



Abbildung 39: Blick in die HERA-B Halle auf den Detektor.

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, Niels Bohr Inst. Copenhagen, Wayne State Univ. Detroit, Univ. Dortmund, JINR Dubna, DESY Hamburg, MPI Kernphys. und Univ. Heidelberg, Univ. of Houston, INR Kiev, LIP und Univ. Lissabon, Jozef Stefan Inst. und Univ. Ljubljana, UC Los Angeles, Univ. Mannheim, ITEP und MEPhI Moscow, MPI Phys. München, Univ. Oslo, Univ. Rostock, Univ. Siegen, Univ. Utrecht, DESY Zeuthen, Univ. Zürich.

Sprecher: M. Medinnis, DESY

HERA-B ist ein Vorwärtsspektrometer, das Wechselwirkungen zwischen Protonen aus den äußeren Bereichen des HERA-Protonenstrahls und verschiedenen Targets vermisst. Die Targets bestehen aus Drähten unterschiedlichen Materials, die es erlauben, Proton-Nukleon-Wechselwirkungen mit verschiedenen Kernen (Kohlenstoff, Aluminium, Titan, Wolfram) zu untersuchen. Die Wechselwirkungsrate kann, wie in vorhergehenden Jahresberichten detailliert beschrieben, durch eine präzise Einstellung der Drähte in der Richtung quer zum Strahl kontrolliert werden.

Ziel des Experiments HERA-B ist die Untersuchung von Aspekten der Physik von Bottom- und Charm-Quarks sowie der Mechanismen, die die Produktion verschiedener in Proton-Nukleon-Wechselwirkungen entstehender Teilchen beschreiben. Die ursprünglich wichtigste Aufgabe, die Messung der CP-Verletzung im B-Meson-System, kann von HERA-B nicht erfüllt werden und ist inzwischen von den Experimenten BaBar und BELLE an e^+e^- -Speicherringen durchgeführt worden.

Im Jahr 2000 wurde das Spektrometer HERA-B fertig gestellt. Während der ersten längeren Datennahmepériode von HERA-B wurden etwa 30 Millionen Ereignisse aufgezeichnet. Die Analyse dieser Daten im Berichtszeitraum lieferte wichtige Erkenntnisse über das Verhalten des Detektors, vor allem bezüglich Nachweiswahrscheinlichkeiten und Unter-

grundraten. Einige der physikalischen Analysen sollen veröffentlicht werden.

Im Jahr 2001 fand eine lange Unterbrechung der Datennahme wegen des Umbaus von HERA statt, die für umfangreiche Reparaturen und Verbesserungen des Detektors genutzt wurde. Zahlreiche Probleme, die teilweise erst während der Inbetriebnahme im Jahr 2000 bekannt geworden waren, konnten gelöst werden.

Eine kurze Datennahmepériode gegen Ende des Jahres hat bewiesen, dass der Detektor nach der Unterbrechung erfolgreich wieder in Betrieb genommen und sein Zustand durch die umfangreichen Arbeiten erheblich verbessert werden konnte. Die an HERA erreichbaren Ereignisraten waren jedoch minimal, so dass eine physikalische Analyse den Daten des Jahres 2002 vorbehalten bleiben wird.

Der Detektor HERA-B

Der Detektor HERA-B setzt sich aus vier verschiedenen mechanischen Grundeinheiten zusammen (Abb. 39):

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

Magnetplattform: zwischen den Polschuhen des Dipolmagneten sind die inneren Spurkammern (Gra-

nularität von 0.3 mm) und die äußeren Spurrkammern (Granularität von 5 bzw. 10 mm) eingebaut.

Mittelplattform: hier sind das Hauptspurrkammersystem 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 Eisenabsorbem. Auch hier werden in der Nähe des Strahlrohres Detektoren mit kleiner Granularität (Myon-Pixelkammern) eingesetzt.

Inneres Spurrkammersystem

Die Betriebspause von HERA wurde zu Reparaturarbeiten an den Kammern des inneren Spurrkammersystems (ITR) und zur Fertigstellung der letzten noch fehlenden drei Halbstationen hinter dem RICH-Detektor genutzt. Alle Stationen wurden ausgebaut, überholt und wieder installiert. 15 Kammern, die entweder defekte GEMs (Gas-Elektronen-Vervielfacher) oder größere fehlerhafte Bereiche in den MSGCs (Mikrostreifengaszähler) aufwiesen, wurden vollständig ausgewechselt. Bei einer erheblichen Zahl von MSGCs waren zu Beginn des Betriebs Kurzschlüsse zwischen einzelnen Anoden und Kathoden aufgetreten. Dabei wird infolge der Hochspannungsverteilung jeweils eine Gruppe von 16 Kanälen, das entspricht 1.6% einer Kammer, kurzgeschlossen. Durch Abtrennen einzelner Leiterbahnen auf den Kaptonbrücken, die von den Verstärkern zu den Anoden führen, konnten diese Ineffizienzen vollständig beseitigt werden. Präventiv wurden Anoden, die bekanntermaßen unterbrochen und deshalb besonders gefährdet sind, Kurzschlüsse zu erzeugen, ebenfalls abgetrennt. Nach dieser recht aufwendigen Arbeit sollten alle toten Bereiche eliminiert sein und Hardware-bedingte Ineffizienzen in den nächsten Jahren auf 1–2% beschränkt bleiben.

Der Betrieb der Detektoren im Jahr 2000 war weitgehend unter der Aufsicht von Experten erfolgt. Dabei registrierte Schwachstellen in Hard- und Software sind nun behoben. Die störanfälligen Niederspannungsnetzgeräte wurden umgerüstet und empfindliche Hochspannungsverbindungen durch Stecker ersetzt. Erheblich verbessert wurde die Kontrollsoftware, die nunmehr

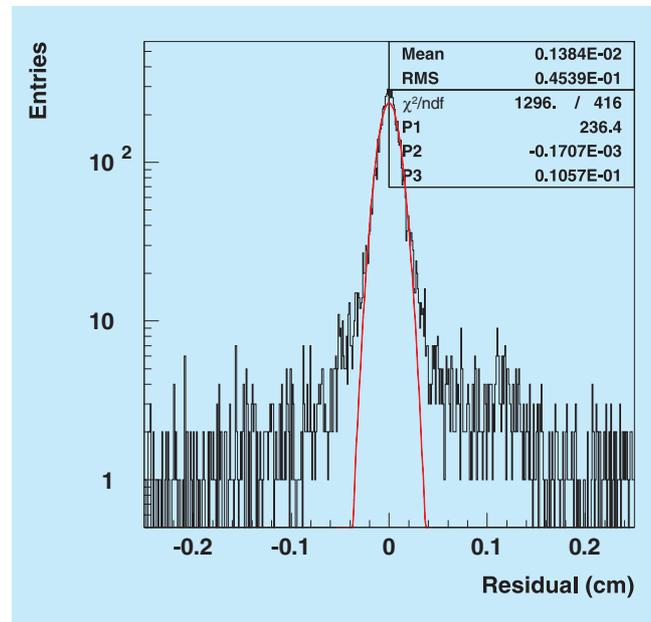


Abbildung 40: Verteilung von Spurrestiduen im Inneren Spurrkammersystem.

einen sicheren Betrieb durch die Schichtbesetzung ermöglicht. Sie regelt die Spannungen automatisch, auch wenn sie kurzzeitig infolge der unvermeidbaren, sporadisch auftretenden Überschlüge in den GEMs unterbrochen werden müssen. Ein neues Histogrammpaket ermöglicht es, komplexe Fehler in den Detektoren, der Ausleseelektronik oder der Spannungsversorgung schnell zu lokalisieren.

Die Spurrekonstruktion im ITR wurde durch Einführung eines auf der Basis Cellularer Automata arbeitenden Systems verbessert. Die ITR-Daten werden nun bei der Analyse mitverwendet. Obwohl die Betriebsbedingungen während der Datennahme 2000 bei den meisten Kammern nicht optimiert werden konnten, ist die Ortsauflösung mit etwa 0.1 mm sehr gut. Dieser Wert ergibt sich aus der Residuenverteilung (Abb. 40) von rekonstruierten Spuren von Teilchen mit Impulsen zwischen 35 und 50 GeV/c. Gleichzeitig zeigt die Verteilung, bei der im Mittel pro Spur 15 Kammern beitragen, die sehr gute Bestimmung der geometrischen Kammerpositionen (Alignment).

Sobald ein stabiler Betrieb von HERA gegeben ist, werden die Kammern innerhalb von zwei bis drei Wochen auf die nominelle Gasverstärkung gebracht. Paral-

lel dazu wird die Bestimmung der Kammerpositionen vorgenommen. Die Betriebsparameter des ITR sollten dann den Designwerten entsprechen.

Äußeres Spurkammersystem

Das äußere Spurkammersystem (OTR) von HERA-B dient dem Nachweis geladener Teilchen ab etwa 20 cm Entfernung vom Protonenstrahl bis hin zur äußeren Akzeptanzgrenze des Experiments. Die Messstationen des Systems, die so genannten Superlagen, sind an verschiedenen Positionen zwischen Vertextank und Kalorimeter senkrecht zum Strahl angeordnet. In jeder Superlage befindet sich eine variable Anzahl ebener Messlagen, die aus Wabendriftkammermodulen zusammengesetzt sind.

Die von September 2000 bis Juli 2001 währende Betriebsunterbrechung von HERA wurde zur Durchführung umfangreicher Reparaturarbeiten an den äußeren Spurkammern genutzt.

Zur Beseitigung des Hauptproblems, der mangelnden Hochspannungsfestigkeit der Driftkammermodule, erwies es sich als notwendig, alle Superlagen vor Ort zu öffnen, die Module zu entnehmen und im Reinraum zu reparieren. Im Zuge dieser Arbeiten wurden insgesamt 14 000 unsachgemäß installierte Koppelkondensatoren auf den Hochspannungsplatinen der Module ersetzt. Ferner wurden alle Module, bei denen das nicht schon bei der Produktion geschehen war, mit Kohlefaserstäben mechanisch versteift. Alle reparierten Module durchliefen ähnliche Qualitätstests wie vor der Erstinstallation. Wegen verschärfter Testkriterien erhöhte sich die Zahl deaktivierter Drähte etwas, mit 1.9% liegt die Ausfallrate aber durchaus noch im üblichen Rahmen. Für 80 der insgesamt 978 Module, die die Qualitätstests nicht bestanden oder bereits bei der Erstinstallation irreparabel beschädigt wurden, mussten auf den noch vorhandenen Produktionsanlagen Ersatzmodule gefertigt werden.

Ausgiebige Tests mit den reparierten Superlagen ergaben ein signifikant besseres Langzeitverhalten bezüglich der Hochspannungsstabilität. Die über einen Zeitraum von mehreren Monaten beobachtete Ausfallrate war unter gleichen Bedingungen um einen Faktor

zehn niedriger als vorher. Die Tests zeigten außerdem, dass ein sicherer Betrieb der Kammern beim doppelten Wert der nominellen Gasverstärkung (60 000 statt 30 000) möglich ist. Damit wurde Spielraum geschaffen für eine Verbesserung der Zelleffizienz, die während der Datennahme im Jahre 2000 in einigen Kammern mit 85% noch recht weit von den angestrebten 95% entfernt war.

Weitere Maßnahmen zur Effizienzverbesserung setzten bei der Ausleseelektronik des äußeren Spurkammersystems an. Die Signale der Driftkammermodule gelangen zunächst auf Vorverstärker mit integrierten Diskriminatoren, die sich in unmittelbarer Nähe der Signaldurchführungen an den Gasboxen befinden (insgesamt 7200 Stück). Zur digitalen Driftzeitmessung dienen insgesamt 955 TDC-Karten (Time-to-Digital Converter), die sich in am Kammerrahmen montierten Überrahmen befinden. Neben den gemessenen Driftzeiten stellen die TDC-Karten auch die Trefferinformationen für die erste Triggerstufe zur Verfügung. Diese Signale werden mittels so genannter Triggerlink-Karten den Bedürfnissen des Triggers entsprechend zusammengefasst und in optische Signale umgewandelt, bevor sie über Glasfaserleitungen an die Triggerelektronik geschickt werden.

Während der Datennahme im Jahre 2000 wurde beobachtet, dass von den Verbindungen zwischen den TDC- und den Triggerlink-Karten ein erheblicher Beitrag zum Rauschen der Ausleseelektronik ausging. Als Folge dessen mussten die Diskriminatorschwellen in den Vorverstärkern erhöht werden, was eine Verschlechterung der Zelleffizienz zur Folge hatte. Abhilfe wurde erst durch die Entfernung der Treiberbausteine von allen TDC-Karten geschaffen. Diese Maßnahme reduzierte das Rauschen der Ausleseelektronik so weit, dass die Diskriminatorschwellen um 20–30% verringert werden konnten. Das lässt für die kommende Datennahme Verbesserungen sowohl in der Effizienz als auch in der Ortsauflösung des äußeren Spurkammersystems erwarten.

Während des Betriebs im Jahre 2000 zeigten die Signale von 5–10% der optischen Sender auf den Triggerlink-Karten zeitliche Instabilitäten in Form und Pulshöhe, was zu Übertragungsfehlern führte. Dieses Problem wurde durch die Nachinstallation von Steuerstufen für alle Sender behoben.

Das komplexe Gassystem, das das gesamte äußere Spurkammersystem mit Gas versorgt, erwies sich während der gesamten Datennahme im Jahr 2000 als weitgehend zuverlässig. Als störend erwiesen sich lediglich einige längere Betriebsunterbrechungen bei Problemen mit den Pumpen im Hauptkreislauf des Systems. Zur Verkürzung solcher Ausfallzeiten bei der kommenden Datennahme wurde hier eine Lecksucheinheit installiert. Zur Minderung der Abhängigkeit der Gasverstärkung in den äußeren Spurkammern von Luftdruck und Umgebungstemperatur wurde eine automatische Regelung der Hochspannung entwickelt, getestet und in Betrieb genommen.

Im Zuge der Neudefinition des Physikprogramms von HERA-B wurden die Vor- und Nachteile der im Magneten befindlichen Kammern des äußeren Spurdetektors sorgfältig gegeneinander abgewogen. Es ergab sich, dass das Kammermaterial im Magneten den Nachweis von Elektronen und Photonen mehr stört als die Anwesenheit zusätzlicher Messstationen der Rekonstruktion von Myonen und geladenen Hadronen nützt. Demzufolge wurden sechs der sieben Kammern aus dem Magneten entfernt.

Im Dezember 2001 wurden erstmals Daten mit dem reparierten und modifizierten äußeren Spurkammersystem genommen. Diese Daten dienen hauptsächlich dazu, die elektronischen Kanäle korrekt auf die Geometrie der Kammern abzubilden, Fehler beim Zusammenbau in den Detektortabellen zu korrigieren, den Zeitnullpunkt für alle Kanäle zu bestimmen, die Relation zwischen Driftzeit und -strecke zu eichen und die Kammerpositionen zu justieren. Die Software für diese Aufgaben war schon in den Vorjahren entwickelt worden. Bereits in den ersten Ergebnissen sind Anzeichen für die erwarteten Verbesserungen von Effizienz und Auflösung des Detektors erkennbar.

Die erste Triggerstufe

Der mehrstufige Trigger von HERA-B dient der effizienten Selektion von Zerfällen schwerer Quarks bei gleichzeitiger Unterdrückung sonstiger Wechselwirkungen um etwa fünf Größenordnungen. Die Identifikation von Leptonen mit hohem Transversalimpuls ist hierbei die entscheidende Signatur, besondere Bedeutung haben die leptonischen Zerfälle von J/ψ -Mesonen.

Abbildung 41 zeigt eine schematische Darstellung des komplexen Trigger- und Datennahmesystems, durch das die Eingangsrate von 10 Millionen Ereignissen pro Sekunde auf etwa 50 archivierte Ereignisse pro Sekunde reduziert wird.

Die Suche nach Elektronen beginnt mit den digitalisierten Informationen des elektromagnetischen Kalorimeters. Neun Kalorimeterzellen werden zu einem Cluster zusammengefasst und, falls dessen transversale Energie über einem Schwellenwert liegt, wird dieser der ersten Triggerstufe („First Level Trigger“ FLT) als Elektronkandidat gemeldet. Für Myonen werden Koinzidenzen in den Pad-Kammern der letzten beiden Superlagen des Myonsystems als Startpunkt benutzt.

Die Vortrigger und der FLT bestehen aus einem Netzwerk von eigens entwickelten Hardwareprozessoren. Aus den Parametern der Kandidaten berechnen die „Track Finding Units“ (TFU) Suchfenster in der Spurkammer vor den Vortriggern. Falls hierin eine Koinzidenz von den getroffenen Drähten in drei Projektionen ($0, \pm 5$ Grad Stereolagen) gefunden wird, werden die Parameter der Kandidaten entsprechend der gefundenen Position verbessert und an die TFUs der zum Target hin nächsten Superlage weitergereicht, andernfalls wird der Kandidat verworfen.

Wird die Suche nach Koinzidenzen bis in die Superlage PC1 erfolgreich fortgesetzt, berechnet die „Track Parameter Unit“ aus den geometrischen Informationen die kinematischen Parameter der Spur. Die „Trigger Decision Unit“ löst einen Trigger aus, wenn die gefundenen Spuren vordefinierte Bedingungen erfüllen. Die erste Triggerstufe verarbeitet etwa 1 Tbit/sec an Informationen von den Spurkammern und kann bis zu 500 Millionen Kandidaten pro Sekunde verfolgen.

Erste Erfahrungen mit diesem Hardwaretrigger sind während der Datennahme im Jahre 2000 gesammelt worden. Es traten Probleme in der optischen Datenübertragung zwischen den Spurkammern und den TFUs auf, die die Inbetriebnahme verzögerten. Die Hardwareprozessoren selbst haben trotz ihrer Komplexität hervorragend funktioniert. Insgesamt war jedoch der zeitliche Aufwand, diesen Trigger zu konfigurieren und das Verhalten zu verstehen, größer als vorhergesehen. Die Inbetriebnahme konnte deshalb damals nicht abgeschlossen werden.

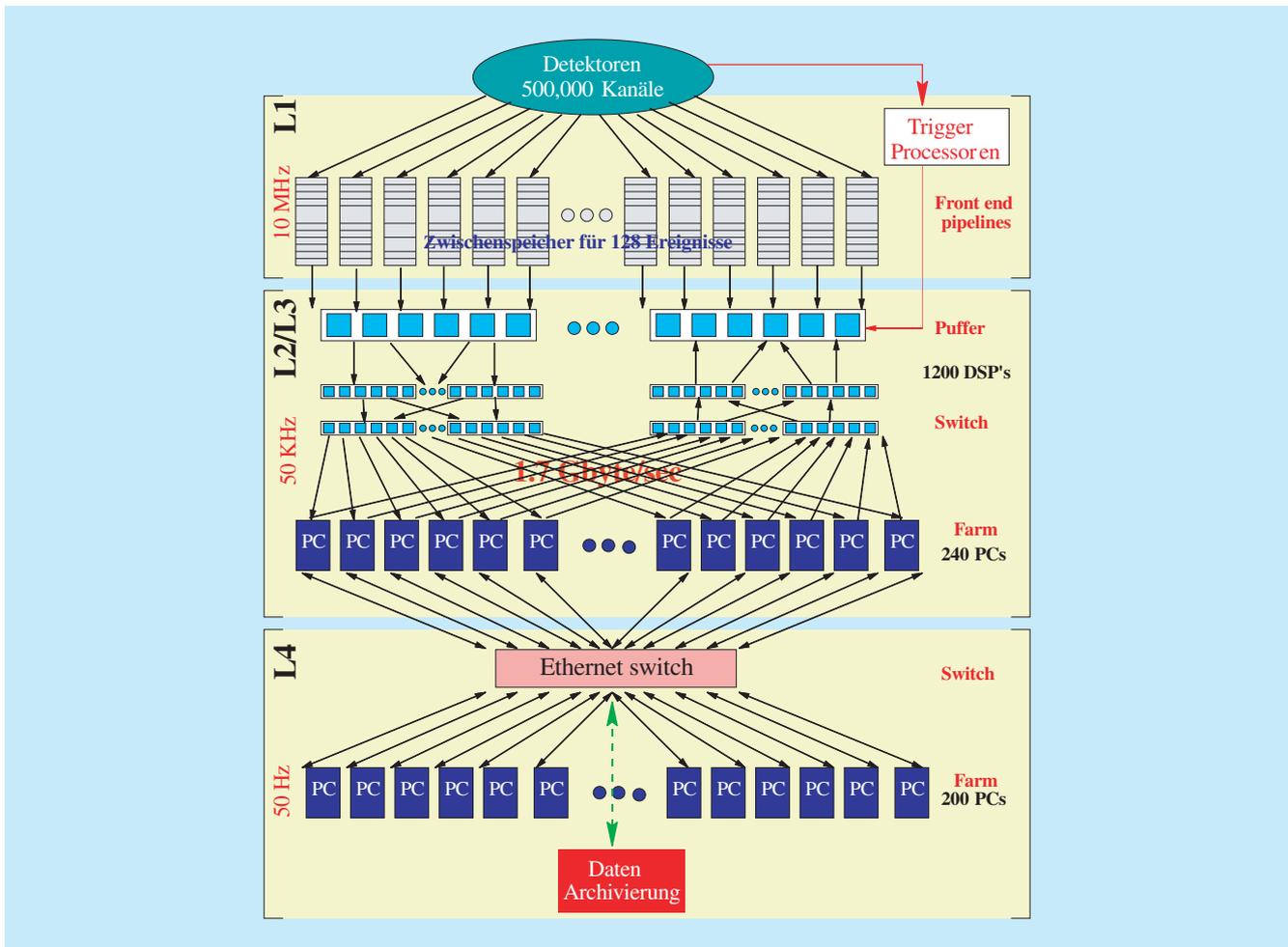


Abbildung 41: Mehrstufiges System zur Datenreduktion und Datenselektion von HERA-B. Das Netzwerk aus etwa 80 Spezialprozessoren der ersten Triggerstufe ist hier nicht ausgeführt.

Im Berichtsjahr wurden die im Jahr 2000 genommenen Daten detailliert untersucht, um die Eigenschaften des FLT zu verstehen und Probleme zu beheben. Durch Vergleich mit aufwendigen Simulationen konnte zum Beispiel im Detail verstanden werden, wie durch die Probleme der Spurkammern die intrinsische Spureffizienz des FLT von 60% auf 18% reduziert wurde. Zwar besteht jede Projektion einer Superlage aus zwei hintereinander liegenden Driftzellen, von denen mindestens eine ansprechen muss, aber geringe Zelleffizienzen und Übertragungsfehler haben im Jahre 2000 zu den beobachteten Verlusten geführt. Durch die bereits beschriebenen Verbesserungen der Spurdetektoren und

der Triggerelektronik werden diese für die kommende Datennahme deutlich kleiner sein. Insgesamt wird eine Myoneffizienz des FLT von 55% erwartet.

In einem so genannten Vektortest wird ein Ereignis in die Hardware des FLT geladen und die Ergebnisse ausgewählter Prozessorstufen werden mit der Simulation verglichen. In allen wesentlichen Punkten hat es hier eine vollständige Übereinstimmung gegeben. Mittels der Simulation kann die komplizierte Hardware also sehr genau beschrieben werden. Dies hilft nicht nur zur Bestimmung von Effizienzen, sondern bedeutet auch, dass das Verhalten der Hardware verstanden ist.

Weitere Verbesserungen an der Software tragen dazu bei, dass der FLT für die kommende Datennahme schnell eingesetzt werden kann. Der Bereich der inneren Spurkammern (Inner Tracker und Myon Pixel System) wird voraussichtlich für den FLT auch im Jahre 2002 nicht zur Verfügung stehen.

Die zweite Triggerstufe

Die zweite Triggerstufe („Second-Level-Trigger“ SLT) besteht aus einer Farm von 240 PCs und greift auf die gesamten Daten des Detektors zu. Ereignisse mit einer Rate von 30–50 kHz können verarbeitet werden. Ausgehend von den Spurparametern des FLT werden zusätzliche Superlagen in den Spurkammern und die Daten des Vertexdetektors benutzt, um falsche Spuren (Geister) zu verwerfen und die Spuren besser zu bestimmen. Hinzu kommt die Möglichkeit, für Spurpaare einen gemeinsamen Vertex zu verlangen und die invariante Masse zu berechnen.

Auch für die kommende Datennahme wird, wie schon im Jahr 2000, die Hauptlast des Triggers beim SLT liegen. Die Effizienz der ersten Triggerstufe (FLT) ist vermutlich nicht hoch genug, um beide Leptonen für die Rekonstruktion von J/ψ -Zerfällen zu identifizieren. Die optimale Zahl an auf Magnetband gespeicherten J/ψ -Ereignissen wird erreicht, wenn ein Lepton mit dem FLT identifiziert wird und der SLT die weitere Rekonstruktion inklusive der Suche nach einem weiteren Lepton übernimmt. Dies bedeutet eine Begrenzung der Wechselwirkungsrate der Protonen auf 5–10 MHz. Bei diesem Verfahren werden alle Spurkandidaten der Vortrigger und die gefundenen Spuren des FLT an den SLT übergeben.

Die zweite Triggerstufe wird deshalb, ähnlich wie im Jahre 2000, ausgehend von den Vortriggern eine eigenständige Spursuche durchführen. Allerdings sind bedeutende Verbesserungen im Berichtszeitraum vorgenommen worden. Hierzu zählen

- ein um einen Faktor 2–3 schnellerer Zugriff auf die Daten des Myonsystems durch eine Reduktion der Datenmenge,
- ein schnellerer Zugriff auf die Daten der äußeren Spurkammern (OTR) durch die Bündelung mehrerer Datenpakete,

- eine Spurverfolgung auch im inneren Bereich des Detektors (Myon Pixel System und ITR), die zuvor nicht existiert hat,
- eine höhere Spureffizienz durch Veränderungen im Algorithmus,
- eine Reduktion der CPU-Zeit durch Verbesserungen in der Suche nach Clustern im ITR und deutliche Verbesserungen bei der Spurverfolgung im Vertexdetektor,
- ein Austausch der 300 MHz und 450 MHz CPUs durch 1300 MHz CPUs,
- eine größere Reduktion an Geisterspuren durch das Auswerten der Driftzeiten im OTR,
- das Ausnutzen der Magnetkammern nahe dem Vertexdetektor zur Reduktion der Suchfenster.

Aufgrund dieser Verbesserungen ist der SLT für die bevorstehende Datennahme sehr flexibel und kann mit unterschiedlichen Eingangsdaten (FLT-Spuren, Vortriggerkandidaten) arbeiten.

Die Verbesserungen der Detektoren und der Triggerkette lassen eine erhebliche Steigerung der Rate registrierter J/ψ -Ereignisse gegenüber dem Jahr 2000 erwarten. Detaillierte Simulationsrechnungen lassen eine Verbesserung um einen Faktor 60 nicht unrealistisch erscheinen.

Die Datennahme

Die digitalisierten Daten der Front-End Elektronik werden in so genannten „Second Level Buffern“ (SLB) für jede positive Entscheidung der ersten Triggerstufe zwischengespeichert. Die zweite Triggerstufe kann auf sämtliche SLBs mittels des SWITCH zugreifen. Letzterer ist wie die SLBs mit SHARC DSP-Prozessoren von AnalogDevices realisiert. Diese Hardware und die entsprechende Software wurden im Jahre 2000 vollständig in Betrieb genommen.

Nach einer positiven SLT-Entscheidung werden die Ereignisse vollständig auf einer weiteren PC Farm (100 Dual-Prozessor PCs) online rekonstruiert und auf Magnetband gespeichert. Diese Farm wurde im Berichtszeitraum auch zur Rekonstruktion der Daten aus dem Jahr 2000 (30 Millionen Ereignisse) benutzt. Dieser

Prozess wurde praktisch vollständig automatisiert, die Daten wurden dreimal mit jeweils verbesserten Konstanten und Algorithmen prozessiert.

Zu Beginn einer Datennahme werden über 2000 Prozesse in etwa zwei Minuten gestartet. Dies hat im Jahr 2000 routinemäßig funktioniert. Die Erfahrung zeigte jedoch, dass solch ein kompliziertes System anfällig gegen Störungen ist. Im Berichtszeitraum wurden deshalb Schwachstellen in der Struktur der Datennahme verbessert. Hierzu zählt die Abhängigkeit vom DESY-Rechenzentrum, dessen Ausfall insbesondere an Wochenenden zu erheblichen Störungen geführt hatte. Die Kommunikation zwischen den gestarteten Prozessen ist durch die Verwendung von „Multiple Threads“ deutlich zuverlässiger geworden, hinzu kommen Verbesserungen in der Bandbreite von allen an der Datenübertragung beteiligten Systemen um einen Faktor 2 sowie größere Zwischenspeicher für das Puffern von Daten.

Physikalische Resultate

Im Berichtszeitraum wurde die Analyse der im Jahr 2000 aufgenommenen Daten fortgesetzt. Es wurden entscheidende Fortschritte in der Auswertung der Daten und im Verständnis des Detektors gemacht.

Die Inbetriebnahme des Detektors und Tests einzelner Detektorkomponenten haben dazu geführt, dass es kaum längere Messperioden unter stabilen Bedingungen gab. Zudem lagen Detektorakzeptanzen und die Leistungsfähigkeit des Triggers weit unter den für das Jahr 2002 zu erwartenden Werten. Infolgedessen waren sowohl die zur Analyse zur Verfügung stehende Statistik als auch generell alle Nachweiswahrscheinlichkeiten klein. Trotzdem wurden einige signifikante Resultate erzielt, deren wichtigste im Folgenden erwähnt werden sollen.

Der Zerfall $J/\psi \rightarrow \ell^+ \ell^-$

J/ψ -Mesonen sind in zweifacher Weise für die hier vorgestellten Analysen interessant: zum einen dienen sie zum Nachweis von B-Mesonen im Zerfall $B \rightarrow J/\psi X$, dann nämlich, wenn sich zwischen Entstehungs- und

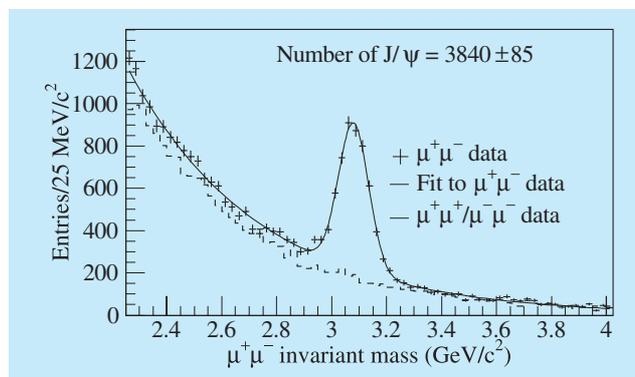


Abbildung 42: Verteilung der invarianten Massen von $\mu^+\mu^-$ -Paaren (Kreuze) mit einem deutlichen Signal für das J/ψ . Die durchgezogene Linie zeigt eine Anpassungsrechnung mit einer Gauß-Funktion für das Signal. Die Form des Untergrundes wird gut durch die Massenverteilungen gleichgeladener Paare ($\mu^+\mu^+$ und $\mu^-\mu^-$) wiedergegeben (gestrichelte Linie).

Zerfallspunkt des J/ψ eine messbare Distanz, die Flugstrecke des B-Mesons, erstreckt. Zum anderen kann durch sie die direkte Produktion von Charmonium in pN-Wechselwirkungen untersucht werden.

Abbildung 42 zeigt das Spektrum der invarianten Masse von $\mu^+\mu^-$ -Paaren. Zur Identifikation der Myonen wurde Information sowohl der Myonkammern als auch des Čerenkovzählers benutzt. Ein deutliches Signal des J/ψ ist zu erkennen. Die Masse ist um 2% kleiner und die Breite um 35% größer als von Monte Carlo-Berechnungen vorhergesagt. Diese Effekte sind der noch nicht perfekten Kalibrierung des Detektors zuzuschreiben. Insgesamt können in diesem Zerfallskanal 3840 ± 85 J/ψ -Mesonen nachgewiesen werden.

Für die Messung des Zerfalls $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ werden Spuren benutzt, bei denen, wie für Elektronen erwartet, der in den Spurkammern gemessene Impuls der Energie entspricht, die im elektromagnetischen Kalorimeter deponiert wird.

Diese Messung wird dadurch kompliziert, dass Elektronen eine hohe Wahrscheinlichkeit haben, vor Erreichen des Kalorimeters einen erheblichen Anteil ihrer Energie durch Bremsstrahlung zu verlieren. Findet die Bremsstrahlung vor dem Magneten statt, so werden Elektron und Bremsstrahlungs-Photon im Magneten

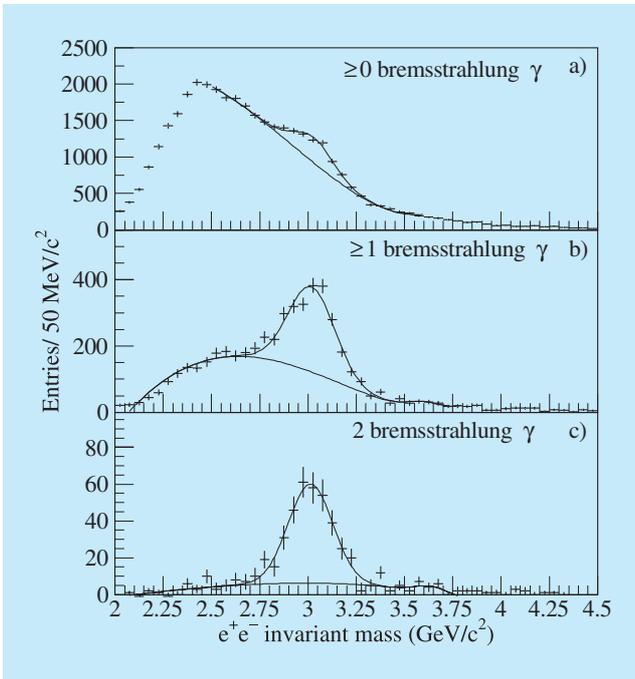


Abbildung 43: Verteilung der invarianten Massen von e^+e^- -Paaren mit einem Signal für das J/ψ . (a) alle Kombinationen von Spuren, die gemäß der Messung im elektromagnetischen Kalorimeter mit der Elektron- bzw. Positronhypothese verträglich sind; (b) für mindestens eine und (c) für beide Spuren wird zusätzlich der Nachweis eines Bremsstrahlungs-Photons verlangt (siehe Text). Die Kurve zeigt das Ergebnis einer Anpassungsrechnung mit einem Polynom für den Untergrund, einer Gauß-Funktion für das J/ψ und einer zweiten Gauß-Funktion für mögliche Beiträge vom ψ' .

separiert und im Kalorimeter getrennt nachgewiesen. Hierdurch ergeben sich zwei Vorteile: zum einen kann die Genauigkeit der Energiemessung des Elektrons erhöht werden, indem man die Energie des Photons hinzuaddiert, zum anderen ist die bloße Anwesenheit eines Bremsstrahlungs-Photons ein starkes Indiz dafür, dass es sich um ein Elektron und nicht um ein anderes geladenes Teilchen handelt.

Die Forderung, dass für eines oder sogar beide Teilchen der e^+e^- -Kombinationen ein Bremsstrahlungs-Photon nachgewiesen werden muss, führt also zu einem schmalen Signal und einem deutlich verbesserten Verhältnis von Signal zu Untergrund, allerdings bei einer erheblich reduzierten Nachweiswahrscheinlichkeit.

Abbildung 43 zeigt die Verteilung der invarianten Masse von e^+e^- -Kombinationen mit den Anforderungen, dass keines, mindestens eins oder jedes der beiden Bremsstrahlungs-Photonen nachgewiesen werden muss. Die Signale für das J/ψ enthalten jeweils 2553 ± 292 , $1420 \pm 70 \pm 48$ und $308 \pm 24 \pm 6$ Ereignisse.

Differentielle Produktionswirkungsquerschnitte für J/ψ -Mesonen

Die rekonstruierten Zerfälle von J/ψ -Mesonen werden dazu benutzt, Eigenschaften ihrer Produktion zu untersuchen; für die hier dargestellte Analyse ist bisher nur der Zerfall $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ benutzt worden. So kann nach Abhängigkeiten vom Targetmaterial gesucht werden, wobei etwa 3000 der J/ψ -Mesonen von einem Kohlenstofftarget und 1000 von einem Titantarget stammen.

Das Transversalimpulsspektrum ist in Abbildung 44 dargestellt, die die gute Übereinstimmung der Ergebnisse von HERA-B mit anderen Experimenten zeigt. Die Daten können gut beschrieben werden durch die Funktion $dN/dp_T^2 = A \cdot (1 + (p_T/p_0)^2)^{-6}$, die es ermöglicht, den mittleren Transversalimpuls $\langle p_T \rangle$ zu berechnen. Die Ergebnisse für die verschiedenen Targets sind $\langle p_T \rangle_C = (1.220 \pm 0.021) \text{ GeV}/c$ und $\langle p_T \rangle_{Ti} = (1.256 \pm 0.036) \text{ GeV}/c$. Größere Statistik ist nötig, um mögliche Unterschiede zwischen verschiedenen Targetmaterialien signifikant nachzuweisen.

Eine ähnliche Situation ergibt sich bei der Untersuchung der x_F Spektren, die in Abbildung 45 dargestellt sind. Die Übereinstimmung mit anderen Experimenten ist gut; signifikante Unterschiede zwischen Kohlenstoff- und Titantarget können noch nicht nachgewiesen werden.

Bemerkenswert ist, dass kein anderes Experiment so kleine Werte von x_F erreichen kann wie HERA-B.

Produktion von χ_c -Mesonen

Produktion von Charmonium in Hadron-Kollisionen ist unter zwei Gesichtspunkten interessant: erstens, um

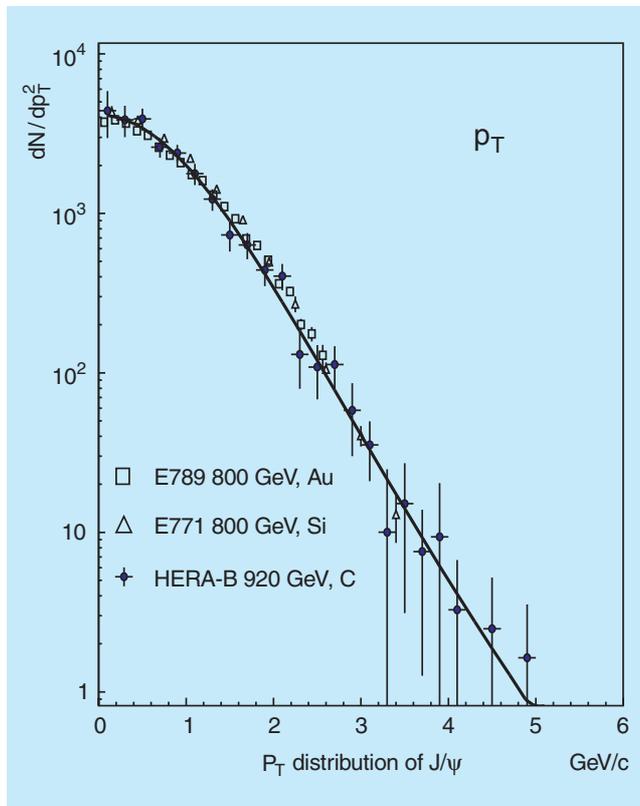


Abbildung 44: Differentieller Wirkungsquerschnitt für J/ψ -Produktion als Funktion des Transversalimpulses. Die Daten von HERA-B sind für Kohlenstoff- und Titan-target zusammengefasst. Die Kurve zeigt das Ergebnis einer Anpassungsrechnung (siehe Text). Die Skala der Abszisse ist willkürlich, da kein totaler Wirkungsquerschnitt bestimmt wurde. Der Vergleich verschiedener Experimente zeigt gute Übereinstimmung.

den Einfluss des Targetmaterials auf den Wirkungsquerschnitt zu untersuchen und zweitens, um den Produktionsmechanismus zu verstehen. Dabei bildet die Bestimmung der relativen Produktionsrate von J/ψ - und χ_c -Mesonen einen besonders sensitiven Test (χ_c steht hier für die Kombination von χ_{c1} und χ_{c2} , die von HERA-B nicht aufgelöst werden können).

Das Colour-Singlet-Modell (CSM) und die nicht-relativistische QCD (NRQCD) sagen unterschiedliche Werte für das Verhältnis

$$R_{\chi_c} = \sigma(\chi_c) \text{Br}(\chi_c \rightarrow J/\psi\gamma) / \sigma(J/\psi)_{\text{tot}}$$

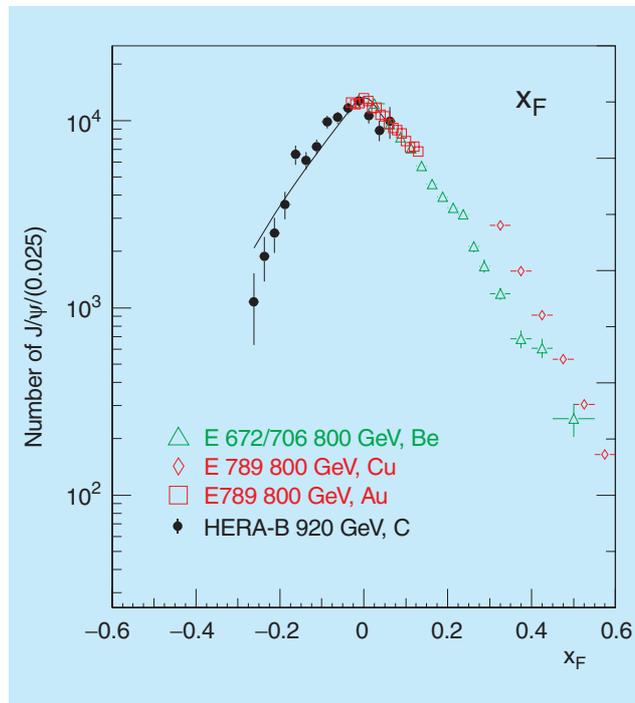


Abbildung 45: Differentieller Wirkungsquerschnitt als Funktion von x_F . Die Kurve zeigt eine Anpassung der Funktion $dN/dx_F = A \cdot (1 - |x_F|)^c$ an die Daten von HERA-B. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit Resultaten anderer Experimente. HERA-B ist das Experiment, das wesentlich zu Messungen bei negativem x_F beiträgt.

voraus, während das Colour-Evaporation-Modell (CEM) verlangt, daß R_{χ_c} unabhängig sowohl von Target- und Strahlmaterial als auch von der Energie ist.

Das Signal für das χ_c wird in der Verteilung der Massendifferenzen $M(J/\psi\gamma) - M(J/\psi)$, $J/\psi \rightarrow \ell^+\ell^-$ gesucht (Abb. 46). Nach Abzug des Untergrundes, der durch Kombinationen bestimmt wird, bei denen J/ψ und γ aus verschiedenen Ereignissen stammen, ergibt sich ein Signal von $(381 \pm 81)\chi_c$ -Ereignissen.

Daraus ergeben sich, aufgeschlüsselt nach Targetmaterial, die Werte $R_{\chi_c} = 0.36 \pm 0.07$ für Kohlenstoff und $R_{\chi_c} = 0.31 \pm 0.11$ für Titan (Abb. 47). Diese Werte unterstützen die Modelle NRQCD und CEM, während CSM nicht mit den Daten verträglich ist.

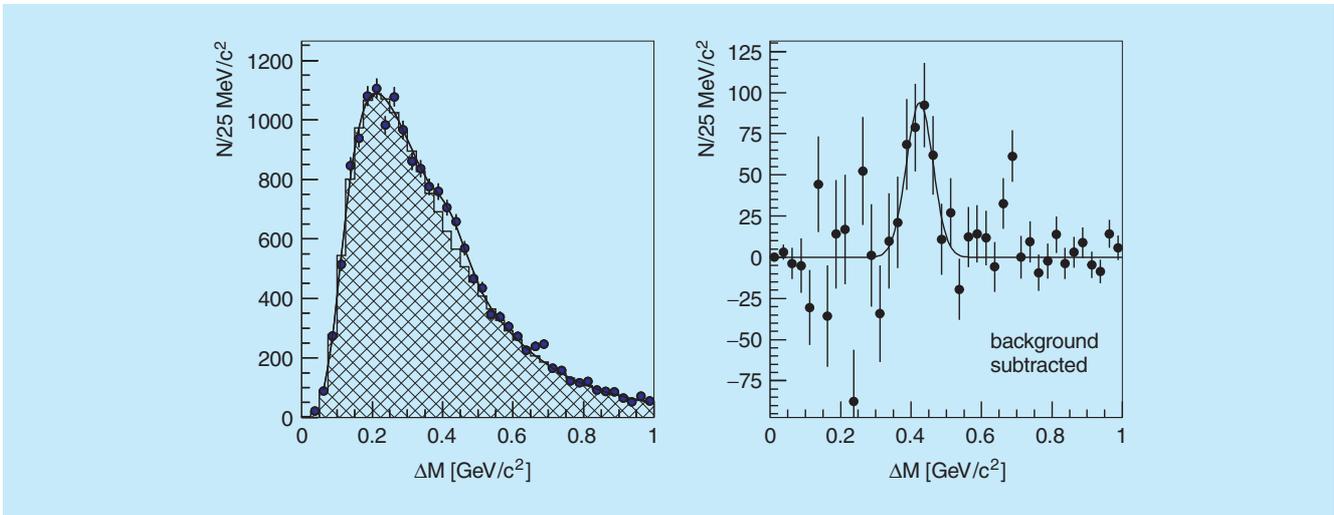


Abbildung 46: Verteilung der Massendifferenzen $M(J/\psi\gamma) - M(J/\psi)$, $J/\psi \rightarrow \ell^+\ell^-$. Links: der Untergrund (schraffiert) ist durch Kombinationen gegeben, in denen J/ψ und γ aus verschiedenen Ereignissen stammen. Rechts: dieselbe Verteilung, der Untergrund ist subtrahiert. Die Kurve zeigt eine Anpassung mit einer Gauß-Funktion.

Die Resultate von HERA-B sind in guter Übereinstimmung mit allen anderen Experimenten außer einem. Trotz der kleinen Statistik trägt HERA-B signifikant zur Kenntnis von R_{χ_c} bei.

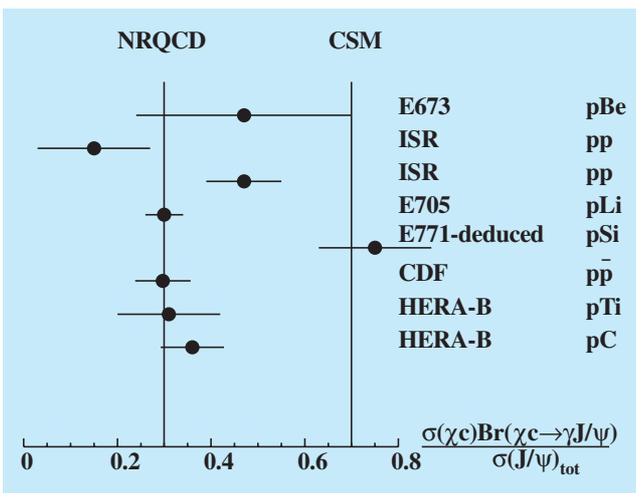


Abbildung 47: Vergleich der Werte für R_{χ_c} von HERA-B und anderen Experimenten. R_{χ_c} ist das Verhältnis zwischen J/ψ s, die aus χ_c -Zerfällen stammen, und allen J/ψ s. Die senkrechten Linien zeigen Modellvorhersagen an: nicht-relativistische QCD und Colour-Singlet-Modell.

$b\bar{b}$ -Wirkungsquerschnitt

Die Untersuchung des Zerfalls $B \rightarrow J/\psi X$, $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ hat wegen der geringen im Jahr 2000 gesammelten Statistik nur begrenzte Signifikanz. Dennoch wurde bereits ein interessantes Resultat erzielt, dessen Unsicherheit mit der älterer Messungen vergleichbar ist. J/ψ -Mesonen, die nicht direkt, sondern beim Zerfall eines B-Mesons produziert werden, haben einen positiven Abstand vom Target, der durch die Flugstrecke des B-Mesons gegeben ist. Daher werden für diese Analyse Ereignisse selektiert, in denen ein rekonstruiertes J/ψ zwar einem Target zugeordnet werden kann, aber in Strahlrichtung einen Abstand Δz von mindestens 5 mm aufweist, so genannte „downstream“-Ereignisse. Zur Untergrundabschätzung werden gleichermaßen „upstream“-Ereignisse mit entsprechendem negativen Abstand untersucht.

Aus dem beobachteten Überschuss von J/ψ -Ereignissen „downstream“ kann durch Extrapolation auf den gesamten Raumwinkel und durch Normalisierung auf den bekannten Wirkungsquerschnitt für prompte J/ψ -Produktion der Wert für den $b\bar{b}$ -Produktionsquerschnitt abgeleitet werden. Das Resultat ist

$$\sigma(b\bar{b}) = (32_{-12}^{+15} \text{ (stat)} \pm 8 \text{ (sys)}) \text{ nb/nucleon} .$$

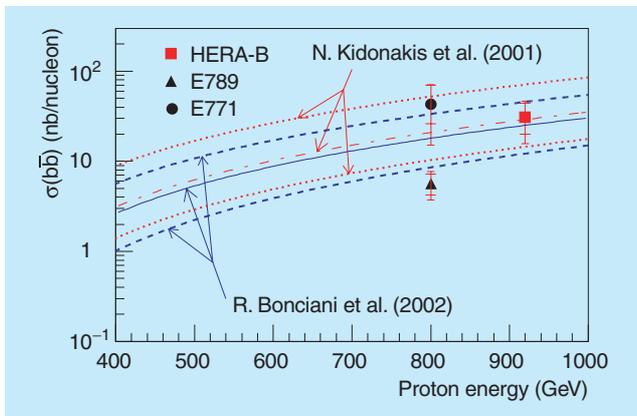


Abbildung 48: Gemessener Wirkungsquerschnitt für $b\bar{b}$ -Erzeugung im Vergleich mit den Werten früherer Experimente (Datenpunkte) und den Erwartungen neuerer theoretischer Rechnungen (Bänder).

Abbildung 48 zeigt den von HERA-B gemessenen Wert im Vergleich mit den Werten früherer Experimente und den Erwartungen neuerer theoretischer Rechnungen.

Mit der in der kommenden Datennahmeperiode zu erwartenden Statistik sollte die erste präzise Messung des B Produktionsquerschnitts in diesem Energiebereich möglich sein.

Zusammenfassung und Ausblick

Das Jahr 2001 wurde während der Umbauphase von HERA erfolgreich für umfangreiche Reparaturen und Optimierungen von HERA-B genutzt. Der Detektor konnte gegen Ende des Jahres in weitaus besserem Zustand als zuvor wieder in Betrieb genommen werden.

Die voraussichtlich verbleibende Messzeit von HERA-B von etwa einem Jahr wird im Wesentlichen für die Untersuchung von QCD und Charmoniumproduktion genutzt. Insbesondere können Wirkungsquerschnitte von Charmonium und B-Mesonen in pN-Wechselwirkungen an verschiedenen Targetmaterialien bestimmt werden. Bemerkenswert ist, dass HERA-B am weitesten in Bereiche von negativem x_F vordringen kann, der für das Verständnis der Charmoniumproduktion von besonderer Bedeutung ist.

Gegenüber der Datennahme des Jahres 2000 sind erhebliche Verbesserungen für physikalische Analysen zu erwarten. Ein insgesamt längerer Datennahmezeitraum mit stabileren Messbedingungen wird die Luminosität vergrößern. Höhere Detektorakzeptanzen und, teilweise dadurch bedingt, höhere Triggereffizienzen werden die Nachweiswahrscheinlichkeiten bei vielen der vorgesehenen Analysen um mehr als eine Größenordnung verbessern.