

Abbildung 39: Rekonstruiertes Ereignis mit 126 Teilchenspuren im äußeren Spurkammer-system.

# HERA-B Experiment

**Beteiligte Institute:** NIKHEF Amsterdam, Univ. Texas Austin, Univ. Barcelona, IHEP Beijing, Tsinghua Univ. Beijing, Humboldt Univ. Berlin, Univ. und INFN Bologna, Univ. Cincinnati, LIP and Univ. Coimbra, Wayne State Univ. Detroit, Univ. Dortmund, JINR Dubna, Northwestern Univ. Evanston, DESY Hamburg, Univ. Hamburg, MPI Kernphys. Heidelberg, Univ. Heidelberg, Univ. of Houston, INR Kiev, Niels Bohr Inst. Copenhagen, Univ. Ljubljana, UC Los Angeles, LIP and Univ. Lissabon, Univ. Mannheim, ITEP Moscow, MEPHI Moscow, MPI Phys. München, Univ. Oslo, Univ. Rostock, Univ. Siegen, PNPI St. Petersburg, Univ. Utrecht, DESY Zeuthen, Univ. Zürich.

**Sprecher:** A. Schwarz, DESY (bis Oktober 2000), M. Medinnis, DESY (ab Oktober 2000)

**Ziel des Experiments HERA-B ist die Untersuchung von Aspekten der Physik von Bottom- und Charm-Quarks. Zu diesem Zweck hat die HERA-B Kollaboration ein Vorwärtsspektrometer aufgebaut, das die Teilchen, die in Wechselwirkungen des Halo des HERA-Protonenstrahls mit dem Drahttarget von HERA-B produziert werden, genau vermisst und identifiziert.**

Unter den vielen Wechselwirkungen sind nur sehr wenige, etwa eine unter einer Million, die zur Erzeugung von Bottom-Hadronen führen. Um diese in ausreichender Zahl zu erzeugen, müssen demnach sehr viele Wechselwirkungen in den Targetdrähten stattfinden; das Experiment ist dafür konzipiert, Wechselwirkungsraten von bis zu 40 Millionen pro Sekunde zu verarbeiten.

Die Anforderungen an das Spektrometer sind daher außerordentlich: alle Detektoren, speziell die Detektoren zur Spurrekonstruktion, müssen eine sehr hohe Strahlenbelastung aushalten und bei Teilchenflüssen von mehr als  $10^6$  Teilchen pro Sekunde und Quadratzentimeter eine Spurrekonstruktion ermöglichen.

Das Trigger- und Datennahmesystem muss eine extrem hohe Selektivität und Effizienz aufweisen, um aus der enormen Anzahl von Untergrundreaktionen die wenigen interessanten Reaktionen mit charakteristischen Zerfällen der B-Mesonen herauszufiltern.

An den Detektor und das Datennahmesystem werden hierbei Anforderungen gestellt, die denen zukünftiger Experimente bei LHC (Large Hadron Collider, CERN, ab etwa 2006) völlig äquivalent sind. HERA-B spielt hier eine wichtige Vorreiterrolle, und die hier gemachten Erfahrungen haben die Planung der Experimente am LHC bereits nachhaltig beeinflusst.

Im Jahr 2000 wurde das HERA-B Spektrometer fertig gestellt, im Frühjahr wurden die letzten Detektoren des inneren Spurrkammersystems sowie die letzten Komponenten der ersten Triggerstufe installiert. In der Zeit bis zum Beginn der HERA Betriebspause im September wurden alle Komponenten in Betrieb genommen und Daten mit unterschiedlichen Triggerbedingungen aufgezeichnet.

Diese Daten, deren Auswertung noch nicht abgeschlossen ist, dienen im Wesentlichen zur Kalibration des Detektors und zur Entwicklung von Auswerte-Algorithmen. Das Ziel, selektiv auf B-Mesonen zu triggern und diese in ausreichender Zahl zu beobachten, konnte noch nicht erreicht werden.

Die Betriebspause von HERA vom September 2000 bis zum Juli 2001 wird von der HERA-B Kollaboration dazu genutzt, das Spektrometer, basierend auf den im Jahr 2000 gemachten Erfahrungen, zu verbessern und während des Betriebs aufgetretene Schäden zu reparieren.

## Der Detektor HERA-B

Der Detektor HERA-B setzt sich aus vier verschiedenen mechanischen Grundeinheiten zusammen:

**Vertexplattform:** hier befindet sich der Vakuumtank für Vertexdetektor und Target.

**Magnetplattform:** zwischen den Polschuhen des Dipolmagneten sind die inneren Spurkammern (Granularität von 0.3 mm) und die äußeren Spurkammern (Granularität von 5 bzw. 10 mm) eingebaut.

**Mittelplattform:** hier sind das Hauptspurkammersystem sowie die Komponenten für die Teilchenidentifizierung „Ring Imaging Čerenkov“ Zähler (RICH), Übergangsstrahlungsdetektor (TRD) und elektromagnetisches Kalorimeter (ECAL) untergebracht.

**Myon-Plattform:** die Myonkammern hängen hinter bzw. zwischen Eisenabsorbieren. Auch hier werden in der Nähe des Strahlrohres Detektoren mit kleiner Granularität (Myon-Pixelkammern) eingesetzt.

## Das HERA-B Target

Die Aufgabe des HERA-B Targets ist es, bis zu  $4 \cdot 10^7$  unelastische Wechselwirkungen mit dem Halo des Protonenstrahls von HERA zu erzeugen. Das Target besteht aus acht dünnen Drahtbändern, die in zwei um 40 mm entlang der Strahlachse separierten Stationen um den HERA-Protonenstrahl angeordnet sind und zur Erzeugung der Wechselwirkungen in den Randbereich des Strahles (Halo) gefahren werden können. Die typischen Abmessungen der Bänder betragen  $500 \mu\text{m}$  in Strahl- und  $50 \mu\text{m}$  in Radialrichtung. Neben fünf Targetbändern aus Titan ist je ein Target aus Kohlenstoff, Aluminium und Wolfram installiert; dies erlaubt eine genaue Untersuchung der Abhängigkeit des Wirkungsquerschnitts vom Material des Targets. Der Aufbau wird im Vakuum des HERA-B Vertex tanks betrieben, wenige Zentimeter vor der ersten Lage von Siliziumstreifen zählern des Vertexdetektors.

Um die Wechselwirkungsrate konstant zu halten, kann jeder Targetdraht von einer Präzisionsmechanik in radialer Richtung bewegt werden. Typische Schrittweiten liegen im Bereich weniger zehntel Mikrometer, wobei etwa 10 Regelzyklen pro Sekunde ausgeführt werden.

Seit 1998 wird das Target kontinuierlich betrieben. Neben der Sicherstellung eines zuverlässigen Betriebs liegen die Hauptaufgaben in der weiteren Verbesserung der Ratenqualität, die durch den mechanischen Aufbau, die Targetsteuerung, die Strahlqualität und die Betriebsparameter des Speicherrings beeinflusst wird. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Optimierung des Targetbetriebes hinsichtlich eines effizienten Betriebs aller vier HERA-Experimente.

Abbildung 40 zeigt die mit dem Target erreichte Luminosität in den Jahren 1999 und 2000. Allein im Jahr 2000 betrug sie etwa  $13\,000 \text{ MHz}\cdot\text{h}$ , entsprechend  $4.7 \cdot 10^{13}$  unelastischen Wechselwirkungen. Das Target war 94% der HERA-Luminositätszeit in Betrieb; dabei ist der Effizienzverlust von 6% dominiert durch die koordinierte Inbetriebnahme der vier HERA-Experimente zu Beginn jedes Luminositätsbetriebs. Effizienzverluste durch technische Probleme des Targets liegen in der Größenordnung von 1%. Damit hat sich das Target als äußerst stabiles und zuverlässiges System erwiesen.

Obwohl das Target für Wechselwirkungen von 40 MHz ausgelegt wurde und den gleichzeitigen Betrieb aller acht Drähte erlaubt, wurde es den überwiegenden Teil des Jahres 2000 mit nur einem Draht bei moderaten Raten von 4–5 MHz betrieben. Die Gründe hierfür liegen in

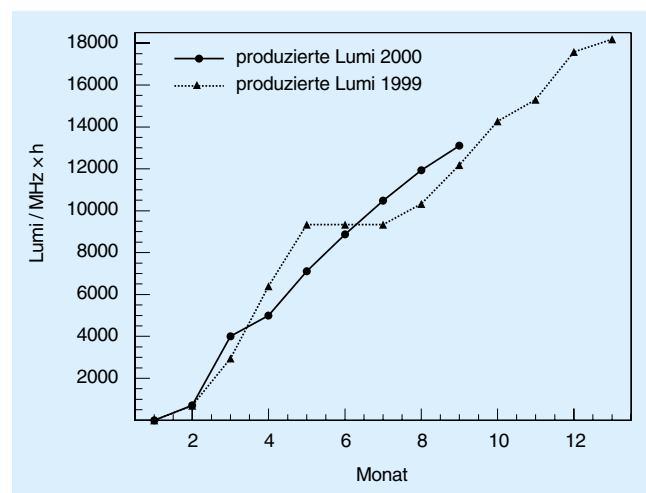


Abbildung 40: Die mit dem HERA-B Target erreichte Luminosität in den Jahren 1999 und 2000. In der Runperiode 2000 wurden etwa  $4.7 \cdot 10^{13}$  unelastische Wechselwirkungen erzeugt.

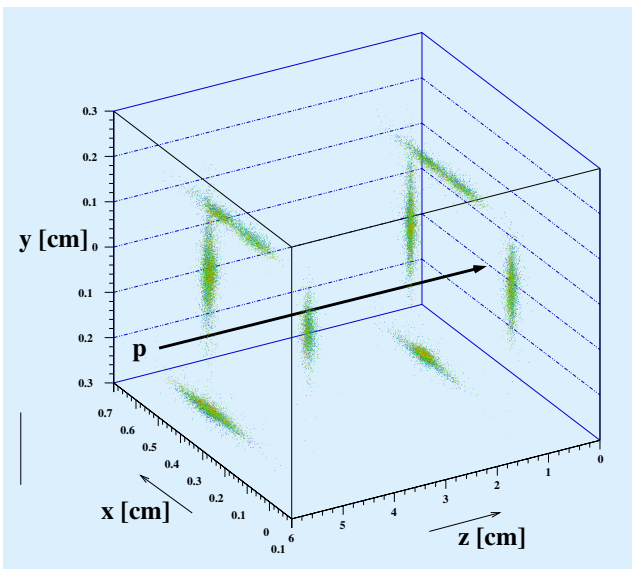


Abbildung 41: Mit Hilfe des Vertexdetektors rekonstruierte Vertices auf den Target-Drähten. Alle acht Targets wurden gleichzeitig betrieben. Der Protonenstrahl verläuft von links nach rechts.

der Inbetriebnahme des HERA-B Detektors. Dennoch sind Studien bei hohen Wechselwirkungsrate durchgeführt worden, welche die Eignung des Targets für den Hochratenbetrieb dokumentieren.

Mehrdrahtbetrieb fand in 27% der Betriebszeit des Targets statt, die Hälfte davon entfällt auf Zweidraht-Konfigurationen. Auch der Betrieb aller acht Drähte wurde mit Erfolg getestet. Abbildung 41 zeigt die mit Hilfe des HERA-B Vertexdetektors rekonstruierten Vertices auf den Target-Drähten. Um die Wechselwirkungsrate möglichst gleichmäßig auf die einzelnen Drähte zu verteilen, wird für jedes Target die zur Rate proportionale Zahl der  $\delta$ -Elektronen, welche im Drahtmaterial produziert werden, gemessen. Im Jahr 2000 konnte die Sensitivität dieses Messaufbaus um eine Größenordnung gesteigert werden; dies bedeutet eine weitere Verbesserung der Ratengleichverteilung gerade auch bei moderaten Wechselwirkungsrate.

Um einen effizienten Detektorbetrieb zu ermöglichen, ist eine möglichst konstante Wechselwirkungsrate erwünscht. Hieraus ergeben sich hohe Anforderungen nicht nur an die Targetsteuerung, sondern auch an die Positioniergenauigkeit der Targetmechanik. Hysterese-

effekte im Fahrverhalten sowie Spindelspiel im Antrieb der Mechanik, hervorgerufen durch Schwachstellen im mechanischen Aufbau sowie Alterung des Materials, konnten durch ein verbessertes Design der Targetmechanik drastisch reduziert werden. Damit ist das Fahren der Targets auf dem gesamten Fahrweg mit einer Wiederholgenauigkeit von  $1 \mu\text{m}$  möglich.

Als wesentlicher Beitrag zur Rateninstabilität wurden äußere Umwelteinflüsse wie etwa mechanische Schwingungen aus der Umgebung von DESY identifiziert. Sie verursachen Strahlfluktuationen des Protonenstrahls, welche direkten Einfluss auf Fluktuation der Rate haben. Abbildung 42 zeigt als Beispiel Kurzzeitfluktuationen der Wechselwirkungsrate für eine ausgewählte Woche. Während die Fluktuationen in der Nacht und am Wochenende mit etwa 6% sehr gering ausfallen, steigen sie während der üblichen Arbeitszeiten auf ungefähr das Doppelte an.

Das HERA-B Target ist für die Datennahmeperiode 2001 voll einsatzbereit. Wesentliche Anstrengungen liegen in einer weiteren Verbesserung der Ratenqualität, um eine möglichst hohe Effizienz der HERA-B Datennahme zu erreichen. Dies bedarf weiterhin der Unterstützung und engen Zusammenarbeit mit der HERA-Maschinengruppe.

## Das Vertex-Detektor-System

Das Vertex-Detektor-System (VDS) des HERA-B Experimentes besteht im Endausbau aus 64 doppelseitigen Siliziumstreifenzählern, die in acht „Superlagen“ mit je vier Quadranten den Protonenstrahl umgeben. Insgesamt besteht das System aus fast 150 000 Kanälen. Sieben der acht Superlagen sind zusammen mit dem Target in einem 2.6 m langen UHV-Tank montiert, der Bestandteil des HERA-Protonenringes ist. Die Quadranten einer Superlage bestehen aus jeweils zwei Detektoren inklusive Elektronik und Kühlung, die mittels Manipulatoren bis auf einen radialen Abstand von 1 cm an die Strahlachse herangefahren werden können. Zudem ermöglichen die Manipulatoren eine laterale Bewegung der Detektoren, um die enorme Strahlenbelastung – 30 MHz minimal ionisierende Teilchen pro  $\text{cm}^2$  bei 10 mm Abstand – gleichmäßiger über die Detektorfläche zu verteilen. Die Siliziumzähler werden

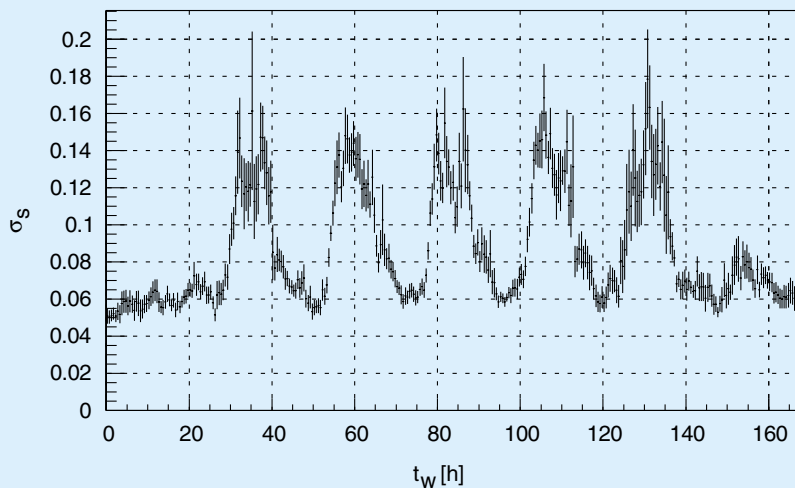


Abbildung 42: Wechselwirkungsrate in Abhängigkeit von der Zeit, dargestellt für einen Wochenverlauf von Sonntag 0.00 Uhr bis Samstag 24.00 Uhr. Zu üblichen Arbeitszeiten sind die Fluktuationen um einen Faktor zwei erhöht.

in einem sekundären Vakuum von etwa  $10^{-6}$  mbar betrieben, das von dem Tankvakuum, typisch  $10^{-8}$  mbar, durch etwa 150 bis 200  $\mu\text{m}$  dünne Aluminiumkappen getrennt ist, wobei diese Kappen zugleich die Detektoren vor den Hochfrequenzfeldern des Protonenstrahls schützen.

Das VDS lief wie in den vergangenen Jahren zusammen mit all seinen Hilfssystemen wie Detektorkühlung, gekoppelten Vakuumsystemen usw., störungsfrei. Die Infrastruktur inklusive der zum schnellen und sicheren Austausch von Modulen nötigen Aufbauten hat sich ausgezeichnet bewährt.

Im März 2000 wurde das VDS mit der Montage der achten Superlage hinter dem Austrittsfenster des Vakuumtanks vervollständigt. Lediglich in den ersten drei Superlagen wurden noch pro Superlage ein doppelseitiger und ein einseitiger Siliziumdetektor (statt zwei doppelseitiger Detektoren) eingesetzt.

Abbildung 43 zeigt die sechs Module eines Quadranten der Superlagen eins bis drei, montiert auf ihrem Detektortopf, vor der Montage der Aluminiumkappen. Die Detektoren sind auf 0.7 mm dicke Gabeln aus Kohlefasern mit extrem hohem Wärmeleitvermögen ( $500 \text{ W/K/m}$ ) montiert, die ihrerseits auf der mittleren Trägerplatte einer Aluminiumstruktur befestigt sind. Die zwei äußeren Platten werden für die Montage



Abbildung 43: Blick auf den äußeren Teil eines Detektortopfes für einen Quadranten der ersten drei Superlagen. Montiert sind sechs Siliziumdetektoren mit ihren Trägerstrukturen und ihrer Ausleselektronik.

der Ausleseelektronik verwendet, die so getrennt vom Detektor gekühlt werden kann. Die Signale werden über sechs flexible Mikroadaptoren zu den 84 Helix-Auslesechips geleitet. Die elektrische Verbindung zur Außenwelt erfolgt über Kaptonkabel, die in der Abbildung in den Vakuumtopf hineinführen.

Das VDS war bereits in der Messperiode 1999 endgültig in Betrieb genommen worden. Die Alignierung des VDS wurde weiter verfeinert. Die Mittelwerte der Verteilungen der Residuen liegen bei unter  $2\ \mu\text{m}$ , die Standardabweichungen liegen für selektierte Spuren hoher Qualität typischerweise bei  $15\ \mu\text{m}$ , gemittelt über alle Impulse.

Die longitudinale Vertexauflösung ist die auf die Qualität der Alignierung sensitivste Messgröße. Sie wird über die Zerfallslängenverteilung direkter  $J/\psi$ -Mesonen indirekt beobachtet. Durch Vergleiche zwischen Monte Carlo-Simulationen und Daten hat sich gezeigt, dass die Alignierung mindestens einmal pro Protonenfüllung durchgeführt werden muss. Für die nächsten Messperioden wird an einer Automatisierung der Alignierungsprozedur gearbeitet.

Die im Jahr 2000 akkumulierte Strahlungsdosis beträgt nur etwa 10% eines nominalen HERA-B Jahres. Demgemäß haben sich die Verhältnisse von Signalhöhe zu Rauschen für die zur Zeit eingebauten Module nicht signifikant geändert. Die S/R-Verteilungen haben für die n-Seiten wahrscheinlichste Werte von über 20, für die p-Seiten liegen sie geometriebedingt zwischen 15 und 20. Die Nachweiswahrscheinlichkeiten der Detektorebenen wurden mit Hilfe von Spuren, die ohne die jeweils untersuchte Detektorebene rekonstruiert worden waren, bestimmt. Typischerweise wurden Effizienzen von etwa 99% erreicht. Ineffizienzen sind im allgemeinen auf Fehlfunktionen einzelner Helixchips zurückzuführen.

Die Programme zur Bestimmung von Primär- und Sekundärvertices wurden wesentlich verbessert. Für Primärvertices wurde eine transversale Auflösung von  $70\ \mu\text{m}$  und eine longitudinale Auflösung von  $500\ \mu\text{m}$  erreicht. Die Abhängigkeit der Auflösungen von den Systemparametern wurden mit Monte Carlo-Ereignissen untersucht, und die Auflösungen wurden anhand von Daten bestätigt. Die Effizienz der Rekonstruktion von Primärvertices beträgt unabhängig von der Wechselwirkungsrate etwa  $(94\pm 1)\%$ . Bei hohen Wechselwir-

Spuren im Vertex	Massenhypothese	$\sigma_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\sigma_{x,y}$ [ $\mu\text{m}$ ]
4	nein	$280 \pm 10$	$21 \pm 1$
3	nein	$300 \pm 10$	$24 \pm 1$
2	nein	$375 \pm 10$	$25 \pm 1$
4	ja	$280 \pm 10$	$21 \pm 1$
2	ja	$325 \pm 10$	$26 \pm 1$

Tabelle 1: *Räumliche Auflösung für sekundäre Vertices in Abhängigkeit von der Anzahl der Spuren im Vertex, mit und ohne Benutzung einer Massenhypothese als zusätzliche Bedingung in der Vertexrekonstruktion.*

kungsraten werden aber Vertices verschmolzen, und so genannte Klonvertices treten verstärkt auf. Mit nur im Vertexdetektor rekonstruierten Spuren und Vertices konnte eine Untersuchung zur Abhängigkeit der geladenen Multiplizität von der Kernmassenzahl der Targetmaterialien durchgeführt werden. Die Ergebnisse bestätigen die Erwartungen.

Die sekundäre Vertexauflösung wurde mit Monte Carlo-Ereignissen studiert. Die Ergebnisse sind von der Multiplizität der Sekundärvertices abhängig. Für sekundäre Vertices mit 2 Spuren werden unter Benutzung einer Massenhypothese und einer angenommenen Impulsauflösung von 1% eine transversale Auflösung von etwa  $25\ \mu\text{m}$  und eine longitudinale Auflösung von etwa  $325\ \mu\text{m}$  erreicht. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die für verschiedene Konstellationen erreichten Auflösungen.

Eine Überprüfung der Breite der Zerfallslängenverteilung direkter  $J/\psi$ -Mesonen ist nur indirekt möglich, da beim Zerfall des  $J/\psi$ -Mesons innerhalb des Drahtes die Teilchen bereits im Material gestreut werden. Ein Vergleich zwischen Monte Carlo-Rechnungen und Daten bestätigt die Erwartungen der Rechnungen.

In den Daten sind einige gute Kandidaten für Zerfälle von b-Hadronen nachgewiesen worden. Die Messung des b-Hadron-Wirkungsquerschnitts ist zur Zeit durch die geringe Statistik, nicht aber durch die Auflösung des VDS begrenzt. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Vertex-Detektor-System im Jahr 2000 seine Designparameter weitgehend erreicht hat.

## Inneres Spurkammersystem

Das innere Spurkammersystem besteht aus Mikrostreifen-Gasdetektoren (MSGC) mit integrierter Vorverstärkerfolie (GEM). Im Jahr 2000 wurde die geplante Installation von 16 Stationen abgeschlossen, so dass 136 GEM-MSGCs mit mehr als 100 000 analogen Auslesekanälen kontinuierlich betrieben werden konnten.

Die Installation des inneren Spurkammersystems begann im Juni 1999. Bedingt durch unerwartete Schwierigkeiten bei der externen Produktion der MSGC-Wafer und der Ausleseelektronik wurde die Installation im Magnet und in der Region zwischen Magnet und RICH erst im Mai 2000 abgeschlossen. Gleichzeitig wurde die Installation des gesamten Ausleesesystems für diese Stationen durchgeführt.

Ende 1999 zeigte sich an den bereits in HERA-B eingebauten Stationen, dass die Front-End-Elektronik zu oszillieren beginnt, sobald sie bei niedrigen Trigger-Schwellen betrieben wird, wie sie notwendig sind, um mit sinnvoller Effizienz Trigger-Signale ableiten zu können. Aus diesem Grund wurde auf den Einbau von vier weiteren Stationen zwischen RICH und ECAL verzichtet, da diese Stationen fast ausschließlich als Trigger-Stationen für den First-Level-Trigger benötigt werden.

Alle eingebauten Stationen wurden in der Datennahmeperiode 2000 kontinuierlich betrieben. Die schwierige Steuerung so vieler GEM-MSGCs (HV, LV, Slow Control) erforderte meist 24 Stunden pro Tag eine eigene Schichtbesatzung für das innere Spurkammersystem. Die wesentlichen Betriebsprobleme, die in dieser Periode auftraten, waren

- Ausbildung von Kurzschlüssen zwischen Anoden und Kathoden auf dem MSGC-Wafer,
- Gasentladungen zwischen der GEM-Folie und Anoden bzw. Kathoden,
- Gasentladungen innerhalb der GEM-Folie,
- Ausfälle von Niederspannungs-Netzgeräten.

Das Ausbilden von Kurzschlüssen zwischen Anoden und Kathoden konnte durch besonders langsames Konditionieren der Kammern bei Targetbetrieb stark verringert werden.

Gasentladungen zwischen GEM-Folien und Anoden bzw. Kathoden sind besonders gefährlich, da sie zu großflächigen Zerstörungen der MSGC-Wafer führen können. Nachdem die Driftfeldstärken deutlich verringert wurden, sind derartige Gasentladungen nicht mehr aufgetreten. Dies führte aber zu einer Reduktion der Gasverstärkung im GEM sowie auf dem MSGC-Wafer. Um dies zu kompensieren, musste die Spannungsdifferenz und damit die Gasverstärkung sowohl im GEM als auch zwischen Anoden und Kathoden erhöht werden, wodurch wieder ein höheres Risiko für Kurzschlüsse im GEM und zwischen Anoden und Kathoden bedingt wird.

Gasentladungen innerhalb der GEM-Folie lassen sich nicht gänzlich vermeiden. Dank einer aufwändigen Steuerung der GEM-Hochspannungen und sehr schneller Hardware-Sicherungen gab es kaum Probleme. Während der ganzen Run-Periode 2000 gab es nur drei Ausfälle von Kammern aufgrund von GEM-Kurzschlüssen, ausgelöst durch Gasentladungen innerhalb der GEM-Folie, wovon an Wartungstagen zwei GEMs durch Einspeisen starker Stromstöße gerettet werden konnten.

Die zugekauften Netzgeräte für die Niederspannungsversorgung der einzelnen Stationen erwiesen sich als extrem störanfällig. Dabei handelt es sich um eine spezielle Entwicklung für die inneren Spurkammern von HERA-B, da es bisher keine passenden Spannungsversorgungsmodule mit CAN-Bus Anbindung gab, die auf veränderliche Last reagieren können. In zwei Fällen hat der Ausfall von Modulen sogar zur Zerstörung von Ausleseelektronik geführt und erforderte die Reparatur der betroffenen Stationen außerhalb des Experiments. In Zusammenarbeit mit der Herstellerfirma der Netzgeräte konnten diverse technische Probleme identifiziert und an einigen Modulen behoben werden. Bis zu Beginn der nächsten Run-Periode werden alle Netzgeräte umgerüstet, so dass eine erhebliche Verbesserung der Betriebsstabilität gewährleistet sein sollte.

Als besonders erfreulich und stabil erwies sich das Gassystem. Trotz der enormen Anforderung, bis zu 16 Kreisläufe auf maximal 50  $\mu$ bar Differenzdruck gegenüber dem Umgebungsdruck zu regeln, traten keine Probleme auf.

Die Bestimmung der Effizienzen aller in der Datennahmeperiode 2000 betriebenen GEM-MSGCs mit Hilfe

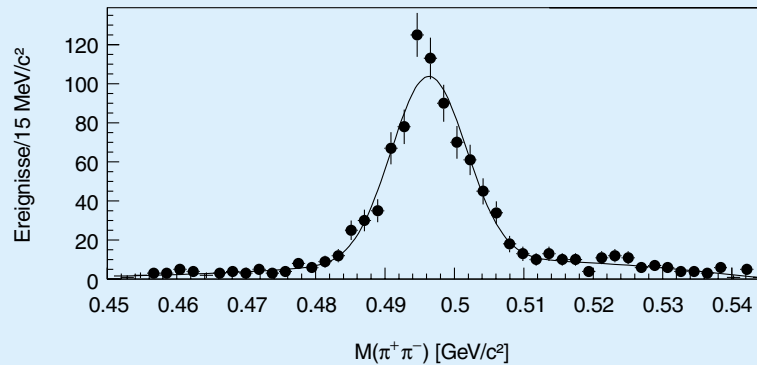


Abbildung 44: *Invariante Masse von  $\pi^+\pi^-$ -Paaren mit deutlich sichtbarem  $K_S^0$ -Signal. Mindestens eines der Pionen wurde ausschließlich mit Signalen aus dem inneren Spurkammersystem rekonstruiert.*

der genommenen Daten ist noch nicht abgeschlossen und wird weitergeführt. Erste Effizienz-Messungen zeigten starke Variationen von Kammer zu Kammer und lagen zwischen 65% und 85%. Nachdem in einem Teilsystem des inneren Spurkammersystems die Gesamtgasverstärkung generell erhöht sowie die unterschiedlichen Gasverstärkungen in den GEMs durch individuelle Anpassung der GEM-Spannungen kompensiert worden waren, reduzierten sich die Effizienz-Variationen für diese Kammern auf etwa 5%. Die zugehörigen Einzelkammer-Effizienzen betragen 91% bis 97%.

Mit vier Stationen in der Region zwischen Magnet und RICH konnte schon bis Mai 2000 gezeigt werden, dass die Auslese der Trigger-Kette störungsfrei funktioniert und in den First-Level-Trigger integriert werden kann. Auf eine ständige Einbindung in den First-Level-Trigger wurde aufgrund der zu niedrigen Trigger-Effizienzen verzichtet.

Die intensive Weiterentwicklung der Front-End-Elektronik, der daran anschließenden Trigger-Elektronik (Trigger-Treiber-Boards) und des Erdungsschemas zeigte im April 2000 im Labor, dass ein Betrieb mit hinreichend niedrigen Trigger-Schwellen möglich ist. Um die Verbesserungen unter den tatsächlichen HERA-B Bedingungen zu testen, wurde eine weitere Station gebaut und Anfang Juli 2000 zwischen RICH und ECAL installiert. Diese Station zeigte im Experiment dasselbe Verhalten wie im Labor; die damit gemessenen Trigger-Effizienzen sind größer als 95%.

Abbildung 44 demonstriert, dass Spuren allein im inneren Spurkammersystem, ohne Berücksichtigung anderer Detektorkomponenten, rekonstruiert werden können. Sie zeigt die invariante Masse zweier Pionen mit deutlichem Signal für den Zerfall  $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ . Es wurde die Bedingung gestellt, dass mindestens eines der Pionen ausschließlich mit Signalen aus dem inneren Spurkammersystem rekonstruiert worden war.

Mit Beginn der Luminositätserhöhung von HERA im September 2000 werden alle bisher eingebauten innere Spurkammer-Stationen überholt und verbessert. Dies beinhaltet

- Ersetzen von defekten Kammern,
- neues und verbessertes Erdungsschema für alle Kammern,
- neue und bessere HV-Verbindungen für alle Kammern,
- Beheben der im Betrieb entstandenen Anoden-Kathoden Kurzschlüsse,
- Bau der noch fehlenden drei Stationen für den Bereich zwischen RICH und ECAL,
- neue HELIX-128-3.2 Auslesechips für alle Trigger-Kammern (96 von 184),
- neue Trigger-Treiber-Boards (48 Stück) für alle Trigger-Stationen,
- Umrüsten aller Niederspannungs-Netzgeräte.



## Äußeres Spurkammersystem

Das äußere Spurkammersystem von HERA-B dient dem Nachweis geladener Teilchen. Der Akzeptanzbereich der Kammern erstreckt sich von einem Abstand von 20 cm zum Protonenstrahl bis hin zur äußeren Grenze des Experiments. Das Kammersystem umfasst insgesamt 13 Messstationen, so genannte Superlagen, die zwischen Vertextank und Kalorimeter an verschiedenen Positionen senkrecht zum Strahl angeordnet sind. Jede Superlage besteht aus zwei mechanisch unabhängigen Hälften, die von beiden Seiten Protonen- und Elektronenstrahlrohr einschließen. Jede Hälfte besteht aus einer gasdichten Box, in der sich mehrere Driftkammerlagen befinden. Zusammengesetzt sind diese Lagen aus etwa 30 cm breiten und 1 bis 4.5 m langen Honigwabenkammer-Modulen. Ein massiver äußerer Rahmen gibt der Gasbox stabilen Halt.

Die elektrische Auslese der Kammern besteht aus 7200 Vorverstärkern mit integriertem Diskriminator, die sich direkt an den Gasboxen befinden und die Kammerpulse aufnehmen. Eine Zeitmessung der digitalisierten Pulse erfolgt durch 955 TDC-Karten („Time-to-Digital Converter“), die am Kammerrahmen montiert sind. Die Daten werden bei einer positiven Entscheidung der ersten Triggerstufe mit 15 MByte/s zum Zwischenspeicher der zweiten Triggerstufe übertragen. Gleichzeitig stellen die TDC-Karten für jedes Ereignis die Trefferinformation für die erste Triggerstufe zur Verfügung. Hierzu werden die digitalen Ausgangssignale mittels so genannter Triggerlink-Karten in optische Signale umgewandelt.

Der mechanische und elektrische Aufbau des Kammer-systems wurde Anfang Januar 2000 mit der Installation der letzten Magnet-Kammer abgeschlossen.

Das gesamte äußere Spurkammersystem wurde bereits im Januar mit Gas gespült. Vollständig fertig gestellt wurde das Gassystem allerdings erst im Verlauf des Frühjahrs. Als Zählgas wird eine Mischung von  $\text{Ar}/\text{CF}_4/\text{CO}_2$  (65:30:5) verwendet. Das Gas wird vom Gassystem automatisch angemischt und zirkuliert in einem geschlossenen Kreislauf bei einem leichten Überdruck von etwa 0.5 mbar. Die im Jahr 2000 beobachteten Mischungsverhältnisse und Druckwerte entsprachen den Designwerten. Nach Installation aller Umwälzpumpen konnten auch alle Kammern wie vorgese-

hen mit einem Gasfluss von etwa einem Volumen pro Stunde gespült werden, was einer Umwälzung von insgesamt  $18 \text{ m}^3$  pro Stunde entspricht. Die Frischgaszufuhr wurde auf Werte zwischen 0.5% und 2% eingeregelt, um den Verbrauch an teurem  $\text{CF}_4$  zu minimieren. Auch das Reinigungssystem zum Entfernen von Sauerstoff, Wasser und Polymerverbindungen konnte erfolgreich in Betrieb genommen werden. Während der gesamten Datennahme im Jahr 2000 hat das Gassystem die Kammern zuverlässig mit Gas versorgt.

Die automatische Hochspannungssteuerung der Kammern war bis auf eine anfängliche Trainingsperiode während der gesamten Datennahme in die zentrale HERA-B Detektorkontrolle integriert. Die Hochspannung betrug je nach Modultyp 1700 V bzw. 1850 V, was einer Gasverstärkung von  $3 \times 10^4$  entspricht. Anzeichen für Kathoden- oder Anodenalterung wurden bisher nicht festgestellt. Im Verlauf des Kammerbetriebes traten allerdings Probleme mit der Hochspannungsfestigkeit der Driftkammermodule auf. Bis August zeigten etwa 0.5% der Zellen endliche elektrische Widerstände bzw. Kurzschlüsse. Aufgrund der Auslegung der Hochspannungsversorgung führte dies zu einem Ausfall von etwa 7% der Driftzellen. Bewirkt wurden die Ausfälle durch produktionsbedingte Verunreinigungen der Koppelkondensatoren und nicht, wie zunächst angenommen, durch eine elektrostatische Instabilität der Kammermodule. Betroffen sind zwei der siebzehn Kondensatoren jeder Hochspannungskarte. Es ist geplant, alle verschmutzten Kondensatoren, insgesamt 14 000 Stück, bis Mai 2001 auszutauschen.

Sowohl die elektrische Auslese der Kammern als auch die Steuerung und Überwachung der Kammerelektronik arbeitete im Jahr 2000 von Anfang an zuverlässig. Die Inbetriebnahme der optischen Linkverbindungen zwischen TDC und Triggerlogik hat sich dagegen bis in den Frühsommer 2000 verzögert. Die Signale der optischen Sender zeigten zeitliche Änderungen in Form und Pulshöhe, was zu Übertragungsfehlern führte. Betroffen waren zwischen 5 und 10% aller optischen Links. Um in Zukunft alle Links zuverlässig betreiben zu können, werden bis Mai 2001 alle Sender mit einer zusätzlichen Steuerung ausgerüstet.

Gleichzeitig mit der Inbetriebnahme der Detektorhardware wurden Softwarepakete zur automatischen Kontrolle der Datenqualität entwickelt. Die Kalibrationskonstanten aller 115 000 Kanäle wurden „online“ be-

rechnet. Gleichzeitig wurde das Verhalten jedes einzelnen Kanals getestet und seine Verwendbarkeit für die Spurrekonstruktion untersucht.

Eine wichtige Größe, die die Funktion des Detektors beschreibt, ist die Zelleffizienz. Ihre Messung ergab je nach Kammer und Betriebsbedingungen Werte zwischen 85% und 95%. Um für alle Kammern eine Effizienz von mindestens 95% zu erreichen, ist eine Optimierung der Gasverstärkung und auch der Diskriminatorschwellen notwendig. Letzteres soll in Zukunft durch eine weitere Unterdrückung des Detektorrauschens erzielt werden. Insbesondere für die im Trigger verwendeten Superlagen bewirkten die Kabelverbindungen zwischen TDC-Karten und Triggerlink-Karten zusätzliches Rauschen. Die Ursache ist mittlerweile verstanden und wird durch eine Modifikation der TDC-Karten bis zum Mai 2001 behoben sein.

Um eine Rekonstruktion der Teilchenspuren zu ermöglichen, müssen die Positionen der Kammern exakt bekannt sein. Im Fall der äußeren Spurkammern sind 26 Kammerhälften mit insgesamt 1000 mechanisch unabhängigen Modulen auszurichten. Dieses „Alignieren“

wurde für mehrere Zeitperioden erfolgreich durchgeführt. Nach dem Ausrichten der Module beträgt die über alle Zellen gemittelte Residuenauflösung etwa 500  $\mu\text{m}$ . Der Vergleich mit der Einzelzellauflösung von zur Zeit 350  $\mu\text{m}$  legt nahe, dass eine weitere Verbesserung der Modulpositionierung zu erzielen ist.

Auch im Bereich der Rekonstruktionssoftware wurden im Jahr 2000 große Fortschritte erzielt: Durch Anpassung der Spuralgorithmen an den realen Detektor wurde die Effizienz für die Spurfindung auf Werte zwischen 80% und 90% erhöht. Gleichzeitig wurden die Spuralgorithmen auf die im Magneten befindlichen Kammern ausgedehnt. Abbildung 39 zeigt ein Ereignis, bei dem 126 Teilchenspuren rekonstruiert wurden.

Das Jahr 2000 war für den Betrieb des äußeren Spurkammersystems ein erfolgreiches Jahr. Der Detektor wurde komplettiert und war während der gesamten Datennahme verfügbar. Trotz der angesprochenen Hochspannungsprobleme lieferte der Detektor Daten guter Qualität. Rekonstruktion und Detektorverständnis sind in diesem Jahr erheblich vorangekommen.

## Čerenkov-Detektor

Der Čerenkov-Detektor wurde Anfang 1998 in Betrieb genommen und läuft seitdem stabil und gemäß den Erwartungen.

Um die Effizienz der Teilchenidentifikation zu bestimmen, wurde eine Analyse von Ereignissen mit bekannten Teilchen im Endzustand, zum Beispiel mit den Zerfallsprodukten von  $K_S^0$ - und  $\Lambda$ -Zerfällen durchgeführt, bei denen die Teilchenart allein durch den Zerfallsvertex und die invariante Masse der zerfallenden Teilchen bestimmt werden kann (Abb. 45). Um das Verhalten bei hohen Energien zu bestimmen, wurde der Zerfall  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  untersucht. Abbildung 46 zeigt die abgeleiteten Identifikationseffizienzen und die Wahrscheinlichkeit für Falschidentifikationen.

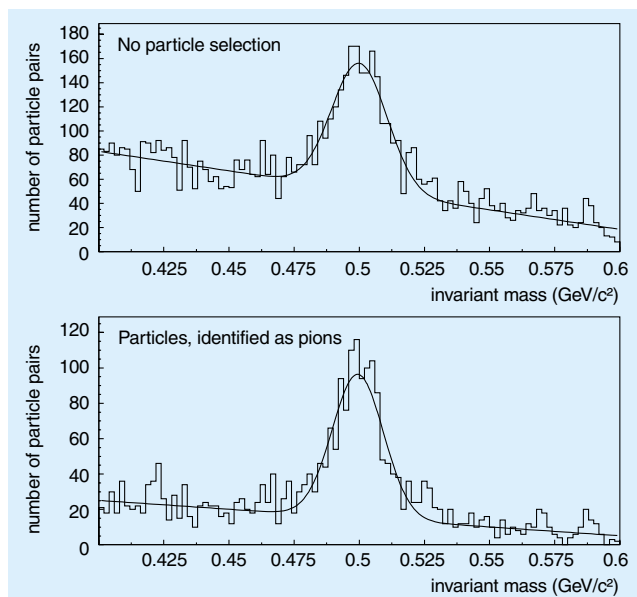


Abbildung 45:  $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  Kandidaten: Invariante Masse zweier Teilchen mit rekonstruiertem Sekundärvertex mit und ohne die Bedingung, dass beide Teilchen als Pionen identifiziert sind.

## Trigger und Datennahme

Die Aufgabe des vierstufigen Triggersystems von HERA-B ist es, bei hoher Effizienz Zerfälle schwerer Quarks zu identifizieren und gleichzeitig den enor-

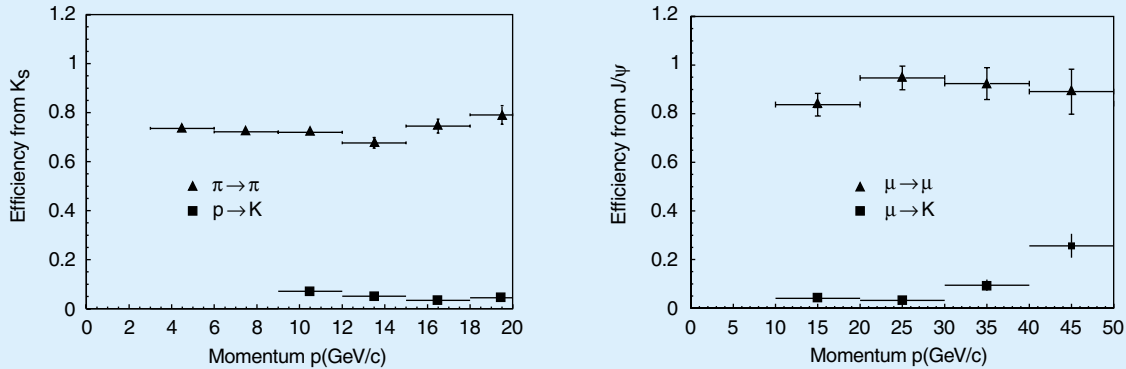


Abbildung 46: Identifikationseffizienz als Funktion des Impulses: Links: Effizienz (Dreiecke) und Falschidentifikationen (Quadrate) von Pionen, abgeleitet aus dem Zerfall  $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ . Rechts: Dasselbe für Myonen aus dem Zerfall  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ .

men Untergrund von sonstigen unelastischen Proton-Wechselwirkungen zu unterdrücken. Die Wechselwirkungsrate von 5 bis 40 MHz muss sukzessiv auf eine Rate von etwa 50 Hz reduziert werden, mit der die Daten aufgezeichnet werden können. Das Triggerkonzept basiert wesentlich auf der Identifikation von Elektronen und Myonen aus  $J/\psi$ -Zerfällen und aus semileptonischen Zerfällen schwerer Mesonen.

Die erste Triggerstufe („First Level Trigger“ FLT) wählt  $J/\psi$ -Kandidaten anhand der Kinematik der beiden Zerfallsleptonen aus. Letztere haben einen großen Transversalimpuls und werden von den vorgeschalteten Pretriggern im elektromagnetischen Kalorimeter und den Myonkammern gesucht. Der FLT erhält die Parameter der Kandidaten und benutzt die Liste der getroffenen Drähte in den Spurkammern nach dem Magneten, um vom Kalorimeter aus die Spuren in Richtung Target zu verfolgen. Wird in einer Lage der Spurkammern innerhalb eines Suchfensters kein getroffener Draht gefunden, wird der Kandidat verworfen. Andernfalls wird ein neues Suchfenster für die nächste Lage berechnet und dort nach getroffenen Drähten gesucht. Am Ende der Kette ist die Leptonspur gut vermessen und Schnitte auf den Transversalimpuls können angewandt werden. Werden mehrere Leptonen gefunden, kann die invariante Masse von Paaren berechnet und mit der  $J/\psi$ -Masse verglichen werden.

Der FLT ist als modularer Elektronik-Trigger mit etwa 100 Prozessoren realisiert. Der Aufbau des Systems

und Vorstudien zu seiner Leistungsfähigkeit sind in den Vorjahresberichten beschrieben. Im Jahr 2000 wurde der FLT mit Ausnahme eines Teils der für die inneren Spurkammern benötigten Komponenten installiert. Die Produktion aller Komponenten wurde erfolgreich abgeschlossen.

Im Berichtszeitraum wurde der FLT in Betrieb genommen. Zuerst wurden die einzelnen Prozessoren und Datenübertragungselemente allein getestet. Da dieser Test im Wesentlichen eine Wiederholung von Labortests beim Produktionsabschluss war, traten erwartungsgemäß kaum Probleme auf.

Im nächsten Schritt wurden die Datenverbindungen zwischen den Prozessoren getestet. Dabei gab es sowohl in der Interprozessor-Kommunikation als auch bei der Datenübertragung von den Spurkammern zu den FLT-Prozessoren Probleme, bei letzterer sogar erhebliche.

In der Vernetzung der Prozessoren untereinander traten sporadische Übertragungsfehler auf, die durch regelmäßig durchgeführte Tests erkannt und durch Rücksetzen des Systems beseitigt werden konnten. Die Ursache für das Fehlverhalten konnte auf Probleme in einer Spannungsversorgung zurückgeführt werden. Eine geplante geringfügige Modifikation der beteiligten Komponenten wird diese Datenverbindungen hinreichend stabilisieren.

Methode	Myonen		Elektronen
	Spur	J/ $\psi$	Spur
Referenzspuren Online	0.2...0.6	–	0.74
Referenzspuren Simulation	–	–	0.59
Ausgewählte J/ $\psi$ -Ereignisse	0.23	0.05	–
Einzelspur aus J/ $\psi$ -Raten Vergleich	0.19	–	–
Monte Carlo-Erwartung	0.33	0.10	–

Tabelle 2: Akzeptanz des FLT mit verschiedenen Analysemethoden. Alle Werte beinhalten Detektoreffizienzen, aber nicht die Pretrigger-Akzeptanz. Die unterschiedlichen Methoden werden im Text erklärt.

Die Daten der Spurkammern werden mit optischen Fasern über eine Distanz von 50 m optisch übermittelt. Es werden ungefähr 2000 Datenströme mit jeweils 900 Mbit/s Datenrate eingesetzt. Zu Beginn waren etwa 10% dieser optischen Verbindungen fehlerbehaftet. Zu den Ursachen zählten Verkabelungsfehler, unzureichende Spannungsversorgung am Sender, zeitliche Veränderungen der optischen Senderleistung, Ausfall von Komponenten und fehlerhafte Programmierungen von PLDs, die die Geometrie der Spurkammern auf die des FLT abbilden. Gegen Ende der Datennahmepériode konnten fast alle Probleme behoben werden – es traten allerdings immer wieder sporadisch neue auf. Durch Vereinfachung der Einstellung der optischen Senderleistung, neue Testverfahren der gesamten Datenstrecke und Beheben der Softwareprobleme sollte ein zuverlässiger Betrieb in Zukunft möglich sein.

Ein wesentlicher Schritt der Inbetriebnahme ist das Prozessieren von simulierten Ereignissen durch die installierte Prozessor-Hardware inklusive der Datenübertragungsstrecken. Nachdem die Simulationswerkzeuge auf den entsprechenden Stand gebracht worden waren, konnte keinerlei Abweichung der simulierten Prozessorantwort von der des installierten Systems festgestellt werden. Der Vergleich erfolgte schrittweise für jede Prozessstufe. Allerdings konnten nur kleine Teile des Systems zusammen getestet werden. Ein Test des Gesamtsystems mit Vergleich zur Simulation in jedem Prozessschritt steht noch aus. Die dazu notwendige aufwendige Software ist in Vorbereitung.

Die Leistungsfähigkeit des FLT misst sich in zwei wesentlichen Parametern: der Akzeptanz für die inter-

essanten Ereignisse und der Unterdrückung uninteressanter Ereignisse. Da HERA-B im Jahr 2000 fast ausschließlich bei kleinen Wechselwirkungsraten betrieben worden ist und nur ein Teil der räumlichen Akzeptanz des geplanten Systems in Betrieb war, sind die gemessenen Ausgangsraten nicht mit den Designwerten vergleichbar. Eine Analyse der Rate und Extrapolation zum vollständigen Detektor mit voller Wechselwirkungsrate unter Verwendung der Simulation steht noch aus. Das Hauptaugenmerk ist auf die Akzeptanz gerichtet worden. Dabei ist zunächst die Akzeptanz für einzelne Spuren interessant und dann die Akzeptanz für J/ $\psi$ -Ereignisse. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst und werden nachfolgend diskutiert.

Ereignisse, die mit einem Zufallstrigger ausgewählt werden und für die die FLT-Entscheidung aufgezeichnet wird, sind zur Bestimmung der Einzelspur-Akzeptanz geeignet. Elektronen, die mit dem RICH und dem elektromagnetischen Kalorimeter rekonstruiert werden, dienen als Referenzspuren und sollten auch vom FLT und von der FLT-Simulation gefunden werden. Die Akzeptanz ergibt sich aus dem Verhältnis der Anzahl von Referenzspuren, die durch FLT-Spuren beschrieben werden, zur Gesamtzahl der Referenzspuren.

Für Myonenspuren kann die Zuordnung von FLT-Spuren zu rekonstruierten Spuren nur durchgeführt werden, wenn Information aus dem Myon-Detektor zur Referenzspur-Rekonstruktion verwendet wird. Diese Rekonstruktion wählt Myonen aus, die vom FLT gut erkannt werden können, daher ist das Ergebnis nicht repräsentativ für alle Myonen. Je nach verlangter Qualität

der Referenzspur variiert die Zuordnungswahrscheinlichkeit zu einer aufgezeichneten FLT-Spur von 20% bis 60%.

Die Akzeptanz für  $J/\psi$ -Ereignisse wurde mit der FLT-Simulation aus den Daten abgeschätzt. Myonenpaare mit einer invarianten Masse nahe der  $J/\psi$ -Masse bilden eine Myonenquelle, die mit wenig Information aus dem Myon-Detektor auskommt und deswegen ein gutes Umfeld zur Untersuchung von FLT-Eigenschaften darstellt. Solche Ereignisse sind leider nur ohne aufgezeichnete FLT-Information vorhanden, so dass Aussagen über die FLT-Akzeptanz nur mit Hilfe der Simulation möglich sind. Der Anteil von Myonen, die durch die FLT-Simulation gefunden werden, ist 23%.

Alternativ kann die Myon-Akzeptanz des FLT aus  $J/\psi$ -Produktionsraten unter verschiedenen Triggerbedingungen berechnet werden. In einem Fall wurde keine FLT-Information im Trigger verwendet, im anderen wurde mindestens eine Myonspur mit dem FLT gefunden. Eine Korrektur von 0.96 berücksichtigt den Unterschied in der SLT-Akzeptanz in den beiden Betriebsmoden. Wir finden 19% als Einzelspur-Akzeptanz. Diese sehr direkte Berechnung ist in guter Übereinstimmung mit den anderen Messmethoden.

Der FLT ist nahezu komplett installiert und in Betrieb genommen. Probleme, die in den Datenübertragungstrecken auftraten, sind größtenteils gelöst oder werden vor der nächsten Datennahmeperiode gelöst sein. Die Akzeptanz des FLT für Einzelspuren ist relativ gut verstanden. Potential zur Verbesserung der Akzeptanz liegt zum einen in der Verbesserung der Datenübertragung und zum anderen in der Reparatur der nicht funktionierenden Spurkammern. Die Akzeptanz für Spurpaare konnte noch nicht direkt bestimmt werden, da in diesem Betriebsmodus keine  $J/\psi$ -Mesonen beobachtet werden konnten. Die Analyse dieses Problems dauert noch an.

## Die zweite Triggerstufe

Die zweite Stufe des HERA-B Triggers („Second Level Trigger“ SLT) ist vollständig in das Datennahmesystem integriert und benötigt daher im Gegensatz zur ersten Stufe keinen separaten Datenpfad. Der Algorithmus dieses Filters ist komplett in C programmiert

und wird auf kommerziell erhältlichen PCs mit dem Betriebssystem Linux ausgeführt.

Aufbauend auf der Information der ersten Triggerstufe werden zunächst die Parameter der Spuren, die der FLT gefunden hat, besser bestimmt, dann die Spur in den Vertexdetektor weiterverfolgt und schließlich gefordert, dass die Spuren eines Paartriggers einen gemeinsamen, eventuell vom Hauptvertex verschiedenen Vertex haben.

Die zweite Triggerstufe wurde im Berichtsjahr auf ihre endgültige Ausbaugröße von 240 Prozessoren erweitert. Damit ist die volle PC-Farm einsatzbereit. Diese stellt die größte am DESY betriebene Computerfarm dar.

Der SLT ist in zwei grundsätzlich verschiedenen Weisen betrieben worden: unabhängig vom FLT und dem FLT nachgeschaltet. Im unabhängigen Modus konnten mehrere Tausend  $J/\psi$ -Ereignisse in beiden leptonischen Zerfallskanälen aufgezeichnet werden. Zusammen mit dem SLT wurden nahezu alle FLT-Studien durchgeführt und durch Vergleich der beiden Betriebsweisen wesentliche Schlüsse auf Eigenschaften des FLT gezogen.

Der Algorithmus des SLT benötigt Startbedingungen für die Spurensuche, so genannte „track seeds“. Diese wurden ohne den FLT entweder durch Emulation der Leptonen-Identifikation des FLT oder durch die Pretrigger erzeugt. Die so gefundenen Suchfenster, die signifikant größer sind als die vom FLT ausgegebenen, werden der normalen SLT-Prozesskette übergeben: Zuerst werden durch eine schnelle Histogrammiertechnik falsche Spuren in den Regionen im Bereich zwischen Magnet und ECAL verworfen (SLICER). Danach werden dort die Spuren durch einen Fit zunächst in der  $x$ - $z$  (REFIT-X) und dann in der  $y$ - $z$  (REFIT-Y) Ebene bestimmt. Die Spuren werden durch den Magneten zurückverfolgt und schließlich durch den Vertexdetektor bis zum Hauptvertex verlängert (L2SILI); abschließend werden die Vertices von Spurpaaren gefunden (L2VERTEX).

Die Akzeptanz der SLT-Algorithmen wurde durch Monte Carlo-Simulation des Detektors bestimmt. Die generierten  $J/\psi$ -Ereignisse wurden mit den gleichen Programmen prozessiert, die auch während der Datennahme benutzt wurden, um die Eigenschaften des

Algorithmus	Realistischer OTR		Idealer OTR	
	$e^+e^-$	$\mu^+\mu^-$	$e^+e^-$	$\mu^+\mu^-$
SLICER	0.99	0.99	1.00	1.00
REFIT-X	0.92	0.91	0.94	0.96
REFIT-Y	0.93	0.97	0.97	0.99
L2SILI	0.88	0.89	0.92	0.94
L2VERTEX	0.97	0.98	0.97	0.98
Insgesamt	0.72	0.76	0.81	0.88

Tabelle 3: Mit Monte Carlo-Simulationen bestimmte Akzeptanz des SLT für leptonisch zerfallende  $J/\psi$ -Ereignisse. Die Algorithmen sind im Text beschrieben.

SLT zu bestimmen. Tabelle 3 listet die Akzeptanz der verschiedenen Algorithmen auf.

Der SLT war während der Datennahmepériode 2000 der meistbenutzte Trigger. Alle benötigten Bestandteile sind in der Endausbaustufe ausgiebig und erfolgreich getestet worden. Die Akzeptanz ist stark abhängig von der Qualität der verwendeten Detektor-Information, aber schon nahe den idealen Werten. Aussagen zur Triggerrate hängen stark ab von der Eingangsinformation, die der FLT liefert.

## Triggerstufe 4 und Rekonstruktionsfarm

Das Trigger- und Datenerfassungssystem von HERA-B beinhaltet als vierte Stufe (L4) eine Linux-PC-Farm zur Ereignisrekonstruktion im Echtzeitbetrieb. Damit stehen rekonstruierte Ereignisse unmittelbar nach der Datenspeicherung für weitergehende Physikanalysen zur Verfügung.

Die Farm besteht aus 100 PCs mit je zwei Intel Pentium-III/500 MHz Prozessoren, die in ein Fast-Ethernet Netzwerk integriert sind. Das System wurde geplant, um Ereignisraten von 50 Hz zu verarbeiten.

Neben der Ereignisrekonstruktion hat die Farm die Aufgabe, eine Ereignisklassifikation und -selektion (L4-Trigger) durchzuführen und die Datenarchivierung vorzubereiten. Außerdem werden während der Rekon-

struktion Informationen gesammelt, die zur Qualitätskontrolle sowie zur Alignierung und Kalibration des Detektors verwendet werden. Aktualisierte Konstanten werden anschließend zur weiteren Verwendung an das Triggersystem zurückgegeben.

Der Aufbau der Farm wurde Ende 1999 abgeschlossen und in der Laufperiode 2000 erfolgreich in Betrieb genommen. Seit Ende 2000 wird die Farm zum Reprozessieren der aufgezeichneten Ereignisdaten verwendet. Dazu wird dieselbe Software wie bei der Online-Datennahme betrieben, wobei die Rohdaten von Band gelesen und auf die Farmknoten verteilt werden.

Insgesamt wurden im Berichtsjahr etwa 30 Millionen Ereignisse gespeichert. Die gesamte Datenmenge einschließlich Kalibrationsläufen und reprozessierten Ereignissen beträgt fast 10 TB, die auf Bändern archiviert sind.

Im Rahmen des Farmprojekts wurde die Rekonstruktionssoftware in das Rekonstruktionsprogramm integriert, das zur Zeit 4.5 Sekunden für ein Ereignis eines getriggerten Runs mit 5 MHz Wechselwirkungsrate benötigt. Damit kann die Farm die geplante Ereignisrate von 50 Hz bewältigen.

## Physikanalyse

### Übersicht

Bei der Inbetriebnahme des Detektors und des Triggersystems im Jahr 2000 wurden große Datensätze unter verschiedenen Betriebsbedingungen aufgezeichnet. Diese Daten dienen nicht nur zum technischen Verständnis des Detektors, sondern erlauben auch erste interessante Physikanalysen:

- Es wurden  $4 \cdot 10^6$  unelastische Proton-Kern-Stöße mit verschiedenen Drahttargets aufgezeichnet. Diese Daten dienen zur Messung von inklusiven Spektren ( $p$ ,  $p_T$ ,  $x$  usw.) und von relativen Produktionsraten identifizierter geladener Teilchen und von  $V^0$ -Teilchen. Darüber hinaus sind die Daten wichtig für systematische Studien, beispielsweise zur Messung der Luminosität, oder zur Untersuchung von Untergrund in Datensätzen, die mit restriktiven Triggern aufgezeichnet wurden.

Zerfall	Signal Ereignisse	Rek. Masse [MeV/c <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [MeV/c <sup>2</sup> ]	PDG Wert [MeV/c <sup>2</sup> ]
$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$	7973 $\pm$ 133	496.5 $\pm$ 0.1	6.0 $\pm$ 0.1	497.67 $\pm$ 0.03
$\Lambda \rightarrow p \pi^-$	500 $\pm$ 39	1115.4 $\pm$ 0.2	1.9 $\pm$ 0.2	1115.684 $\pm$ 0.006
$\bar{\Lambda} \rightarrow \bar{p} \pi^+$	337 $\pm$ 37	1115.9 $\pm$ 0.3	2.6 $\pm$ 0.4	1115.684 $\pm$ 0.006
$K_{890}^0 \rightarrow K^- \pi^+$	958 $\pm$ 130	890.0 $\pm$ 4.0	53.0 $\pm$ 6.0	896.1 $\pm$ 0.3
$K_{890}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$	1336 $\pm$ 143	894.0 $\pm$ 5.0	48.0 $\pm$ 5.0	896.1 $\pm$ 0.3
$\phi_{1020} \rightarrow K^- K^+$	274 $\pm$ 38	1019.9 $\pm$ 0.6	7.0 $\pm$ 1.0	1019.0 $\pm$ 0.008
$D^0 \rightarrow K^- \pi^+$	59 $\pm$ 10	1852.0 $\pm$ 5.0	27.0 $\pm$ 5.0	1864.5 $\pm$ 0.5

Tabelle 4: *Rekonstruierte Massen und Breiten beobachteter Zerfallssignale. In den Ereignissen wurde mindestens ein Leptonkandidat mit hohem Transversalimpuls gefordert. Die von HERA-B angegebenen Fehler sind statistische Fehler.*

- Unter Verwendung des Elektron-Pretriggersystems wurden 600 000 Ereignisse mit großer transversaler Energie ( $E_T > 4$  GeV) im elektromagnetischen Kalorimeter aufgezeichnet. Diese Ereignisse enthalten harte Photonen, die entweder direkt erzeugt werden oder aus dem Zerfall neutraler Pionen stammen. Die Daten erlauben das Studium der Dynamik harter Proton-Kern-Stöße, beschreibbar durch perturbative QCD.
- Insgesamt wurden etwa  $4.5 \cdot 10^6$  Ereignisse mit mindestens einem Lepton-Kandidaten mit großem Transversalimpuls aufgezeichnet. Dabei kamen verschiedene Triggerkonfigurationen zum Einsatz, die die Elektron- und Myon-Pretrigger, die erste und die zweite Triggerstufe kombinierten. Die Daten besitzen eine angereicherte Charm-Komponente und können im Gegensatz zu  $J/\psi$ -Triggern auch zum Studium der Produktion und des Zerfalls von Teilchen mit Charm verwendet werden. Tabelle 4 zeigt rekonstruierte Zerfälle von Teilchen mit Charm oder Strangeness, die in diesen Ereignissen gefunden wurden.
- Der größte Teil der Datennahme widmete sich dem Dilepton-Trigger zur Selektion von Ereignissen mit  $J/\psi$ -Zerfällen. Insgesamt wurden mehr als  $18 \cdot 10^6$  Ereignisse aufgezeichnet. Dabei kamen sowohl das Elektron- als auch das Myon-Pretriggersystem zum Einsatz. Teile der Daten wurden allein auf Basis

der zweiten Triggerstufe selektiert. In der späteren Phase der Datennahme wurde auch die erste Triggerstufe verwendet, in der verlangt wurde, dass eine oder auch beide Leptonspuren erkannt wurden. Die so aufgezeichneten Daten sollten neben der Untersuchung der Charmonium-Produktion auch eine erste grobe Abschätzung des Beauty-Wirkungsquerschnitts in Proton-Kern-Stößen erlauben.

Die Datenanalyse ist noch nicht abgeschlossen. Hier werden exemplarisch einige vorläufige Resultate zur Physik schwerer Quarks dargestellt.

## Charm-Physik

Ereignisse mit schweren Quarks, insbesondere Charm-Quarks, werden durch das Triggern auf einzelne Leptonen mit großem Transversalimpuls angereichert. Bereits der kleine im Jahr 2000 genommene Datensatz offenbarte das große Potential von HERA-B in diesem Sektor. So gelang es nicht nur, ein sauberes Signal vom Zerfall  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  zu finden, sondern es wurden auch vollständig rekonstruierbare exklusive Zerfälle von D-Mesonen in hadronische Endzustände mit kleiner Multiplizität beobachtet. In Abbildung 47 sind die Signale für den Zerfall  $D^0 \rightarrow \pi^+ K^-$ , zusammen mit dem ladungskonjugierten Zerfall, deutlich im Massenspektrum zu erkennen.

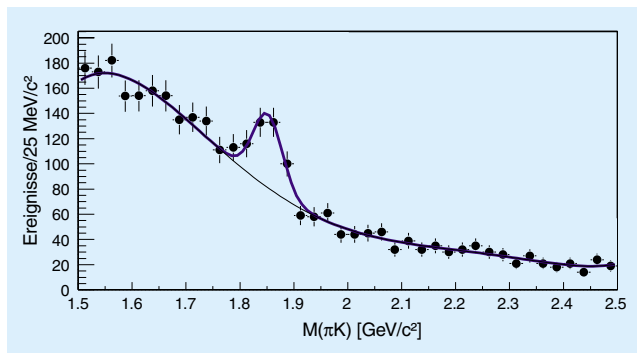


Abbildung 47: Spektren der invarianten Massen von  $\pi^\pm K^\mp$ -Kombinationen.

Zur Selektion dieser Zerfälle wurden die Zerfallsprodukte mit Hilfe des RICH-Detektors identifiziert. Ferner wurde unter Verwendung der Information vom Vertexdetektor ein vom Hauptvertex getrennter Sekundärvertex der potentiellen D-Zerfallsprodukte verlangt, und es wurde geprüft, ob der rekonstruierte Impulsvektor des D-Meson-Kandidaten vom Primärvertex zum Sekundärvertex zeigt.

Die Untersuchung der Zerfälle von Teilchen mit Charm in vollständig rekonstruierbare Endzustände wird in Zukunft einen hohen Stellenwert im HERA-B Programm einnehmen. Sie bietet exzellente Möglichkeiten zur Suche nach seltenen oder verbotenen Zerfällen von D-Mesonen in zwei Leptonen und dient somit zum Test des Standard-Modells.

## Charmonium-Physik

Charmonium-Zerfälle werden effizient durch die Dilepton-Trigger von HERA-B angereichert. Sowohl im elektronischen als auch im myonischen Zerfallskanal konnten klare  $J/\psi$ -Signale im Massenspektrum rekonstruiert werden.

In Abbildung 48 ist exemplarisch das  $\mu^+\mu^-$ -Massenspektrum nach der Standard-Rekonstruktion dargestellt. Die Ereignisse stammen aus den Datensätzen, die mit dem Dilepton-Trigger aufgenommen wurden. Zur zusätzlichen Untergrund-Unterdrückung wurde verlangt, dass mindestens eine Myonspur mit einem RICH-Ring assoziiert werden konnte. Deutlich sichtbar sind die Massensignale der  $J/\psi$ - und  $\psi'$ -Zustände.

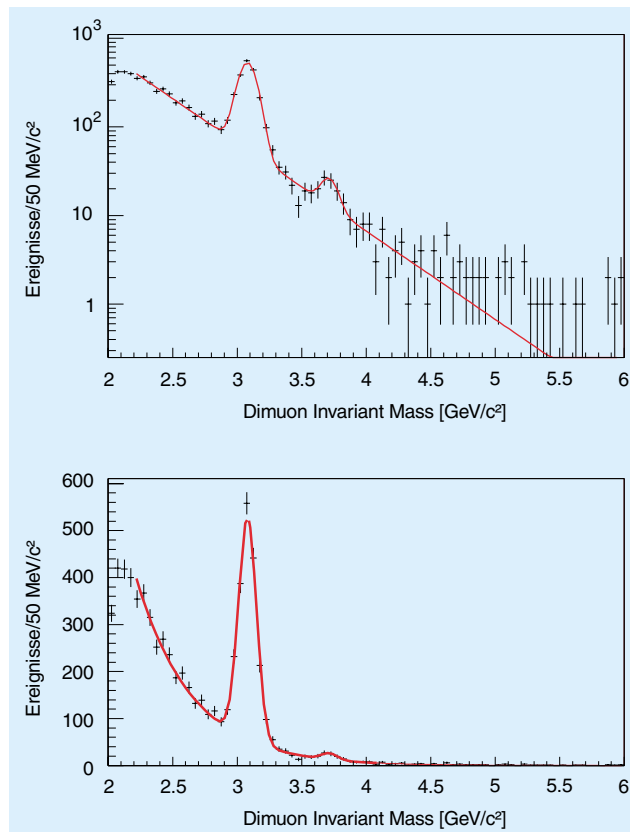


Abbildung 48: Massenspektrum der  $\mu^+\mu^-$ -Paare in logarithmischer und linearer Darstellung, zusammen mit einer Anpassungsfunktion, die im Wesentlichen aus zwei Gaußfunktionen (Signale) und einer Exponentialfunktion (Untergrund) besteht.

Die Anpassung durch zwei Gaußfunktionen, überlagert mit einem exponentiell abfallenden Untergrund, ergibt die Massen  $M_{J/\psi} = 3081 \text{ MeV}/c^2$  und  $M_{\psi'} = 3663 \text{ MeV}/c^2$ , die Breiten der Gauß-Anpassungen sind 70 bzw. 62  $\text{MeV}/c^2$ . Die jeweiligen Weltmittelwerte liegen bei 3097  $\text{MeV}/c^2$  und 3686  $\text{MeV}/c^2$ . Das Verhältnis der Produktionswirkungsquerschnitte von  $J/\psi$ - und  $\psi'$ -Zuständen beträgt etwa 50, in guter Übereinstimmung mit dem Wert von 60, der im Experiment E789 gemessen wurde.

## Beauty-Wirkungsquerschnitt

Die im Jahr 2000 gesammelten Daten zur  $J/\psi$ -Produktion erlauben eine erste Suche nach Zerfällen vom Typ



$B \rightarrow J/\psi X$ , um eine Grobmessung des Produktionswirkungsquerschnitts für  $b\bar{b}$ -Paare durchzuführen.

Verschiedene Ansätze werden bei der Datenanalyse verfolgt. Der direkteste besteht in der Rekonstruktion von signifikant vom Primärvertex getrennten Sekundärvertices, an denen auch das  $J/\psi$ -Meson entsteht und in zwei Leptonen zerfällt. Wegen der noch zu geringen Statistik im myonischen Kanal ist diese Methode bisher nur für den elektronischen Zerfallskanal der  $J/\psi$ -Mesonen anwendbar.

Ein zweiter Ansatz besteht in der Analyse doppelt-semileptonischer B-Zerfälle, die durch den Dilepton-Trigger effizient selektiert werden. Um Untergrundbeiträge zu beherrschen, muss in diesem Fall zusätzlich ein rekonstruierter Sekundärvertex vom Zerfall der bei den semileptonischen B-Zerfällen produzierten Charm-Teilchen, zum Beispiel mit drei geladenen Zerfallsprodukten, gefordert werden.

Für die Analyse der elektronischen  $J/\psi$ -Zerfälle wurden Selektionsschnitte angebracht, die in einem Datensatz von etwa 40 000  $J/\psi$ -Zerfällen resultieren. Der sehr große Untergrund unter diesem Signal (durch Drell-Yan-Paare und durch fälschlicherweise als Elektronen identifizierte Spuren, die nicht von Elektronen herrühren) kann reduziert werden, indem ein Mindestabstand zwischen Primär- und Sekundärvertex verlangt wird. Ferner können zusätzlich Bremsstrahlungs-Photonen der Elektronen verlangt werden, wodurch die verfügbare Statistik zwar um eine Größenordnung reduziert, das Signal aber auch drastisch gesäubert wird. Dies ist in Abbildung 49 demonstriert, in der das Spektrum der invarianten Massen der beiden Elektronen mit Bremsstrahlungs-Photonen dargestellt ist. Von beiden Spuren wird verlangt, dass sie aus einem gemeinsamen Vertex stammen.

Die entsprechende Analyse der myonischen  $J/\psi$ -Zerfälle leidet noch an zu geringer Statistik. Das Gleiche gilt für die Analyse der doppelt-semileptonischen Beauty-Zerfälle mit rekonstruiertem Vertex des sekundären Charm-Zerfalls.

Die Resultate zeigen insgesamt, dass eine genaue Messung des Beauty-Produktionswirkungsquerschnitts mit einem verbesserten HERA-B Detektor in der nächsten Datennahmeperiode möglich sein wird.

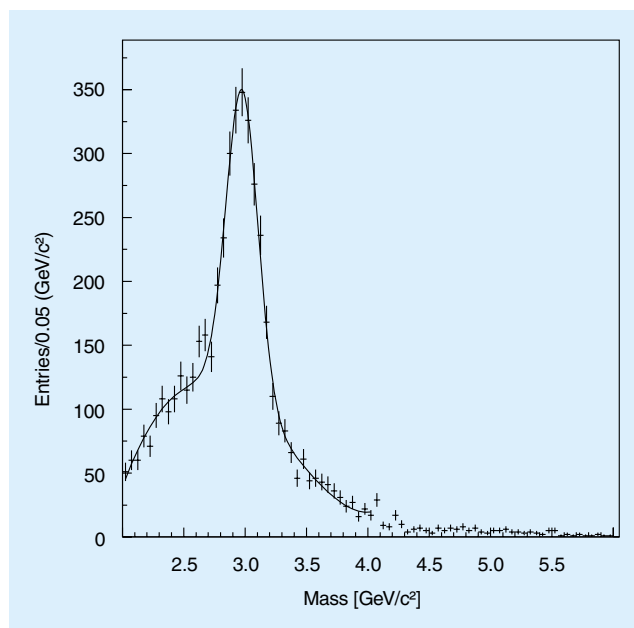


Abbildung 49: Spektrum der invarianten Massen der beiden Elektronen aus dem gesäuberten Dilepton-Datensatz.

## Zusammenfassung und Ausblick

Das Jahr 2000 war für HERA-B das erste Jahr, in dem das komplett fertig gestellte Experiment betrieben werden konnte. Eine große Zahl der Komponenten des HERA-B Experiments arbeitete hierbei zur vollen Zufriedenheit und erreichte die geplanten Leistungsdaten. Leider erfüllte sich die Hoffnung nicht, das Experiment als Ganzes ebenfalls in sehr kurzer Zeit auf dieses hohe Niveau zu bringen. Durch seine außerordentliche Komplexität wurden mehrere Probleme erst in dieser späten Phase, in der das gesamte System betrieben wurde und alle Komponenten zusammenspielten, sichtbar. Hier sind vor allem die gasgefüllten Spurdetektoren zu nennen, bei denen noch nicht die geplante Effizienz und Stabilität erreicht werden konnte. Hierdurch wurde vor allem die erste Triggerstufe (FLT), die sehr hohe Anforderungen an die Effizienz der Spurdetektoren stellt, in Mitleidenschaft gezogen. Ihre Inbetriebnahme wurde hierdurch erheblich erschwert. Die ursprüngliche Zielsetzung von HERA-B, die Messung der CP-Verletzung bei Beauty-Quarks, wurde dadurch

verzögert. In der Zwischenzeit haben die eigens für diese Fragestellung gebauten B-Meson-Fabriken in den USA und Japan ihren Betrieb erfolgreich aufgenommen. Deshalb hat die HERA-B Kollaboration ein Physikprogramm – Untersuchungen von QCD und Charm-Zuständen – für die Zeit 2001–2002 vorgeschlagen, das vom DESY-Direktorium genehmigt wurde.

Auch wenn HERA-B seine hochgesteckten Ziele bisher nicht erreichen konnte, ist es bereits jetzt das leistungsfähigste Vielteilchen-Spektrometer, das jemals für diesen Energiebereich gebaut wurde. Es erlaubt bei weitem

höhere Datenraten und überdeckt einen deutlich größeren Bereich der Zerfallskinetik der produzierten Teilchen als alle bisherigen Fixed-Target Experimente bei CERN und Fermilab. Es darf daher erwartet werden, dass HERA-B auch bei reduzierter Leistungsfähigkeit in der Lage sein wird, interessante Beiträge im Bereich der QCD- und Charm-Physik zu liefern und zu einem tieferen Verständnis der starken Wechselwirkung beizutragen. Zudem wird HERA-B seine Vorreiterrolle bei den Hochraten-Experimenten weiter ausbauen können und wichtige Erkenntnisse für zukünftige Detektor-Generationen liefern.