abbildungsqualität der Glasspiegel) sind nicht im Detail bekannt.

Einige Beispiele von Ereignissen mit identifizierten Ringen oder typischem Untergrund sind in Abb. 6.4 dargestellt.

Für den Algorithmusvergleich stellt sich die Frage, welchen Satz von Ereignissen man zur angemessenen Bestimmung von Effizienzen und Fehlidentifizierungsraten heranzieht. Da keine geeigneten Daten weiterer Detektoren zur Verfügung stehen, um z.B. zentrale Ereignisse zu selektieren, müssen andere Kriterien genutzt werden. Wählt man Ereignisse über deren Padmultiplizität aus, sind die folgenden Punkte zu beachten:

- Aus der Verteilung der Padmultiplizitäten in Abb. 6.5 ist ersichtlich, daß die Gesamtereignisanzahl und damit direkt die Fehlidentifizierungsrate stark von der Wahl der unteren Schwelle abhängt.
- Es existiert ein Anteil von Ereignissen hoher Padmultiplizitäten, der sich aus den beiden oben erwähnten Anteilen der Rauschereignisse und der Festkörperradiatorereignisse zusammensetzt. Bei Multiplizitäten oberhalb 200 Pads sind fast ausschließlich solche Ereignisse auffindbar. Der Versuch, bei hohen Multiplizitäten die Rauschereignisse von anderen evtl. vorhandenen Ereignisklassen über die Auswertung lokaler

Abb. 6.5: Häufigkeitsverteilung der Ereignisse als Funktion der RICH-Padmultiplizitäten für einen Satz von 84590 Ereignissen der Teststrahlzeit Juni2000..



Schwankungen bzw. gleichmäßiger Verteilungen der Belegung zu trennen, führt zu einem Abschneiden der Ereignisse oberhalb einer Schwelle ohne weitergehende Selektivität.

Es wurden daher Effizienzen und Fehlidentifizierungsraten als Funktion der Multiplizität bestimmt, um Effekte von Multiplizitätsschwellen studieren zu können. Für den Algorithmus wurden die Schwellenpaare (Ring-/Vetoregion) (8;4) bzw. (9;3) verwendet. Die resultierenden Verteilungen ergeben extrem hohe Fehlerraten bei mittleren Multiplizitäten. Diese sind verursacht durch die starke Sensitivität des Ringerkennungsalgorithmus auf zufällig verteilte Einzelpads im Dichtebereich von ca. 5-35% ansprechender Pads. Durch die zweifache Berücksichtigung aller Ring-Pads wird der Schwellenwert in der Ringregion bereits bei 5 Pads erreicht, solange sie so über den Ringumfang verteilt sind, daß sie zu unterschiedlichen Padgruppen beitragen. Die Vetobedingung führt bei noch höheren Padmultiplizitäten wieder zu einer Verringerung der Fehlerrate.

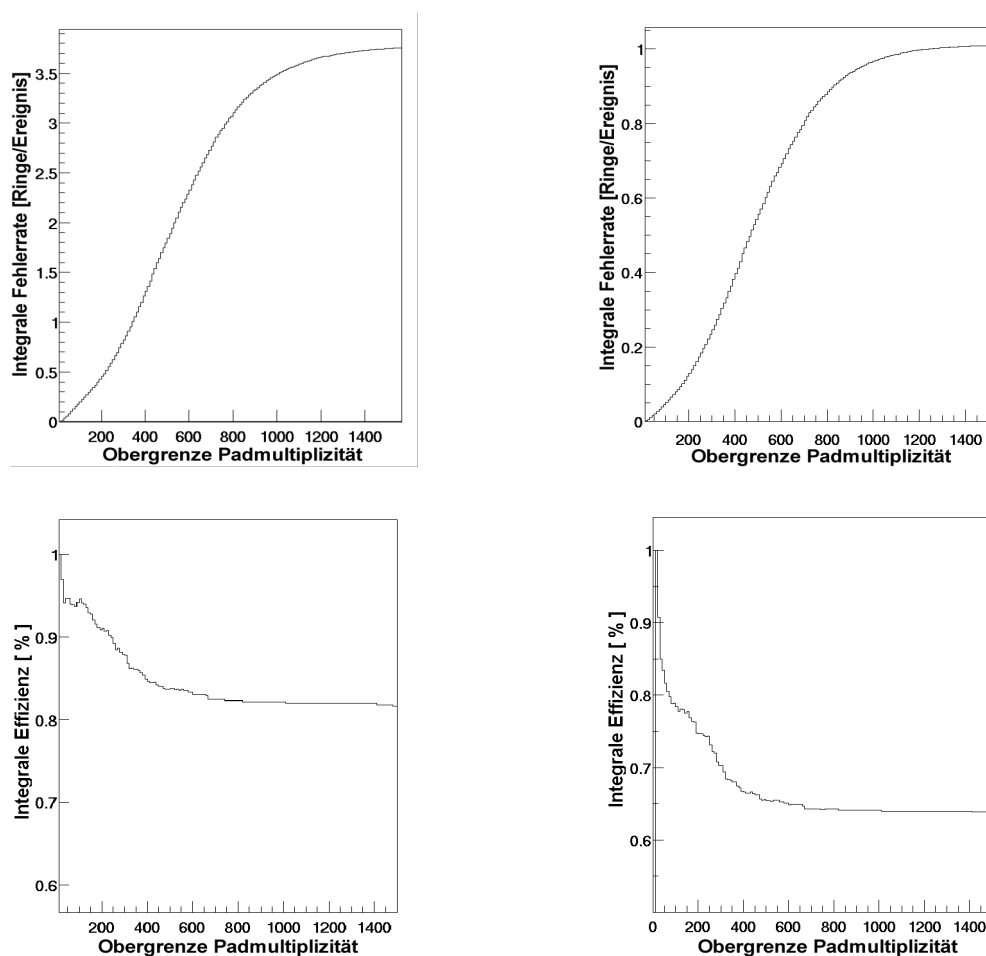


Abb. 6.6: Integrale Effizienz und Fehlidentifizierungsrate: Dargestellt sind für die Schwellenpaare (8;4) (links) und (9;3) (rechts) die Effizienzen und Fehlerraten bei Berücksichtigung aller Ereignisse mit einer Multiplizität von 0 bis zu einer oberen Schwelle.

Die Sensitivität auf untere und obere Schwellen der Padmultiplizitäten wurde durch Bestimmung der integralen Effizienzen und Fehlidentifizierungsraten als Funktion dieser Schwellen getestet (Abb. 6.6). Es ergibt sich ein glatter Verlauf, der keine bestimmten Schwellenwerte zur Abtrennung von Untergrundereignissen nahelegt.

Zur weiteren Bestimmung von Effizienzen und Fehlerraten wurden daher nur Ereignisse ausgewählt, in denen der Offline-Algorithmus mindestens einen Ring findet und die gleichzeitig eine Padmultiplizität kleiner als 200 bzw. 150 haben. Ergebnisse für diese Ereignisse sind in Tab. 6-2 zusammengefaßt.

Tabelle 6-2. Effizienzen und Fehlerraten für Ereignisse mit mindestens einem durch den Offline-Algorithmus gefundenen Ring und einer Padmultiplizität kleiner 200 (Werte in Klammern für Padmultiplizität kleiner 150). Die Zahlen wurden mit der Software-Implementierung des Hardware-Algorithmus für verschiedene Schwellenwerte gewonnen (mit Ausnahme der letzten Zeile). Als Referenz wurde der Offline-Algorithmus verwendet.

Ringschwelle	Vetoschwelle	Effizienz [%]	Fehlidentifizierungsrate [Ringe / Ereignis]	Anmerkung
10	5	(78)	(0,56)	Auswertung der gesamten Padebene
9	4	86 (87,5)	1,38 (0,96)	
8	4	91 (93,5)	3,02 (2,06)	
8	4	98	0,96	Auswertung nur des Bereichs von Readout-Controller 1 (entspricht Hardware)
8	4	77	1,46	Daten der RICH-IPU

Stellt man für den Hardwarealgorithmus Schwellen ein, die hinreichend hohe Effizienzen im Bereich $> 80\%$ liefern, erhält man Fehlidentifizierungsraten, die deutlich über den mit den simulierten Daten erzielten Werten liegen. Der Vergleich der Ergebnisse für eine obere Schwelle der Padmultiplizität von 200 bzw. 150 zeigt nach wie vor eine starke Abhängigkeit von dieser Schwelle, was neben der zu erwartenden Verbesserung aufgrund der geringeren Padanzahl Indiz dafür ist, daß auch in diesem Multiplizitätsbereich noch eine deutliche Anzahl von Untergrundereignissen vorhanden ist.

Um neben dem Test der Algorithmus-Performance auch einen Vergleich mit den von der RICH-IPU gelieferten Daten zu ermöglichen, wurde die Software-Implementierung des Hardware-Algorithmus zusätzlich unter den für die Hardware gültigen Bedingungen getestet: mit den dort verwendeten Schwellen (8;4) und allein den Padinformationen des Readoutcontrollers 1. Gleichfalls wurden die Referenzergebnisse des Softwarealgorithmus auf den Bereich eingeschränkt, in dem der Hardwarealgorithmus einen potentiellen Ring auswerten kann (d.h. auf den Bereich des RC1 abzüglich eines Randbereichs zum RC0 hin).

Für diesen Bereich ergibt sich eine Effizienz von 98% bei ca. 1 fehlidentifizierten Ring pro Ereignis, Werte, die über den für die gesamte Detektorebene bestimmten (91% bei 3 fehlidentifizierten Ringen/Ereignis) liegen. Die in Abb. 6.7 gezeigte Abhängigkeit der Effizienz und der Anzahl fehlidentifizierter Ringe von der Spaltennummer und damit grob dem

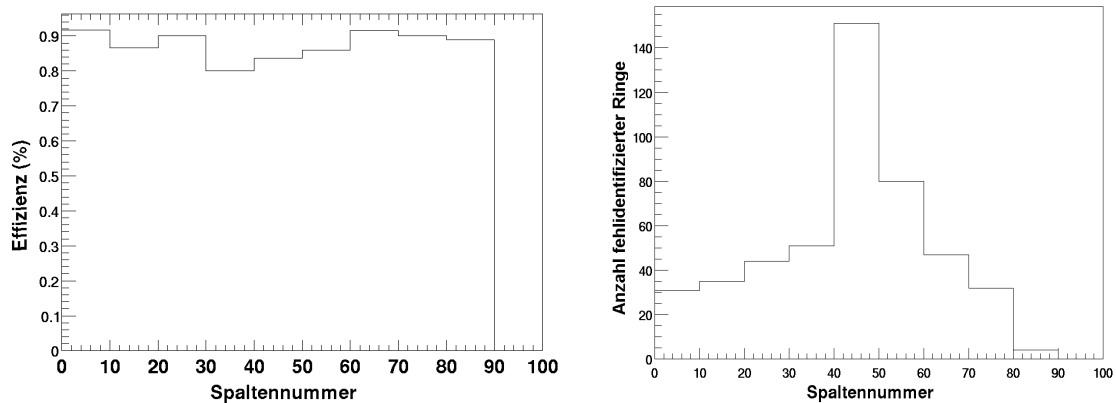


Abb. 6.7: Effizienz und Anzahl fehlidentifizierter Ringe als Funktion der Spaltennummer (insgesamt 152 Ereignisse). Die hohe Zahl fehlidentifizierter Ringe im Bereich der Spalten 40-50 korreliert mit der entsprechenden Padmultiplizität. Ein Beitrag in diesem Bereich kommt von den Chrenkov-Ringen des Festkörper-Radiators.

Polarwinkel zeigt, daß dies auf die deutlich besseren Effizienzen und Fehlerraten bei hohen Spaltenwerten zurückzuführen ist, die dem RC1 (vgl. Abb. 6.3) zugeordnet sind. .

Der Vergleich der Hardwareergebnisse mit den vom Softwarealgorithmus gefundenen Ringen zeigt Ergebnisse, die deutlich von den zu erwartenden abweichen. Bei einer Gesamtzahl von 106 Ringen ergibt sich für die Daten der Hardware eine Effizienz von 77% bei 1,46 fehlidentifizierten Ringen /Ereignis. Die Diskrepanz zu den von der Softwareversion des identischen Algorithmus bestimmten Werten zeigt, daß im Datenpfad zur RICH-IPU Daten modifiziert wurden und damit von denen abweichen, die über das Datenaufnahmesystem der Softwareversion des Algorithmus zur Verfügung stehen. Bestimmt man für die von der Hardware ermittelten Ringpositionen die zugehörigen Qualitätsparameter auf Basis der den Software-Algorithmen vorliegenden Daten, so zeigt sich (Abb. 6.8), daß die Werte nach wie vor nahe an den Schwellen liegen. Diese Verteilung der Qualitätsparameter

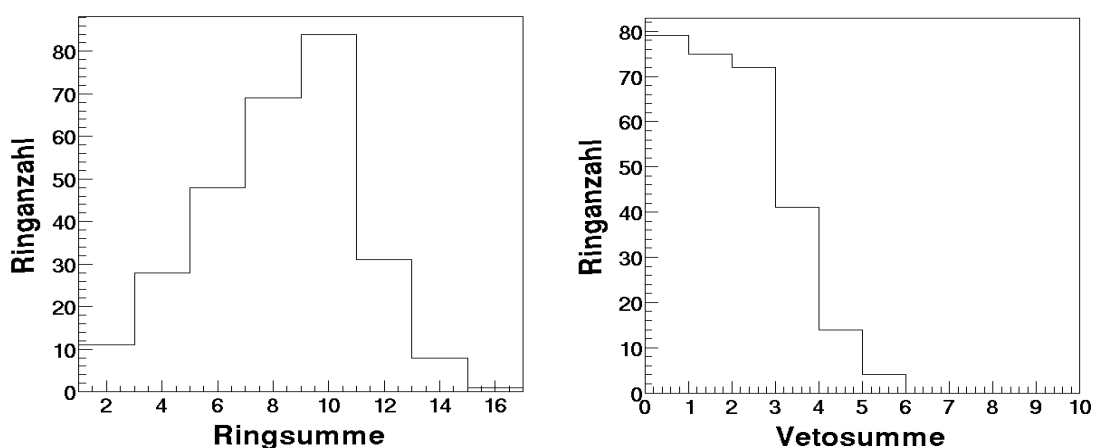


Abb. 6.8: Verteilung der Qualitätsparameter Ring- und Vetosumme für die von der Hardware gefundenen Ringe.

legt nahe, daß entweder beim Datentransfer vom Readoutcontroller zur IPU oder bei der Patternerstellung in der IPU einzelne Datenworte verändert und damit im der Ringerkennung zugrundeliegenden Pattern einzelne Pads willkürlich verschoben wurden.

Die Abhängigkeit der Performance-Werte von der Schwelle auf die im Algorithmus berücksichtigten Pads wurde wie in den 97er-Daten untersucht. In Tab. 6-3 sind die Ergebnisse dargestellt. Die Fehlidentifizierungsraten nehmen mit zunehmender Schwelle ab, die Effizienz zeigt keine deutliche Abhängigkeit wie in den 97er-Daten, was auf besser oder zumindest höher eingestellte Schwellenwerte hindeutet. Auch in diesem Fall scheint die Padschwelle geeignet, eine Feinabstimmung der gewünschten Fehlerrate zu ermöglichen, und sollte daher in den Frondend-Karten implementiert werden.

Tabelle 6-3. Effizienzen und Fehlerraten als Funktion der Padschwelle für Ereignisse mit mindestens einem durch den Softwarealgorithmus gefundenen Ring und einer Padmultiplizität kleiner 150. Im Algorithmus wurden die Schwellenwerte (9;4) verwendet.

Padschwelle	Effizienz [%]	Fehlidentifizierungsrate [Ringe / Ereignis]
0	87,5	0,96
2	87,5	0,92
5	84,5	0,85

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß der erstmalige Einsatz der RICH-IPU im HADES-Triggersystem den erfolgreichen Betrieb der Elektronik und die Integration in das Trigger- und Datenaufnahmesystem gezeigt hat.

Die erkannten Probleme beim Datentransfer können in den folgenden Triggertests gezielt untersucht und behoben werden. Die selbst unter diesen Einschränkungen erzielten Werte für Effizienzen machen den Einsatz eines selektiven Second-Level-Triggers in den nächsten Teststrahlzeiten möglich.

Die mit simulierten Daten erzielten Effizienzen und Fehlerraten werden mit den Daten der Strahlzeit Mai/Juni 2000 nicht erreicht.

Diese Ergebnisse werden jedoch durch die Qualität der zur Verfügung stehenden Daten relativiert. Realistischere Werte für Effizienzen und vor allem Fehlidentifizierungsraten können nicht bestimmt werden, solange kein selektiver First Level Trigger Verwendung findet und die beschriebenen Effekte zu einer hohen Rate von Untergrundereignissen führen. Es ist daher unbedingt notwendig, deren Ursachen zu beheben oder zumindest soweit zu reduzieren, daß das Rauschen im wesentlichen aus Einzelpads besteht¹ und der Hardwarealgorithmus bei Bedarf in Richtung geringerer Sensitivität auf solche modifiziert werden kann.

1. Bei Rauschereignissen sehr hoher Multiplizität ergibt sich schon eine größere Anzahl zusammenhängender Pads.

6.4 Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Entwicklung einer schnellen Hardware und geeigneter Algorithmen zur schnellen Ringerkennung im Rahmen des Second-Level-Trigger-Systems des HADES-Detektorsystems vorgestellt. Die FPGA-basierte Ringerkennung ist in der Lage, die höchsten bei HADES-Experimenten auftretenden Ereignisraten zu verarbeiten und mit einer hohen Effizienz Ringe zu identifizieren. Integriert in das gesamte Trigger- und Datenaufnahmesystem wird dies die Selektion von Ereignissen mit Elektronenkandidaten ermöglichen.

Die Entwicklung des gesamten System aus Auslese-, Datenaufnahme- und Triggerelektronik, an der Gruppen aus einer Reihe von Institutionen teilnehmen, und in deren Rahmen eine große Zahl an Eigenentwicklungen in Betrieb genommen werden muß, ist bei einem Detektorsystem dieser Komplexität ein langandauernder Prozeß.

Die kommenden Schritte bestehen in der Behebung der beim ersten Einsatz am Detektor erkannten Probleme betreffend Datentransfer/Mustererstellung sowie Ergebnisauslese.

Fertigung und Test der Karten für die weiteren Detektorsegmente sowie letztendlich die Inbetriebnahme des Gesamtsystems mit Auslese mehrerer RICH-IPUs sind die ausstehenden Schritte hin zu einem ersten Experiment mit vollständigem Aufbau.

Die Entwicklung der Hardware ist in diesem Stadium weitgehend abgeschlossen. Erweiterungsmöglichkeiten bestehen allein in der Implementierung zusätzlicher (im Rahmen der Logikressourcen) oder alternativer Statusinformationen zur Erleichterung der zukünftigen Arbeit mit den Karten.

Der verwendete Algorithmus kann mit dem Vorliegen von verbesserten Detektordaten aus den folgenden Tests und Experimenten abgestimmt werden. Die in dieser Arbeit vorgestellte Variante ist auf Basis der Simulationsergebnisse optimiert. Sollten sich Modifikationen oder Erweiterungen in der Art der beschriebenen Varianten des Algorithmus als sinnvoll erweisen, sind diese in der zur Verfügung stehenden Hardware realisierbar. Eine bessere Berücksichtigung der Clusterstruktur der Photonentreffer durch eine geeignete Modifikation der Struktur ausgewerteter Padgruppen scheint eine sinnvolle Ergänzung zu sein.

Mit höherem Einsatz von Logikressourcen wären deutliche Erweiterungen des Algorithmus vorstellbar. Bereits die heute zur Verfügung stehenden 2,5-Volt-FPGA bieten das 10fache an Logikressourcen verglichen mit den im HADES-Trigger verwendeten, in den nächsten Jahren werden diese Werte sich noch erhöhen. Damit wäre es möglich, den Hardwarealgorithmus im Sinne des Offline-Algorithmus zu erweitern und z.B. eine (reduzierte) Pulshöheninformation zu bearbeiten und gewichtete Masken zu verwenden.

Alternativ könnte der Algorithmus auf ein Pattern in einem deutlich größeren Suchareal ausgeweitet werden. Bereits in der existierenden Version werden die Kreisumfänge der Radien 2, 4, und 6 ausgewertet. Erweitert man dies auf weitere -auch größere- Radien, ließen sich mit Algorithmen gleichen Typs auch Ringe unterschiedlichen Durchmessers

identifizieren. Gerade bei großen Ringen in Detektoren mit höherer Photonenzahl könnte aus der Zahl gültiger Padgruppen direkter auf die Photonenzahl geschlossen werden. Damit wäre ein erweiterter Einsatz auch in den typischen RICH-Anwendungen zur Separation von Pionen, Kaonen und Protonen möglich.

Tabellenverzeichnis

Eigenschaften der Vektormesonen	10
Datenraten der Teildetektoren	27
Leistungsparameter des Second-Level-Triggers.	34
Effizienzen und Fehlidentifikationen der verschiedenen Triggerkomponenten	35
Effizienzen und Fehlidentifizierungsraten für Daten der 97er-Teststrahlzeit .	76
Effizienzen und Fehlidentifizierungsraten für Daten der Strahlzeit Juni 2000.	82
Effizienzen und Fehlidentifizierungsraten als Funktion der Padschwelle	84

Abbildungsverzeichnis

Das Quarkkondensat als Funktion von Temperatur und Dichte	3
Zeitlicher Ablauf einer zentralen Schwerionenkollision	5
Abhängigkeit der Produktionswahrscheinlichkeit pro partizipierendem Nukleon von der zur Verfügung stehenden Energie	7
Modifikationen der Spektren der Vektormesonen im Medium	9
Dileptonenspektrum des CERES-Spektrometers (Pb+Au bei 158 AGeV)	11
Das DLS am BEVALAC	12
Dileptonenspektrum der Reaktion Ca+Ca bei 1 AGeV	13
Der HADES-Detektor in einer 3D-Ansicht	14
Querschnitt durch das HADES-Detektorsystem	16
Simulation des HADES-Dielektronenspektrum in der Reaktion Au+Au bei 1 AGeV	17
Entstehung des Cherenkov-Lichts	18
Funktionsprinzip eines Schwellencherenkov-Detektors	19
Ein RICH-Detektor am Beispiel des CERES-RICH	20
Querschnitt durch den HADES-RICH	21
Die Padstruktur der Kathodenebene des Photonendetektors	23
Schematische Übersicht der dreistufigen HADES-Triggersystems	28
Schematische Übersicht des Triggers für den Schauerdetektor	30
Schematische Übersicht der Funktionalität der Matching Unit	32
.Konzept des "Pipelining" der Ereignisdaten im Second-Level-Trigger	33
Übersicht der Umsetzung des Datenaufnahmesystems in eine Simulation	38
Abhängigkeit der Latenzzeit des Second-Level-Triggers von der Zahl der Elektronen-Kandidaten in den Einzeldetektoren	39
Die Belegung der RICH-Detektorebene bei einem typischen Dileptonen-Ereignis der Simulation Au+Au bei 1 AGeV	41
Hough-Transformation zur Ringerkennung bei gegebenem Radius	45
Struktur eines Xilinx-FPGA	46
Die Suchmaske des Hardware-Ringerkennungs-Algorithmus	48
Padgruppen der Varianten des Ringerkennungs-Algorithmus	49
Effizienzen und Fehlerraten der untersuchten Algorithmen	52
Blockschaltbild des RICH-Frontend-Moduls	53
Blockschaltbild des RICH-Readoutcontrollers	54
Funktionale Übersicht der PRC und der RRU	56

Funktionale Übersicht eines Eingangsports der PRC	58
Funktionale Übersicht einer Rekonstruktionseinheit	61
Schematische Darstellung des Vorgangs der Patternerstellung	62
Zuordnung zwischen Detektor-Padebene und Spaltenbereichen	62
Funktionale Übersicht der Ergebnisauslese und Schnittstelle zur Matching Unit.....	64
Zur Matching Unit übertragenes Datenformat (für ein Ereignis)	64
Timingdiagramm für die Bearbeitung eines Ereignisses in der RICH-IPU	66
Funktionale Übersicht der Ring Recognition Unit	68
Verteilung zeilenabhängiger Schwellenwerte	70
Die Pattern Reconstruction Card als VME-Karte.....	71
Die Ring Reconstruction Unit als VME-Karte	73
Detektoraufbau bei der Teststrahlzeit im Sommer 97	75
Effizienzen und Fehlerraten für die 97er-Testdaten	76
Verteilung der von der RICH-IPU gefundenen Ringmittelpunkte	78
Beispiele für Ringereignisse der Teststrahlzeit 2000	79
Häufigkeitsverteilung der Ereignisse als Funktion der RICH-Padmultiplizitäten.....	80
Integrale Effizienz und Fehlidentifizierungsrate als Funktion der Padschwellen	81
Effizienz und Anzahl fehlidentifizierter Ringe als Funktion der Spaltennummer	83
Verteilung der Qualitätsparameter Ring- und Vetosumme	83

Bibliographie

- [1] V. Koch: *Introduction to Chiral Symmetry*. nucl-th/9512029
- [2] Goldstone, J. www-lns.mit.edu/~eluc/communications/ask-physicist.html#1
- [3] Klimt, S. et al.: *Chiral phase transition in the SU(3) Nambu and Jona-Lasinio model*. Phys. Lett. B 249 (1990) 386
- [4] Laermann, E. Nucl. Phys. A 610 (1996) 1c
- [5] Wambach, J. und Rapp, R.: *Theoretical interpretations of low-mass dileptons*. Nucl. Phys. A 638 (1998) 171c
- [6] Waas, T. et al.: *Effective kaon masses in dense nuclear and neutron matter*. Phys. Lett. B 379 (1996) 34
- [7] Cassing, W.: *Meson production and meson properties at finite nuclear density*. Acta Phys. Pol. 29 (1998) 3175
- [8] Klingl, F. et al.: *Current correlation functions, QCD sum rules and vector mesons in baryonic matter*. Nucl. Phys. A 624 (1997) 527
- [9] Klingl, F. et al.: *Modification of the ϕ -meson spectrum in nuclear matter*. Phys. Lett. B 431 (1998) 254
- [10] Rapp, R. und Wambach, J.: *Chiral symmetry restoration and dileptons in relativistic heavy-ion collisions*. hep-ph/9909229
- [11] Cassing, W. et al.: *Probing the ρ spectral function in hot and dense matter by dileptons*. Phys. Rev. C 57 (1998) 916
- [12] Brown, G. E. et al.: *Medium dependence of the vector meson mass: dynamical and/or Brown/Rho scaling ?* Acta Phys. Polonica B29 (1998) 2309
- [13] Li, G.Q. et al.: *Enhancement of low-mass dileptons in heavy ion collisions*. Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 4007
- [14] Herrmann, M. et al.: *Properties of ρ -mesons in nuclear matter*. Nucl. Phys. A560, 411 (1993)
- [15] Asakawa et al.: *Rho meson in dense hadronic matter*. Phys. Rev. C46, R1159 (1992)
- [16] Hatsuda et al.: Phys. Rev. C42 (1992) 34

- [17] Bromley, I. (Edt.): *Treatise on heavy-ion science. Vol. 4.* New York 1985 (Plenum Press)
- [18] Braun-Munzinger, P.: *Dynamics of ultra-relativistic nuclear collisions with heavy beams.* Nucl. Phys. A 638 (1998) 3
- [19] Harris, J.W. et al.: Phys. Lett. B 1 53 (1985) 578
Cugnon, J. et al.: Nucl. Phys. A 379 (1982) 553
- [20] Braun-Munzinger, P.: *Thermal equilibration and expansion in nucleus-nucleus collisions at the AGS.* Phys. Lett. B 344 (1995) 43
- [21] Braun-Munzinger, P.: *Thermal and hadrochemical equilibration in nucleus-nucleus collisions at the SPS.* Phys. Lett. B 365 (1996) 1
- [22] Cassing, W. und Mosel, U.: Prog. Part. Nucl. Phys. 25 (1990) 235
- [23] Aichelin, J. et al. Phys. Rev. C 37 (1988) 2451
- [24] Nifenecker, H. und Bondorf, J.P.: Nucl. Phys. A 442 (1985) 478
- [25] Metag, V.: *Near-threshold particle production in heavy ion collisions.* Nucl. Phys. A553 (1993) 283c
- [26] Wienold, T.: *Fragmentproduktion und kollektives Verhalten in zentralen ^{197}Au - ^{197}Au Reaktionen bei $E/A = 100$ bis 800 MeV.* Doktorarbeit, Universität Heidelberg, 1993
- [27] Häfele, E.: *Untersuchung der Produktion geladener Pionen im System Au+Au bei 1 AGeV.* Doktorarbeit, Universität Heidelberg, 1995
- [28] Pelte, D. et al: *Charged pion production in Au on Au collisions at 1 AGeV.* Z. Phys. A 357 (1997) 215
- [29] Schwalb, O. et al.: *Mass dependence of π^0 production in heavy ion collisions at 1 A GeV.* Phys. Lett. B321 (1994) 20
Averbeck, R.: *to be published*
- [30] Mang, M.: Dissertation, Institut für Kernphysik, Univ. Frankfurt/Main (1997)
- [31] Martinez, G. et al.: *Photon production in heavy ion collisions close to the pion threshold.* Phys. Lett. B 461 (1999) 28
- [32] Cassing, W. et al.: *Productions of energetic particles in heavy ion collisions.* Phys. Rep. 188 (1990) 363
- [33] Barth, R. et al.: *Subthreshold production of kaons and antikaons in nucleus-nucleus collisions at equivalent beam energies.* Phys. Rev. Lett 78 (1997) 4007
Laue, F. et al.: Phys. Rev. Lett 82 (1999) 1640

- [34] Balestra, F. et al.: *K⁻ meson production in the proton-proton reaction at 3.67 GeV/c*. Phys. Lett. B 468 (1999) 7
- [35] Agakichiev, G. et al.: *Enhanced production of low-mass electron pairs in 200 GeV/U S-Au collisions at the CERN-SPS*. Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 1272
- [36] Agakichiev, G. et al.: *Low-mass e⁺e⁻ pair production in 158 A GeV Pb-Au collisions at the CERN SPS, its dependence on multiplicity and transverse momentum*. Phys. Lett. B 422 (1998) 405
- [37] Yegneswaran, A.: *The dilepton spectrometer*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A290 (1990) 61
- [38] Porter, R.J. et al.: *Dielectron cross section measurements in nucleus-nucleus-reactions at 1.0 AGeV*. Phys. Rev. Lett. 79 (1997) 1229
- [39] Cassing, W. und Bratkovskaya, E.L.: *Hadronic and electromagnetic probes of hot and dense nuclear matter*. Phys. Rep. 308 (1999) 65
- [40] Novotny, R.: *The BaF₂ photon spectrometer TAPS*. IEEE Trans. on Nucl. Sc. 38 (1991) 378
- [41] Bratkovskaya, E.L. and Ko, C.M.: *Low-mass dileptons and dropping rho meson mass*. Phys. Lett. B 445 (1999) 265
- [42] *Hadronic Physics with HADES*. Workshop, GSI March 2000. <http://www-hades.gsi.de/proceedings/hadrons/index.html>
- [43] Schön, W. et al.: *Simulation of recoilless production of ω-mesons*. Acta Phys. Polonica B27 No 11 (1996) 2959
- [44] HADES-Kollaboration: *HADES: A proposal for a high acceptance di-electron spectrometer*. GSI Darmstadt, 1994
- [45] Salabura, P. et al.: *HADES - a high acceptance di-electron spectrometer*. Nuclear Physics B44 (1995) 701
- [46] Garabatos, C. et al.: *The HADES dilepton spectrometer*. Nuclear Physics B 61B (1998) 607
- [47] Schicker, R. et al.: *Acceptance and Resolution Studies for the Di-Electron Spectrometer HADES at GSI*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A380 (1996) 586
- [48] Schön, H.: *HADES - Ein Dileptonenspektrometer hoher Akzeptanz für relativistische Schwerionenkollisionen*, Doktorarbeit, Institut für Kernphysik, Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt am Main, 1995
- [49] Cherenkov, P.A.: *The visible glow of pure liquids under the action of gamma-rays*. Dokl. Akad. Nauk. SSSR [Sov. Phys. Dokl.] 2:451 (1934)

- [50] Litt, J. et al.: *Cherenkov counter technique in high energy physics*. 1973
- [51] Ypsilantis, T. et al.: *Theory of ring imaging Cherenkov counters*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A343 (1994) 30
- [52] Seguinot, J. et al.: *A historical survey of ring imaging Cherenkov counters*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A343 (1994) 1
- [53] Adam, I. et al.: *The DIRC detector at BaBar*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A433 (1999) 201
- [54] Zeitelhack, K. et al.: *The HADES RICH Detector*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A433 (1999) 201
- [55] Gernhäuser, R. et al.: *Photon detector performance and radiator scintillation in the HADES RICH*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A371 (1996) 300
- [56] Garabatos, C. et al.: *Optimisation of low-mass drift chambers for HADES*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A412 (1998) 38
- [57] A.Balanda et al.: *Development of a fast pad readout system for the HADES shower detector*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A417 (1998) 360
- [58] Agodi, C. et al.: *The Time Of Flight Wall for the HADES Spectrometer*. IEEE Transactions on Nuclear Science
- [59] Lehnert, J. et al.: *The trigger system for the HADES detector*. Proceedings of the Xth IEEE Real Time Conference, Beaune 1997, p. 51
- [60] Traxler, M. et al.: *The HADES second level trigger system*. IEEE Transactions on Nuclear Science 1999
- [61] Petri, M.: *Schnelle Ladungsmustererkennung mit feldprogrammierbaren Gate-Arrays*. Diplomarbeit, II. Physikalisches Institut, Justus-Liebig-Universität Gießen, 1995
- [62] Petri, M.: *Doktorarbeit, II. Physikalisches Institut, Justus-Liebig-Universität Gießen*, 2000
- [63] Lins, E.: *Time of flight trigger electronics*. Status report (1997) www.physik.uni-giessen.de/hades/groups/tof/TOFtrigger.html
- [64] Traxler, M.: *The matching unit for the HADES trigger system*. Report (1999). www.physik.uni-giessen.de/hades/groups/matching/matching_unit.concept1.pdf
- [65] Brenschede, A.: *Simulationen für den HADES-RICH*. Interne Dokumentation (1994)
- [66] Kastenmüller, A. et al.: *Fast detector readout for the HADES-RICH*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A433 (1999) 438

- [67] Kastenmüller, A.: *Eine schnelle Signalauslese für einen ortsempfindlichen Photonendetektor*, Diplomarbeit, Physik-Department der Technischen Universität München, Institut E12, 1994
- [68] Böhmer, M.: *Das Auslesesystem für den Ringabbildenden Cherenkovdetektor im HADES Spektrometer*. Diplomarbeit, Physik-Department der Technischen Universität München, Institut E12, 1999
- [69] Heusinger, P. et al.: *Handbuch der PLDs und FPGAs*, Poing 1994 (Franzis[70])
- [70] Lehnert, J.: *Ring recognition in the HADES second level trigger*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A433 (1999) 268
- [71] Peterson, W.D.: *The VMEbus Handbook*. VITA VFEA International Trade Association, 1991
- [72] Kraft, H.: *Ein Prozessor zur schnellen Ringerkennung für den HADES-RICH*, Diplomarbeit, II. Physikalisches Institut, Justus-Liebig-Universität Gießen, 1996
- [73] Sonka, M. et al.: *Image Processing, Analysis and Machine Vision*, London 1993 (Chapman & Hall)
- [74] Xilinx: *The Programmable Logic Data Book 1994*
- [75] Bloch, D. et al.: *Noise simulation and rejection for the DELPHI Barrel Ring Imaging Cherenkov detector*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A371 (1996) 236
- [76] Agakichiev, A. et al.: *Cherenkov ring fitting techniques for the CERES RICH detectors*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A371 (1996) 243
- [77] Baur, R. et al.: *The CERES RICH detector system*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A343 (1994) 87
- [78] Agakichiev, A. et al.: *Performance of the CERES electron spectrometer in the CERN SPS lead beam*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A371 (1996) 16
- [79] Münch, M.: *Ein Datenaufnahmesystem mit Echtzeit-Bildverarbeitung für ringabbildende Cherenkovdetektoren*, Diplomarbeit, Physik-Department der Technischen Universität München, Institut E12, 1995
- [80] Brenschede, A.: *Pattern Recognition for the HADES RICH*. Czech. Journ. Phys. 45 (1995) 645
- [81] Przygoda, W. Vortrag auf dem VII. HADES-Kollaborationstreffen Krakau 1998
- [82] Schön, W.: private Mitteilung

Glossar

CPLD	<p>Complex Programmable Logic Device</p> <p>Programmierbare Bausteine. Die Logikeinheiten bestehen aus einer UND-Matrix, deren Ausgänge in eine ODER-Matrix eingehen. An deren Ausgang finden sich Registerstufen. Die einzelne Logikeinheiten sind über eine eine Schaltmatrix miteinander verbunden. Sowohl die Verknüpfungen der Logik-Matrizen als auch die Datenpfade der Schaltmatrix können durch Programmierung bestimmt werden. Die Durchlaufzeiten durch alle Baugruppen eines CPLD sind determiniert. Hierdurch kann das zeitliche Verhalten der implementierten Logik gut kontrolliert werden.</p>
CTU*	<p>Central Trigger Unit</p> <p>Zentrales Modul zur Verteilung der verschiedenen Stufen der HADES-Triggerentscheidungen. Die CTU erhält exklusiv die einzelne Triggerentscheidungen und verteilt sie ergänzt um Zusatzinformationen wie Triggertyp oder laufende Triggernummer über einen gemeinsamen Bus an die detektorspezifischen DTUs weiter.</p>
DPR	<p>Dual Ported RAM</p> <p>Ein SRAM, beidem Adress-, Daten- und Steuerleitungen zweifach vorhanden sind. Hierdurch ist der unabhängige Zugriff auf Speicherinhalte durch zwei externe Quellen ohne eine externe Arbitrierung (Umschalten der Leitungen, Benachrichtigung der Quellen über Zugriffskonflikte,...) möglich.</p>
DTU*	<p>Detector Trigger Unit</p> <p>Die DTUs erhalten von der CTU die Triggerentscheidungen und setzen sie in detektorspezifische Steuerkommandos um. Daneben dienen sie der Handhabung von Busy- und Fehlerbedingungen.</p>
FIFO	<p>"First In First Out"</p> <p>"First in - first out" beschreibt die Arbeitsweise dieses Speichermediums. Datenworten können sequentiell in das Speichermedium geschrieben und nur in genau dieser Reihenfolge auch wieder ausgelesen werden. Fifos eignen sich daher ideal zum Zwischenspeichern bei geordneten Datenflüssen.</p>
FPGA	<p>Field Programmable Gate Array</p> <p>Feldprogrammierbare Gate Array. Ein FPGA enthält eine große Anzahl relativ einfacher Logikblöcke. Diese bestehen typischerweise aus einer kombinatorischen Logik mit wenigen Eingängen (ca. 8-10) und nachgeschalteten Registern (typ. 1-2). Die Logikblöcke sind in einer Matrix angeordnet und mit Verdrahtungsressourcen verschiedener Hierarchie-</p>

ebenen (z.B. zwischen benachbarten Blöcken, über 3-4 Blöcke hinweg, lange Verbindungen über die komplette Länge der Matrix) miteinander verbunden. In FPGA können komplexe logische Schaltungen sehr flexibel implementiert werden, die breiten Variationsmöglichkeiten in der internen Platzierung und Verdrahtung führen aber zu einem zeitlichen Verhalten, daß vor einer konkreten Implementierung schwer vorherzusagen ist und schon bei minimalen Designänderungen großen Schwankungen unterliegen kann, welche durch die Vorgabe zeitlicher Randbedingungen an die Implementierungssoftware ("Fitter") in Grenzen beeinflusst werden können.

IPU* Image Processing Unit
Der Sammelbegriff für die Triggerprozessoren für TOF-, Schauer- und RICH-Detektor im HADES-Second-Level-Trigger. Der Begriff "Bildverarbeitung" ist historisch gewachsen und kaum zutreffend, "Mustererkennung" ist im Fall des RICH- und Schauerdetektors zutreffender, im Fall des TOFs sind im wesentlichen algebraische Korrekturen der Rohdaten durchzuführen.

Lookup-Memory

Ein RAM-Baustein in einer Verwendung nicht als Datenspeicher, sondern zur Transformation von Datenworten. Das Lookup-Memory wird einmal mit der Transformationstabelle beschreiben; in der Benutzung wird das zu transformierende Datenwort als Adresswort für einen Lesezyklus genutzt, das resultierende Datenwort enthält die gewünschte Information.

LVL1* Level1-Trigger
Abkürzende Bezeichnung für den HADES-First-Level-Trigger (Multiplizitätstrigger)

LVL2* Level2-Trigger
Abkürzende Bezeichnung für den HADES-Second-Level-Trigger (Dileptonentrigger)

LVL3* Level3-Trigger
Abkürzende Bezeichnung für den HADES-Third-Level-Trigger (Verifikation der Leptonenspuren)

LVL1-Pipe

Speicherstufe (Fifos oder SRAM) zur Zwischenspeicherung der Detektordaten nach positivem LVL1-Trigger bis zur Entscheidung des Second-Level-Triggers.

LVL2-Pipe

Speicherstufe (SRAM) zur Zwischenspeicherung der Detektordaten nach positivem LVL2-Trigger bis zur Entscheidung des Third-Level-Triggers.

MU*	<p>Matching Unit</p> <p>Die zweite Stufe des Second-Level-Triggers. Die Matching Unit erhält von den IPU's Positionsinformationen von Leptonenkandidaten in RICH-, Schauer- und TOF-Detektor. Sie korreliert diese Positionen des inneren RICH mit den beiden äußeren Detektoren unter Berücksichtigung der Ablenkung im Magnetfeld und fordert einen minimalen Öffnungswinkel zwischen zwei gültigen Leptonenkandidaten als Bedingung auf eine minimale invariante Masse.</p>
PFM*	<p>Programmable Frontend Module</p> <p>Karte zur Verarbeitung von jeweils 64 RICH-Kathodenpads. Die Funktionalität umfasst eine Sample- und Hold-Stufe, die Digitalisierung, Pedestalabzug und Nullunterdrückung sowie die LVL1-Pipe.</p>
PRC*	<p>Pattern Reconstruction Card</p> <p>Das erste Board des RICH-Triggerprozessors. Mittels der Koordinateninformationen der Detektorauslese wird das vollständige Treffermuster der zweidimensional segmentierten Detektorfläche (96x96 Pads) rekonstruiert und der eigentlichen Triggerlogik zur Verfügung gestellt. Darüberhinaus ist auf dieser Karte die Übertragung der Triggerresultate zur Matching Unit realisiert.</p>
RC*	<p>Readout Controller</p> <p>Bestandteil der RICH-Auslese. Zwei RCs pro Detektorsegment lesen jeweils 40 Frontend-Module aus. Der RC implementiert das Interface zur RICH-IPU, die LVL2-Pipe sowie die Steuer- und Überwachungslogik für die RICH-Auslese.</p>
RICH	<p>Ring Imaging Cherenkov Detector</p> <p>Ein "ringabbildender Cherenkov-Detektor" bietet die Möglichkeit, mit Hilfe optischer Elemente das unter einem bestimmten Winkel zur Trajektorie emittierte Cherenkov-Licht so abzubilden, dass aus der Lage des ringartigen Bildes Ortsinformationen gewonnen werden können bzw. über die Ringgröße eine Teilchenidentifizierung möglich wird.</p>
RRU*	<p>Ring Recognition Unit</p> <p>Das zweite Board des RICH-Triggerprozessors. Es erhält von der PRC reihenweise das Treffermuster, das in der benötigten Tiefe lokal zwischengespeichert und mittels einer in FPGAs implementierten Logik auf potentielle Cherenkov-Ringe untersucht wird. Die Ergebnisse dieses Ringerkennungsalgorithmus werden zwischengespeichert und zum Transfer an die Matching Unit bereitgestellt.</p>
TIP*	<p>TOF Image Processing and Readout Board</p> <p>Kombiniertes Auslese- und Triggermodul für den TOF-Detektor. Die TIP liest die TDC- und ADC-Motherboards aus und führt den DSP-basierten TOF-Triggeralgorithmus aus.</p>

SRAM

Static Random Access Memory

Ein les- und beschreibbares Speichermedium, bei dem durch Adressierung auf den Inhalt jeder einzelnen Speicherzelle zugegriffen werden kann (RAM). Der Zusatz "Static" besagt, daß die Speicherinhalte nach dem Schreiben erhalten bleiben, es ist nicht nötig, in regelmäßigen Abständen (und damit u.U. in Konkurrenz zu Daten-Zugriffen) sog. "Refresh-Zyklen" zum Erhalt der gespeicherten durchzuführen. Dies vereinfacht die Verwaltung eines solchen RAM-Bausteins beträchtlich

Bei den mit * gekennzeichneten handelt es sich um HADES-spezifische Akronyme

Danksagung

Danke an Prof. Dr. W. Kühn für die Möglichkeit, an einem überaus interessanten und lehrreichen Projekt mitarbeiten zu dürfen sowie für die ständige Diskussionsbereitschaft und die Unterstützung mit Tat und Rat.

Danke an Markus für alle Diskussionen über das Institut, die Physik und den Rest der Welt...

Danke an Michael, Erik, Rene und alle anderen an den Elektronikbasteleien im Laufe der Jahre Beteiligten für Hilfestellungen, Anregungen, Sonstiges.

Danke an PD Dr. Jim Ritman für die ständige Diskussions- und Erläuterungsbereitschaft, durch die er viel zur physikalischen „Erleuchtung“ der Arbeitsgruppenmitglieder beigetragen hat.

Danke an HansP für seinen langjährigen Erfahrungsschatz und für die „good vibrations“.

Danke an Jürgen, Werner, Anita und alle anderen hier ungenannten Mitarbeiter für die langjährige Unterstützung in all den kleinen und auch größeren im Institut angefallenen „Nebensächlichkeiten“.

Danke an den Rest der Institutsmitglieder für all die Faschingsjahre, die Promofeiern, Tagungsreisen, Institutsabende,... Ich denke, daß manches von dem Aufgezählten die Zeit über das zu erwartende Maß hinaus angenehm machte.

Danke an Holger Kraft, Arndt Brenschede und alle anderen, die in Gießen zu den Anfängen des Projekts beigetragen haben.

Mein Dank geht an die Münchner HADES-Gruppe für die langjährige Zusammenarbeit. Ohne sie und ihren RICH wäre der Triggerprozessor wie ein Fisch auf dem Trockenen gewesen. Danke auch noch einmal an Michael T. am anderen Ende des Datenpfades, ohne den wir nicht wüßten, welche Ergebnisse denn nun aus der IPU herauskommen.

Ein besonders großes Danke geht an Michael Böhmer für die allzeit sehr angenehme, offene und interessante Zusammenarbeit.

Danke nochmal an Arndt und an Heike für diejenigen Papers, die ihre frühe Simulationstätigkeit für das Gesamtprojekt dokumentieren und aus denen man ein vertieftes Verständnis über die Funktionsweise aller Komponenten beziehen konnte.

Ein besonderer Dank geht an meine Eltern.

Danke auch an alle Nichtphysiker in meinem Leben.

Till sist tack till alla som hjälpte att det fanns vissa högtider i de sista åren även utanför fysiken och tack till det vackraste landet på jorden!