

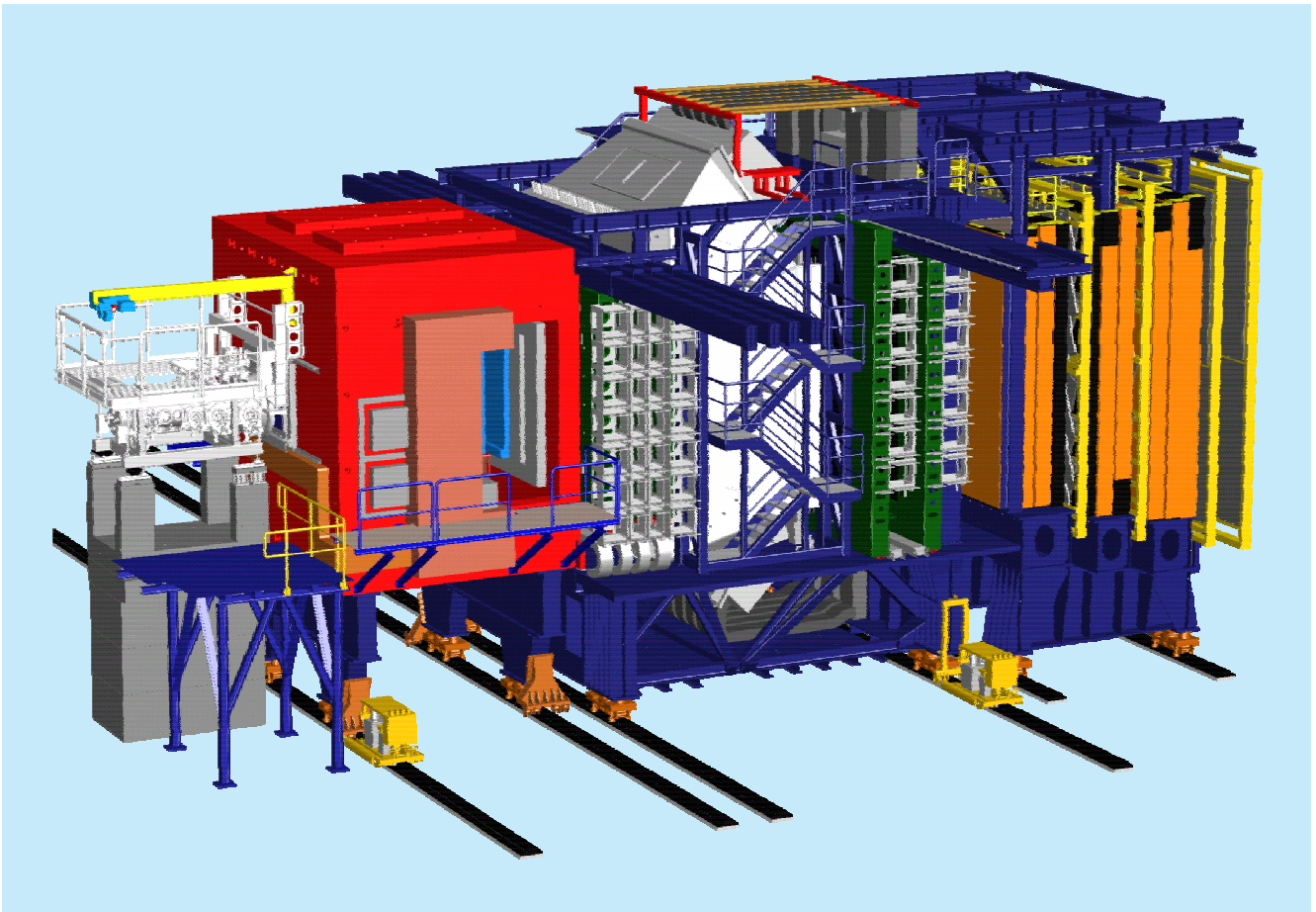


Abbildung 33: Der Detektor HERA-B. Von links nach rechts erkennt man, der Richtung der Protonen folgend, zunächst den konischen Vakuumtank für Target und Vertexdetektor. Darauf folgt der Magnet, dessen Eisenjoch fast würfelförmig ist. Innerhalb des Jochs und rechts davon befinden sich Spurkammern. Hinter dem Treppenaufgang befindet sich der RICH-Detektor, gefolgt von weiteren Spurkammern, dem elektromagnetischen Kalorimeter und den Myon-Kammern einschließlich Eisenabsorber.

HERA-B Experiment

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

Sprecher: A. Schwarz, DESY

Ziel des Experiments HERA-B ist die Untersuchung von Aspekten der Physik von Bottom- und Charm-Quarks. Die wichtigste Aufgabe ist die Messung der CP-Asymmetrie in den Zerfällen von B-Mesonen. Dies stellt einen fundamentalen Beitrag zum Verständnis des Standard-Modells der Hochenergiephysik dar und erlaubt es, nach möglichen Grenzen dieses Modells zu suchen. Weitere Untersuchungsgegenstände sind:

- Oszillationen zwischen B_s -Mesonen und ihren Antiteilchen $\bar{B}_s$,
- seltene leptonische Zerfälle,
- Spektroskopie und Zerfälle von Bottom-Mesonen und -Baryonen,
- Produktion von schweren Quarks im Rahmen der Quantenchromodynamik.

Zu diesem Zweck werden Hadronen mit schweren Quarks durch Wechselwirkungen von Protonen des HERA-Protonenstrahls mit Drahttargets, die in die Randbereiche des Strahls eingeführt werden, erzeugt und in einem Vorwärtsspektrometer mit großer Akzeptanz nachgewiesen. Um die Bottom-Hadronen in einer für die signifikante Messung der Effekte der CP-Verletzung ausreichenden Menge zu produzieren, müssen pro Passieren eines Proton-Pakets (dies geschieht alle 96 nsec, also etwa 10 Millionen mal pro Sekunde) mehrere (etwa 4 bis 5)

Wechselwirkungen mit den Targetdrähten erreicht werden. Unter den vielen Wechselwirkungen sind nur sehr wenige, etwa eine unter einer Million, in denen Hadronen mit einem Bottom-Quark erzeugt werden. Die Rate an erzeugten Bottom-Hadronen beträgt daher etwa 40 pro Sekunde.

Die Anforderungen an das Vorwärtsspektrometer sind daher außerordentlich: alle Detektoren, speziell die Detektoren zur Spurrekonstruktion, müssen eine sehr hohe Strahlungsbelastung aushalten und auch bei Belegungsdichten bis zu 30% eine Spurrekonstruktion ermöglichen. Das Trigger- und Datennahmesystem muss eine extrem hohe Selektivität und Effizienz bieten, um die wenigen interessanten Ereignisse mit Bottom-Hadronen aus der enormen Zahl an Untergrund-Reaktionen herauszufiltern. Die Verhältnisse, denen sich das HERA-B Experiment gegenüberstellt, entsprechen weitgehend denen, die die großen Experimente am Large Hadron Collider (LHC) am CERN in einigen Jahren zu bewältigen haben werden.

Im Jahr 1999 durchlief das HERA-B Experiment eine entscheidende Phase. Auf allen kritischen Gebieten, wie Spurdetektoren im inneren und äußeren Bereich, Datennahmearchitektur, Triggerarchitektur, Datenrekonstruktion und -analyse, wurden entscheidende Durchbrüche erzielt. Durch eine Abfolge von monatlichen, zeitlich auf drei Tage begrenzten Zugängen zur HERA-Wechselwirkungszone konnte

das HERA-B Experiment sukzessive komplettiert werden. In den auf die Zugänge folgenden kurzen Datennahmeperioden wurden die jeweils installierten Detektorkomponenten in Betrieb genommen. Zum jetzigen Zeitpunkt ist das Experiment bis auf einige wenige Kammern des inneren Spurdetektorbereichs komplett installiert.

Die HERA-B Kollaboration bereitet sich nun auf die Datennahme vor mit dem Ziel, im Jahre 2000 genügend Daten für eine signifikante Messung der Verletzung der CP-Symmetrie in Zerfällen von Bottom-Hadronen zu akkumulieren.

Der Detektor HERA-B

Der Detektor HERA-B ist schematisch in Abbildung 33 dargestellt. Er 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 Teilchen-Identifizierung „Ring Imaging Čerenkov“ Zähler (RICH), Übergangsstrahlungsdetektor (TRD) und elektromagnetisches Kalorimeter (ECAL) untergebracht.

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

Das HERA-B Target

Das Target besteht aus acht dünnen Drahtbändern, die um den HERA-Protonenstrahl angeordnet sind. Die ein-

zelnen Targets haben eine typische Abmessung von 500 μm entlang der Strahlachse und 50 μm in radialer Richtung. Zur Zeit sind Drähte aus unterschiedlichen Materialien eingebaut. Damit können Abhängigkeiten der Wechselwirkungsrate vom Targetmaterial untersucht werden. Der gesamte Aufbau befindet sich innerhalb des HERA-B Vertextanks, wenige Zentimeter vor der ersten Lage des Vertexdetektors.

Die Targets werden mit einer Präzisionsmechanik radial in den Randbereich des Protonenstrahls gefahren. Dabei regelt die Targetsteuerung etwa zehnmal pro Sekunde die Targetposition mit einer Schrittweite von 0.1 μm , um die vorgegebene Wechselwirkungsrate konstant zu halten.

Seit mehreren Jahren wird das HERA-B Target kontinuierlich betrieben. Die Datennahme der anderen HERA-Experimente darf nicht beeinträchtigt werden. Dies ist bei stabilen HERA-Betriebsbedingungen auch gewährleistet. Nur eine Komponente des Experiments ZEUS, das „LPS“, hatte im Jahr 1999 Untergrundprobleme, die durch den Betrieb des HERA-B Targets verstärkt wurden. In einer gemeinsamen Anstrengung der HERA-Maschinengruppe und der HERA-Experimente wurden die Untergrundbedingungen und Betriebsparameter intensiv untersucht. Gegen Ende der Runperiode 1999 konnten die LPS-Betriebsbedingungen und damit die Interferenzen mit dem HERA-B Targetbetrieb durch eine Optimierung der HERA-Betriebsparameter und der Neupositionierung des LPS deutlich verbessert werden.

Die kontinuierliche Verbesserung der HERA-Betriebsparameter im Laufe der letzten Jahre hat zur Folge, dass nur noch sehr wenige Protonen den Strahlkern verlassen. Ihre Anzahl ist für den Betrieb des HERA-B Targets nicht ausreichend, deshalb muss das Target die benötigten Protonen aus dem Randbereich des Strahls herausstreuen. Dies führt zu einer sehr großen Empfindlichkeit gegenüber Strahlschwankungen. Bei einer Verschiebung von 10 μm zwischen Target und Strahl ändert sich die Rate um einen Faktor zwei. Um eine stabile Wechselwirkungsrate zu erreichen, wurden in HERA Maßnahmen zur Aufweitung der Strahlränder durchgeführt. Die Herausforderung hierbei besteht darin, den Randbereich mit Protonen zu bevölkern, ohne dabei den für die $e p$ Luminosität wichtigen Strahlkern aufzuweiten.

Die Protonen kreisen in HERA in einzelnen Teilchenpaketen. Vor allem auf der Außenseite des Strahls werden zusätzlich Protonen mit einer Rate von mehreren Megahertz beobachtet, die zwischen den Paketen eintreffen und wegen des unbekannten Wechselwirkungszeitpunktes ein Problem für Trigger und Rekonstruktion darstellen. Bis jetzt gibt es noch kein genaues Verständnis für die Produktion dieses Effekts. Gegen Ende des Jahres 1999 wurde regelmäßig versucht, mit Hilfe eines transversalen Kickermagneten diese Protonen aus der Maschine zu beseitigen. Dies hat erste vielversprechende Ergebnisse geliefert, bedarf aber weiterer Untersuchungen.

Die gleichzeitig stattfindenden Wechselwirkungen müssen möglichst gleichmäßig über mehrere Drähte verteilt werden, damit eine räumliche Trennung und somit eine effektive Rekonstruktion möglich ist. Die Targetsteuerung benutzt hierfür ein Ratensignal, das aus der durch δ -Elektronen entstandenen Ladung im Targetdraht erzeugt wird, die proportional zur Wechselwirkungsrate ist. Mit Hilfe des Vertex-Detektor-Systems kann dann die Verteilung der Wechselwirkungsorte auf den Targets gemessen werden (Abb. 34).

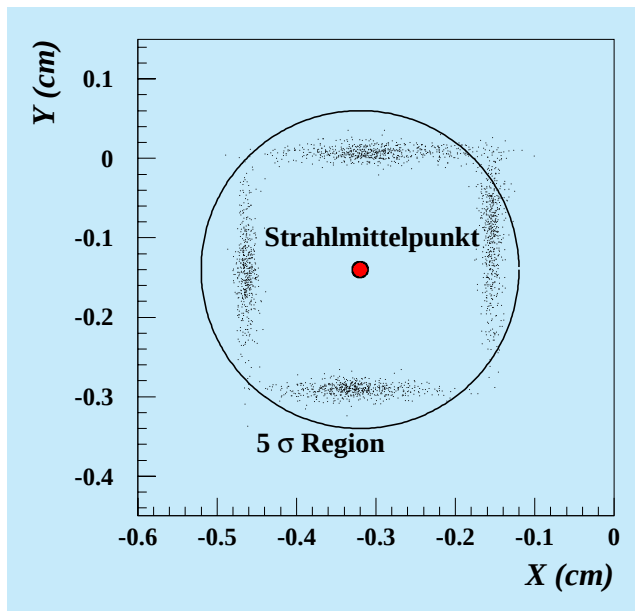


Abbildung 34: Verteilung rekonstruierter Wechselwirkungspunkte in der Ebene senkrecht zum Strahl. Die vier Bänder entsprechen den Targetdrähten; hier waren nur vier Drähte an den Strahl herangeführt.

Das HERA-B Target ist für die Datennahmeperiode im Jahr 2000 voll einsatzbereit. Die wesentlichen Anstrengungen liegen in einer weiteren Verbesserung der Ratenqualität, insbesondere in dem Bestreben, einen standardmäßigen Betrieb bei 40 MHz und damit eine möglichst hohe Effizienz der HERA-B Datennahme zu erreichen. Dies bedarf weiterhin der Unterstützung und engen Zusammenarbeit mit der HERA-Maschinengruppe.

Silizium-Vertex-Detektor

Das Vertex-Detektor-System (VDS) besteht aus doppelseitigen Siliziumstreifenzählern, die mittels Manipulatoren bis auf einen radialen Abstand von 1 cm an die Strahlachse herangefahren werden können. Ihre Aufgabe ist es, Spuren möglichst genau und möglichst dicht an ihrem Entstehungspunkt (Vertex) zu vermessen.

Das VDS lief auch in seinem vierten Jahr zusammen mit all seinen Hilfssystemen, wie Detektorkühlung, gekoppelten Vakuumsystemen usw., störungsfrei. Die zur Kontrolle und Auslese des VDS nötigen Kabel und Lichtwellenleiter wurden vollständig verlegt. Die Infrastruktur, die zum Beladen des Tanks mit Modulen benötigt wird, wurde verfeinert, so dass sicheres und schnelles Be- und Entladen von Modulen möglich ist.

Die Messperiode 1999 wurde zur Inbetriebnahme des VDS genutzt. 56 der 64 Zähler sind eingebaut. Die Prozedur zum Bewegen der Detektoren wurde vereinfacht und automatisiert. Die Kontrolle der Ausleseketten wurde in die standardisierte Datennahmekette von HERA-B eingebunden. Das routinemäßige Alignment des Systems mit Hilfe rekonstruierter Spuren zeigt, dass das System über lange Zeiträume hinweg stabil bleibt. Die Mittelwerte der Verteilungen der Residuen liegen bei unter $5\text{ }\mu\text{m}$, die Standardabweichungen typischerweise bei $30\text{ }\mu\text{m}$. Zu beachten ist, dass bei der Spurselektion im Moment kein Impulsschnitt vorgenommen werden kann.

Die Effizienzen der Detektorebenen wurden mit Hilfe von Spuren bestimmt, die ohne den jeweils untersuchten Detektor rekonstruiert wurden. Typischerweise wurden Effizienzen von knapp 99% erreicht.

Die Programme zur unabhängigen Spurrekonstruktion innerhalb des VDS wurden wesentlich erweitert und

verbessert. Innerhalb der geometrischen Akzeptanz wurden in Monte Carlo-Studien Rekonstruktionseffizienzen von über 95% für Spuren mit einem Impuls über einem GeV erreicht. Die Anzahl der in den Daten gefundenen Spuren stimmt mit den Monte Carlo-Erwartungen innerhalb von 20% überein. Solche Untersuchungen sind aber auf Grund der in den Daten noch fehlenden Impulsinformation nicht sehr präzise. Es wurden weiterhin verbesserte Programme zur Bestimmung von Vertices entwickelt. Die bisher ohne Impulsinformation erreichten Auflösungen von Primärvertices liegen bei $70\text{ }\mu\text{m}$ transversal und $700\text{ }\mu\text{m}$ longitudinal. Abbildung 34 zeigt die Verteilung rekonstruierter Wechselwirkungspunkte.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Inbetriebnahme des Vertex-Detektor-Systems 1999 weitgehend abgeschlossen werden konnte und dass das System den Erwartungen entspricht. Zum Anfang des Jahres 2000 wird das VDS vollständig mit Detektoren bestückt werden.

Innere Spurkammern

Im Berichtsjahr wurde mit der Installation und der Inbetriebnahme des inneren Spurkammersystems begonnen. Es dient zum Nachweis von Spuren dicht am Strahlrohr, einem Bereich, wo wegen hoher Belegungsdichten eine besonders feine Granularität des Detektors gefordert ist.

HERA-B verwendet als erstes Experiment im inneren Spurkammersystem Mikrostreifen-Gasdetektoren (MSGC) mit integrierter Vorverstärkerfolie (GEM). Bezüglich der Strahlenbelastung sind die Detektoranforderungen vergleichbar denen der LHC-Experimente. Nach den im Jahr 1998 gewonnenen Erfahrungen mit MSGC-GEM-Detektoren wurde gegen Ende 1998 mit der Serienproduktion der Detektoren begonnen. Bei ersten Tests der Serienkammern zeigten sich jedoch Alterungsphänomene in Form von Ablagerungen auf den Zähltrafistreifen, die bei Detektoren der Vorserie nicht beobachtet worden waren. Dies führte zu einer Verzögerung der Produktion gegenüber den Planungen, da erneut systematische Untersuchungen durchgeführt wurden, sowohl im Labor mit Röntgenstrahlen als auch bei einem weiteren Strahltest mit Protonen am Paul-Scherrer Institut in Villigen (Schweiz).

Durch diese Messungen konnte bestätigt werden, dass die auftretenden Alterungsphänomene nur bei Serienkammern zu beobachten sind. Bei Kammern der Vorserie trat unter gleichen Bedingungen keine Alterung auf. Eine Untersuchung der Zusammensetzung der Ablagerungen legt die Vermutung nahe, dass die Ursache in Reaktionen des DME (Quencheranteil im Zählgas) mit einem der zum Kammerbau verwendeten Materialien liegt. Dieses Problem konnte durch einen Wechsel des Zählgases von Ar-DME zu Ar-CO₂ gelöst werden. Bei Verwendung von CO₂ im Zählgas können die mit DME beobachteten Ablagerungen vermieden werden.

Aus früheren Untersuchungen mit Mikrostreifen-Gasdetektoren ohne Vorverstärkerfolie war allerdings bekannt, daß Ar-CO₂ gegenüber Ar-DME eine geringere Sicherheit gegenüber Funkenentladungen bietet. Deshalb wurde speziell die Betriebssicherheit bei der Verwendung von Ar-CO₂ untersucht. Nachdem in Untersuchungen geeignete Betriebsparameter gefunden wurden und in Langzeittests keine Gasalterung beobachtet wurde, konnte die Serienproduktion im April wieder aufgenommen werden. Bis Ende des Jahres konnten mehr als die Hälfte aller Detektoren installiert werden.

Parallel zur Installation der Detektoren wurde die Strahlzeit seit dem Sommer 1999 zur Integration des inneren Spurkammersystems in das allgemeine HERA-B Datennahme- und Kontrollsystem genutzt. Auch das Gassystem konnte schrittweise vervollständigt und in Betrieb genommen werden.

Erstmals konnten dabei Betriebserfahrungen mit einem großen MSGC-GEM System unter HERA-B Bedingungen gesammelt werden. Die gesamte Betriebszeit lässt noch keine Aussagen über das Langzeitverhalten der Detektoren zu, jedoch konnten die Hochspannungsfestigkeit und die Sicherheit vor Funkenüberschlägen und damit einhergehenden Zerstörungen der Detektoren bei den geplanten Betriebsparametern gezeigt werden.

Da ein Teil der Detektoren des inneren Spurkammersystems Triggersignale für den „First Level Trigger“ liefern soll, ist auf dem Auslesechip neben dem Analogteil noch eine Triggerlogik eingebaut. Dabei traten Probleme durch Übersprechen auf, die auch nach einer Verbesserung des Auslesechips noch nicht vollständig beseitigt sind. Es wurde daraufhin beschlossen, auf den Beitrag des inneren Spurkammersystems zum „First

Level Trigger“ für die Strahlzeit 2000 zu verzichten. Die Ausleseelektronik der Triggerlagen kann dann in der langen Betriebsunterbrechung zur Luminositätserhöhung umgerüstet werden.

Im Jahr 1999 konnten somit nach anfänglichen Schwierigkeiten die ersten großen Schritte zur Vervollständigung des inneren Spurkammersystems gemacht werden. Im kommenden Jahr wird die Installation des Gesamtsystems abgeschlossen und es können erstmals mit dem Gesamtsystem Daten genommen werden.

Äußere Spurkammern

Das äußere Spurkammersystem von HERA-B dient dem Nachweis geladener Teilchen ab etwa 20 cm Entfernung vom Protonenstrahl bis hin zur äußeren Akzeptanzgrenze des Experiments. Es umfasst insgesamt 13 Messstationen, sogenannte Superlagen, die zwischen Vertexank und Kalorimeter an verschiedenen Positionen senkrecht zum Strahl angeordnet sind. Jede Superlage besteht aus zwei mechanischen Segmenten, die über und unter dem Protonen-Strahlrohr einander überlappen. Jedes Segment hat ein gasdichtes Gehäuse, in dem sich eine variable Zahl ebener Driftkammerlagen befindet. Alle Lagen sind aus etwa 30 cm breiten und 1–4.5 m langen Modulen zusammengesetzt. Ein massiver äußerer Rahmen gibt der Gasbox stabilen Halt.

Nach Abschluss des umfangreichen Messprogramms zur Untersuchung der Strahlungsfestigkeit der Module und der daraus resultierenden Design-Änderungen konnte die 1997 unterbrochene Modulproduktion Ende 1998 wieder aufgenommen werden. Auf 24 Montagevorrichtungen in fünf Instituten (DESY Hamburg und Zeuthen, JINR Dubna, IHEP und Tsinghua-Universität Beijing) entstanden bis Oktober 1999 alle 978 für den äußeren Spurdetektor benötigten Honeycomb-Driftkammermodule. Ein Drittel der Module wurde mit starker Unterstützung durch Fachkräfte aus Russland auf den acht Arbeitsplätzen in Hamburg gebaut.

Die Organisation der weltweit verteilten Modulproduktion und ihre Abstimmung auf die parallel laufende Installation des äußeren Spurdetektors in HERA-B stellte eine logistische Herausforderung beachtlichen Ausmaßes dar. Alle Modulmaterialien, wie zum Beispiel

die bei NIKHEF Amsterdam gefalteten und anschließend industriell metallbeschichteten Folien oder die am IJS Ljubljana gefertigten HV-Platinen, wurden zentral in Hamburg gesammelt und dann an alle Produktionsstätten versandt. Im Gegenzug trafen in einem genau abgestimmten Rhythmus die Module aus Beijing, Dubna und Zeuthen per Flugzeug oder LKW in Hamburg ein.

Vor der Freigabe zur Installation wurde jedes produzierte Modul einer ausführlichen Qualitätsprüfung unterzogen. Jeder einzelne der insgesamt 112 674 Signaldrähte musste im Test mit kosmischer Strahlung oder einer radioaktiven Quelle seine Funktionstüchtigkeit unter Beweis stellen. Die Ausfallrate durch Kurzschlüsse und andere Defekte liegt bei 1.2 %.

Die parallel zur Modulproduktion laufende Montage der Mechanik des äußeren Spurkammersystems nahm 1999 die DESY-Infrastruktur stark in Anspruch: In allen ehemaligen PETRA-Experimentierhallen wurden Teile gelagert oder Gasboxen und Kabelrahmen vormontiert. Die Endmontage der Detektorsegmente erfolgte in der eigens dafür hergerichteten Halle 5, unweit der HERA-Halle West, in der HERA-B betrieben wird. Hier wurden in einem 8 m hohen Staubschutzzelt die einseitig offenen Gasboxen an den Kabelrahmen fixiert, die Module in den Gasboxen installiert und selbige dann gasdicht geschlossen. Abbildung 35 zeigt eine Hälfte der größten Superlage TC2, die sich in HERA-B unmittelbar vor dem Kalorimeter befindet, kurz vor dem Schließen der Gasbox.

Dieses 4 m breite und 6 m hohe Detektorsegment wiegt etwa 3 t, wozu die Kabel von den an der Gasbox aufgesteckten Verstärkern zu den TDCs in den am Rahmen montierten Crates wesentlich beitragen. Die Inbetriebnahme dieser Elektronik bildete den Abschluss der Kammermontage.

Die Installation der äußeren Spurkammern in HERA-B erfolgte während der sechswöchigen HERA-Betriebspause im Mai/Juni sowie in einer Serie von monatlichen, jeweils drei Tage langen Kurzunterbrechungen von Juli bis Dezember. Dank guter Vorbereitung der Infrastruktur (Aufhängungen, Kabel, Gasleitungen) im Mai/Juni und minutiöser Planung gelang es, bis zu fünf Kammerhälften pro Zugangsperiode zu installieren. An dieser Stelle ist die gute Kooperation mit dem DESY-Hallendienst hervorzuheben.

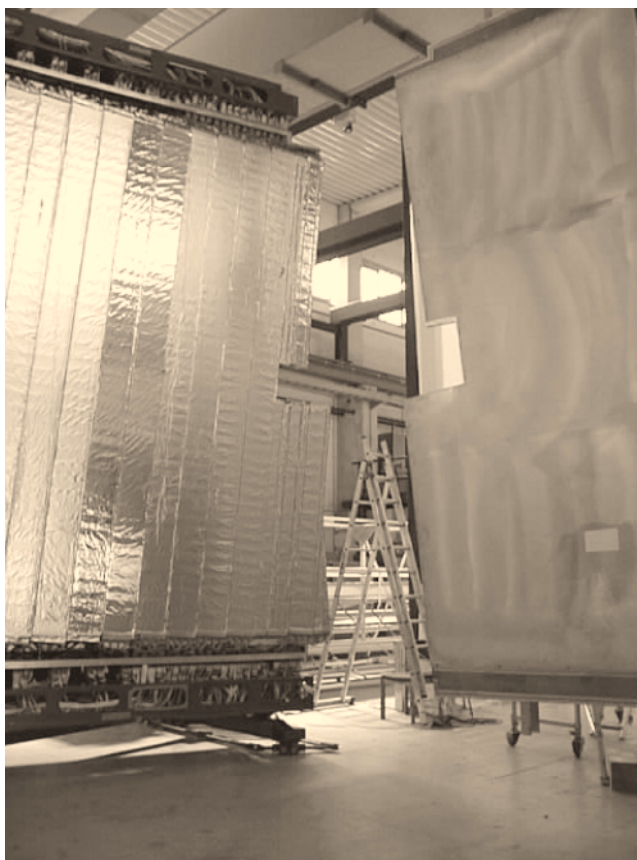


Abbildung 35: Die letzte und größte Superlage des äußeren Spurkammersystems. Die modulare Struktur der äußersten Driftkammerlage ist deutlich zu erkennen.

Wichtige Systeme, die den Betrieb des äußeren Spurkammersystems überhaupt erst ermöglichen, sind die Ausleseelektronik sowie das Hochspannungs- und das Gassystem. Mit seinen 833 auszulesenden TDC-Einheiten ist der äußere Spurdetektor die größte Einzelkomponente im Datennahmesystem von HERA-B. Da er sich über das gesamte Experiment erstreckt und damit auf natürliche Weise alle Subdetektoren miteinander verbindet, lieferte das im Laufe des Jahres rasch wachsende System wichtige Impulse für die Entwicklung der gemeinsamen Datennahme.

Neben den Daten zur präzisen Spurrekonstruktion liefert der äußere Spurdetektor auch die Signale für die erste Triggerstufe von HERA-B. Nach anfänglichen Problemen konnte auch dieser Auslese- und Triggerzweig erfolgreich in Betrieb genommen werden.

Das Hochspannungssystem des äußeren Spurdetektors versorgt 7200 Drahtgruppen aus 160 primären Quellen. Jede frisch installierte Kammer wurde in den ersten Tagen langsam auf ihre Betriebsspannung hochgefahren („trainiert“). Abgesehen von der zuerst eingebauten Kammer, deren Module noch nicht mechanisch versteift waren, ließ sich der gesamte Detektor problemlos in Betrieb nehmen. Die defekte Kammer wurde während der Weihnachtsunterbrechung 1999/2000 repariert. Damit präsentiert sich der äußere Spurdetektor zu Beginn der Datennahme 2000 von der Hochspannungsfestigkeit her in einem guten Zustand.

Während des Betriebs werden die Kammern des äußeren Spurdetektors von einem speziellen Zählgas, einer Argon/ CF_4 / CO_2 -Mischung, durchspült. Das im Laufe des Berichtsjahres aufgebaute Gassystem sorgt dafür, dass das Detektorvolumen von etwa 20 m^3 einmal pro Stunde ausgetauscht wird. Spezielle Reinigungseinheiten und die Zufuhr einiger Prozent Frischgas sorgen in diesem Kreislaufsystem für eine konstant gute Gasqualität. Die extrem störenden Sauerstoff- und Wasseranteile werden damit unter 0.1% gehalten. Zur Entwicklung des Reinigungssystems fanden im Laufe des Jahres ausgiebige Tests an einer im HASYLAB aufgebauten Röntgenquelle statt.

Der 1998 begonnene Test von Prototypkammern im HERA-B Gebiet wurde bis zum Mai 1999 fortgesetzt. Als letzte Testkammer kam im März noch ein Prototyp mit der vollen Länge von 4.5m zum Einsatz, der erstmals von einem Kreislauf-Gassystem versorgt wurde. Das robuste Verhalten aller dieser Kammern führte Mitte 1999 zu der Entscheidung, die bis dahin verfolgte Entwicklung eines auf „Straw Tubes“ basierenden Alternativkonzepts für den äußeren Spurdetektor bis zum Ende der Datennahme im Jahr 2000 ruhen zu lassen. Alle Testkammern wurden im Mai/Juni ausgebaut, um Platz für die Installation des endgültigen Detektors zu schaffen. Dessen schrittweise Inbetriebnahme war der Schwerpunkt bei der Datennahme in der zweiten Jahreshälfte.

Erste Analysen der Daten dienten dazu, die installierte Hardware zu überprüfen. Spezielle Datennahme-Serien wurden dazu benutzt, den optimalen Arbeitspunkt des Detektors (Hochspannung und Elektronikschwellen) festzulegen und das Verhalten bei verschiedenen Targetraten bis zu 80 MHz, dem doppelten Designwert, zu studieren. Viele wertvolle Informationen erhält man

bereits ohne Spurrekonstruktion einfach aus den in verschiedenen Bereichen des Detektors gemessenen Trefferdichten.

Die schon länger existierende und mit Monte Carlo-Daten entwickelte Software zur Spurrekonstruktion wurde an die Bedürfnisse des real existierenden Detektors mit allen seinen kleinen Unzulänglichkeiten, wie tote Regionen, Drähte mit hohem Untergrund usw., angepasst. Die Entwicklung der Programme zur Eichung und zur Justierung des Detektors dauert noch an.

Ring Imaging Čerenkov Zähler

Der „Ring Imaging Čerenkov“ Zähler (RICH) dient zur Unterscheidung von Pionen, Kaonen und Protonen durch die Messung des Winkels von Čerenkov-Photonen. Er war schon im Vorjahr komplett installiert worden und wurde Anfang Januar 1999 das erste Mal mit dem vorgesehenen Radiatorgas C_4F_{10} gefüllt.

Die anschließenden Testmessungen zeigten, dass der HERA-B RICH die beiden wichtigsten Designkriterien, Zahl der nachgewiesenen Čerenkov Photonen und

Winkelauflösung, voll erfüllt: Für $\beta = 1$ Teilchen wurden 34 Photonen pro Ring gemessen, der Fehler in der Winkelbestimmung betrug weniger als 0.7 mrad.

Im Laufe des Jahres wurde in den Zugangsperioden die Verfügbarkeit der Auslesekanäle verbessert, so dass es zur Zeit bei den knapp 27 000 Kanälen nur 0.3% unbenutzbare gibt. Auch wurde ein neuer 1500-Liter-Lagertank mit genauer Füllstandsanzeige für das verflüssigte Radiatorgas installiert.

Der HERA-B RICH, der eigentlich für die Identifikation der Teilchen schon gefundener geladener Spuren konzipiert ist, wurde in der Anfangsphase mangels vorhandener Spurkammern auch zur Spurfindung eingesetzt. Zu diesem Zweck wurde eine Methode zur Suche nach Čerenkov-Ringen entwickelt, die keine Information von anderen Detektorkomponenten benötigt. Da der Ring nur die Richtung des Teilchens festlegt, werden weitere Raumpunkte, wie zum Beispiel Vertexspursegment und Cluster im Kalorimeter, zur Impulsbestimmung benötigt. Abbildung 36 zeigt die Korrelation zwischen Čerenkov-Winkel θ_C und Teilchenimpuls p für Spuren, die ein Vertexsegment, RICH-Ring und ECAL-Cluster aufweisen. Die Teilchensorten Elektron, Pion, Kaon und Proton sind bei dieser Darstellung als klare Bänder erkennbar.

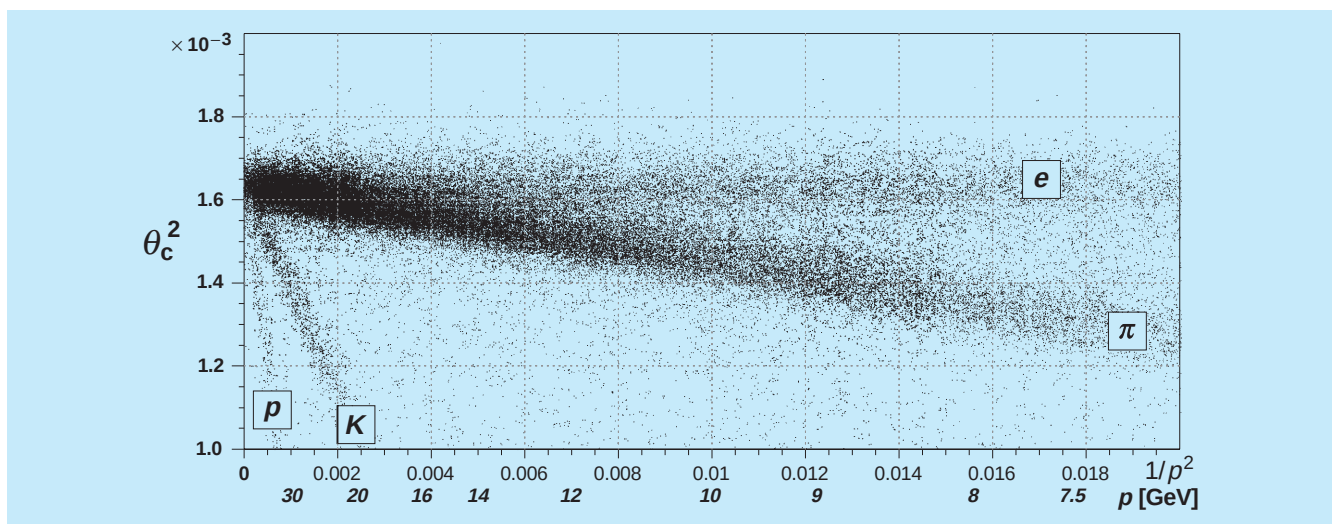


Abbildung 36: Quadrat des Čerenkov-Winkels als Funktion des reziproken Impulsquadrates, gemessen mit Hilfe des Silizium-Vertex-Detektors, des RICH und des Kalorimeters. Da Winkel und Impuls der Relation $1/p^2 \sim \theta_C^2$ genügen, sind die Teilchensorten Elektron, Pion, Kaon und Proton bei dieser Darstellung als klare Bänder identifizierbar.

Zusammen mit Information von anderen Detektorkomponenten konnten auch einige Signale für Teilchenzerfälle beobachtet werden, zum Beispiel $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ (Abb. 39) und $K^{0*} \rightarrow \pi^-K^+$. Der Untergrund im Kanal $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ konnte mit Hilfe der Information vom RICH erheblich reduziert werden (Abb. 40).

Die Myon-Kammern

Im Berichtszeitraum wurde die Installation der Myon-Kammern (Abb. 37) beendet. Alle Lagen mit den Tube-, Pad- und Pixel-Kammern, hergestellt im ITEP Moskau, wurden mit der Ausleseelektronik, produziert in der Wayne State University in Detroit, ausgestattet und auf



Abbildung 37: Installation der Myon-Kammern.

ihren Rahmen in der endgültigen Position montiert. Der Myon-Detektor hat seinen Betrieb aufgenommen.

Nach der Zugangsperiode im Mai/Juni folgte eine lange Periode der Datennahme, während der eine große Zahl von Detektortests und Physikstudien durchgeführt wurde. Alterungsprozesse in den Kammern wurden mit verschiedenen Gasen studiert. Zwei Rekonstruktions-Algorithmen für Myonen wurden getestet: der eine sucht ohne Information von anderen Detektorkomponenten nach Spuren in den Myon-Kammern, der andere basiert auf Spuren, die zuvor in den äußeren und inneren Spurkammern gefunden worden sind.

Ende November wurden zum ersten Mal Daten mit dem teilweise eingebauten Myon-Pretrigger aufgenommen. Der Pretrigger lief bemerkenswert zuverlässig und erste Analyseergebnisse lassen eine gute Funktionalität erwarten.

First Level Trigger

Die erste Auslösestufe („First Level Trigger“ – FLT) rekonstruiert Spuren geladener Teilchen mit Hilfe ausgewählter Spurkammern des Detektors. Die Einbeziehung des elektromagnetischen Detektors und der Myon-Kammern im sogenannten „Pretrigger“ erlaubt bereits eine erste Teilchen-Identifikation. Ferner werden durch die Spurrekonstruktion des FLT der Impuls und die Ladung der Teilchen bestimmt. Die Daten werden ausgelesen, wenn die invariante Masse eines Myonen- oder Elektron-Positron-Paares konsistent mit einem J/ψ ist.

Im Berichtsjahr war das Augenmerk der verschiedenen am FLT beteiligten Gruppen darauf gerichtet, die Produktion der Elektronik-Baugruppen durchzuführen und die Inbetriebnahme des Gesamtsystems soweit voranzutreiben, dass eine Datennahme von HERA-B Anfang 2000 möglich ist. Die letzten Änderungen im Entwurf des FLT wurden erst Anfang 1999 durchgeführt. Dennoch gelang es, die gesamte Hardware, mit Ausnahme eines kleinen Teils der Pretrigger-Systeme, vor Ende des Jahres fertigzustellen.

Die Datenübertragung zwischen dem Myon-Pretrigger-System und der Spurerkennung des FLT wurde auf Zuverlässigkeit getestet. In allen Fällen waren die gemessenen Fehlerraten akzeptabel bis sehr gut. Zusätzlich

wurden weitere technische Parameter, wie zum Beispiel Latenzzeiten, gemessen und mit den Spezifikationen verglichen.

Zusammen mit dem Pretrigger des elektromagnetischen Kalorimeters, das zu 65% mit Pretrigger-Elektronik bestückt war, wurde für das Experiment das erste Mal ein Physiktrigger in Betrieb genommen. Dieser Trigger wurde unter anderem auch für die Datennahme genutzt, in der J/ψ Mesonen nachgewiesen wurden (Abb. 40).

Datennahmesystem

Das HERA-B Datennahmesystem hat die Aufgabe, die etwa 600 000 Signale, die im Detektor HERA-B alle 96 ns erzeugt werden, während der Triggerentscheidungen zu puffern, zwischen den Puffern der verschiedenen Triggerstufen zu transportieren und schließlich auf Massenspeichern zu sichern. Die dazu benötigte Elektronik und deren Programmierung ist das Datennahmesystem (DAQ).

In Abbildung 38 ist eine Übersicht der logischen Einheiten des Systems gegeben. In dieser Darstellung sind nur das „Schnelle Kontrollsystem“, das die Triggersignale verteilt, und der Hauptdatennahmeweg dargestellt. Es gibt acht verschiedene Subsysteme mit zwischen 6000 und 176 000 Auslesekanälen pro Subsystem. Alle Komponenten des Systems wurden 1999 bei der Datennahme betrieben.

Die „First Level Trigger“-Rate war dieses Jahr mit maximal 12 kHz (Endausbaustufe 50 kHz) erstmalig in der Nähe der Designwerte. Der limitierende Faktor war die Notwendigkeit, alle Daten des elektromagnetischen Kalorimeters mit jedem Level 1 Trigger auszulesen. Dies wird in der Endausbaustufe des FLT nicht mehr notwendig sein.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass etwa 90% des Gesamtsystems verwendet worden sind. Der Datendurchsatz hatte bereits die endgültige Größe. Die größte Extrapolation zum Gesamtsystem ist bei der FLT-Rate notwendig. Im Jahr 2000 werden diese Extrapolation und eine Verbesserung der Datennahme-Effizienz im Vordergrund stehen.

Trigger- und Rekonstruktionsfarm

Der Trigger Level 4 dient zur Rekonstruktion aller Ereignisse während der Datennahme („Online-Rekonstruktion“, identisch mit dem Offline-Rekonstruktionsprogramm). Er ist auf einer „Farm“ von 200 Personal Computern (PC) realisiert. Hier wird die endgültige Ereigniseselektion durchgeführt. Gleichzeitig wer-

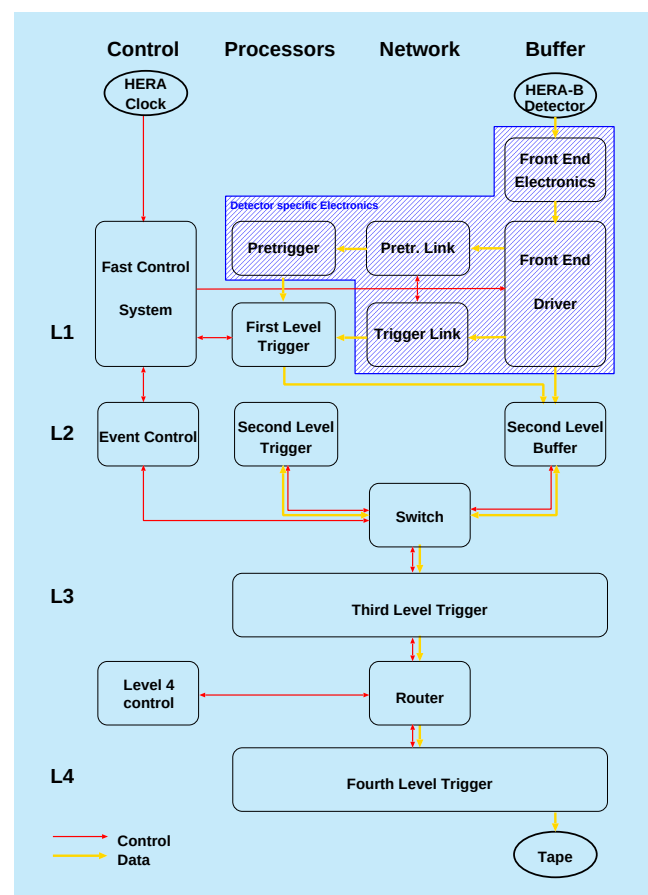


Abbildung 38: HERA-B DAQ-Architektur: Links das Kontrollsystem (gezeigt ist nur das sogenannte schnelle Kontrollsystem, das den Datenfluss kontrolliert und die Trigger-Entscheidungen weitergibt), in der Mitte die jeweiligen Prozessoren und Netzwerke, und rechts der Weg der Daten von der Ausleseelektronik über einen Zwischenspeicher („Second Level Buffer“) zu den weiteren Triggerstufen und schließlich zur endgültigen Archivierung auf Band. Der schattierte Teil umfasst alle Einheiten, die spezifisch für jedes Subsystem sind.

den die Qualität der Daten und die Funktionsfähigkeit des Detektors überwacht. Daten für Kalibration und Alignment des Detektors werden bereitgestellt. Wenn die Datennahme ruht, können vorher gemessene Daten reprozessiert werden.

Die Installation der kompletten Farm von Personal Computern war bis Ende 1999 abgeschlossen. Die PCs werden mit dem Betriebssystem LINUX betrieben. Software für die Verteilung der Ereignisse vom DAQ-System zu den Farmknoten und von den Farmknoten zur Archivierung ist fertiggestellt und getestet. Software zum Reprozessieren der Ereignisdaten wurde entwickelt, getestet und in Betrieb genommen.

HERA-B hat von Ende 1998 bis jetzt etwa 7 Tera-byte an Daten aufgezeichnet und auf Band gespeichert. Die Farm hat sich als Teil des DAQ- und Triggersystems bewährt. Die Designwerte für die Datenraten zur Farm (50 Hz, 5 MB/sec) und von der Farm zum Archiv (20 Hz, 2 MB/sec) wurden deutlich übertroffen.

Das HERA-B Rahmenprogramm ARTE läuft standardmäßig auf der Farm. Für einige Runs wurde eine vollständige Ereignisrekonstruktion online auf 40 Prozessoren durchgeführt und die Ergebnisse wurden archiviert. Auf Basis der Ereignisrekonstruktion werden auf jedem PC Histogramme zur Überwachung der Datenqualität und zu Kalibrierungs- und Alignmentszwecken gefüllt. Ein zentrales Programm sammelt die Histogramme von den einzelnen PCs und stellt sie zur Auswertung zur Verfügung. Arbeiten an Online-Kalibrierung und Alignment, bei der die auf der Farm eingesammelten Daten ausgewertet und die Datenbanken entsprechend geändert werden, haben begonnen.

Software

Die Daten des Jahres 1999 wurden dazu benutzt, die gesamte Auswertekette der Software für HERA-B zu testen. Dabei standen die Rekonstruktions-Software der verschiedenen Detektorkomponenten und ihr Zusammenspiel im Vordergrund. All diese Programme waren vorher intensiv mit simulierten Daten getestet worden.

Der Übergang von Monte Carlo-Daten zu tatsächlich gemessenen Daten wirft mehrere Probleme auf:

- Die Ansprechwahrscheinlichkeiten einzelner Detektorkanäle können nur ungenau simuliert werden, solange keine Messungen darüber vorliegen. Insbesondere der Ausfall ganzer Bereiche ist nur schwer zu simulieren. Inzwischen existieren Listen, die die gemessenen Nachweiswahrscheinlichkeiten und die vorhandenen toten Bereiche katalogisieren. Diese Listen werden für die Monte Carlo-Simulation der Ereignisse verwendet. Entsprechendes gilt für Untergrund wie elektronisches Rauschen usw. Auch hier ist das Monte Carlo den gemessenen Daten angepasst worden.
- Ein Problem, das speziell den Berichtszeitraum betraf, bestand darin, dass sich der Detektor in kurzen Zeitabständen veränderte, indem immer mehr Detektorkanäle eingebaut wurden. Schon beim Simulieren von Monte Carlo-Ereignissen musste eine Prozedur gefunden werden, die es gestattet, die gleichen generierten Ereignisse für verschiedene Ausbaustufen des Detektors zu verwenden. In der Rekonstruktion wurden anfangs Prozeduren benutzt, die es erlauben, auch ohne die damals nicht vorhandenen Messungen im äußeren und inneren Spurkammersystem Spuren zu erkennen (einschließlich der Messung des Impulses). Zu diesem Zweck wurden Prozeduren entwickelt, die im Vertexdetektor, im RICH, im ECAL und in den Myon-Kammern Spuren zu erkennen vermögen, ohne Information von den jeweils anderen Detektorkomponenten zu benötigen. Gegen Ende des Jahres konnten dann die endgültigen, seit langem existierenden Rekonstruktionsprogramme angewendet werden, die davon ausgehen, dass Spurerkennung im Vertexdetektor oder im äußeren/inneren Spurdetektor stattfindet, was zu einer erheblich höheren Nachweiswahrscheinlichkeit führt. Die so rekonstruierten Spuren werden dann mit der Information von RICH, TRD, ECAL und Myon-System kombiniert.
- Alignments- und Kalibrationsprozeduren lassen sich nur mit gemessenen Daten sinnvoll testen. Die notwendigen Konstanten für Kalibration und Alignment sind inzwischen mit einer Genauigkeit bekannt, die es erlaubt, die endgültige Rekonstruktion durchzuführen. Die Genauigkeit dieser Konstanten wird durch die fast abgeschlossene Vervollständigung des Detektors und durch erhöhte Statistik ständig verbessert. Ein HERA-B spezifisches Problem ist, dass schon auf der Online-Farm die

endgültige Rekonstruktion durchgeführt wird und dass dazu die Alignments- und Kalibrationskonstanten bekannt sein müssen. Diese Konstanten müssen also quasi online bestimmt werden. Die Prozeduren dazu sind die gleichen wie für entsprechende Offline-Prozeduren. Die technischen Voraussetzungen, um diese Konstanten, die auf 200 verschiedenen Farmknoten berechnet werden, zu sammeln, auf eine Datenbank zu schreiben und dann wiederum den 200 Farmknoten zur Verfügung zu stellen, sind gelöst.

Das gesamte Rekonstruktionspaket für HERA-B ist online (Level 4) und offline erfolgreich getestet worden. Der Zeitverbrauch auf der Farm ist momentan noch

um einen Faktor zwei zu hoch. Verbesserungen sind zu erwarten durch weitere Optimierung des Programms, vor allem aber durch einer Reduzierung der Zahl toter Kanäle und durch höhere Messgenauigkeit. Auch die Nachweiswahrscheinlichkeit für Spuren und die Wahrscheinlichkeit, falsche Spuren zu rekonstruieren, die „Ghost-Rate“, hängt stark von der Messeffizienz und -Genauigkeit ab, die beide laufend verbessert werden. Das Rekonstruktionsprogramm verhält sich wie durch Monte-Carlo Simulation erwartet und erlaubt es, sowohl detaillierte Studien der Detektor-Funktionalität als auch physikalische Analysen durchzuführen.

Resultate und Ausblick

Im Verlauf des Jahres 1999 wurden die Möglichkeiten, physikalische Analysen mit HERA-B durchzuführen,

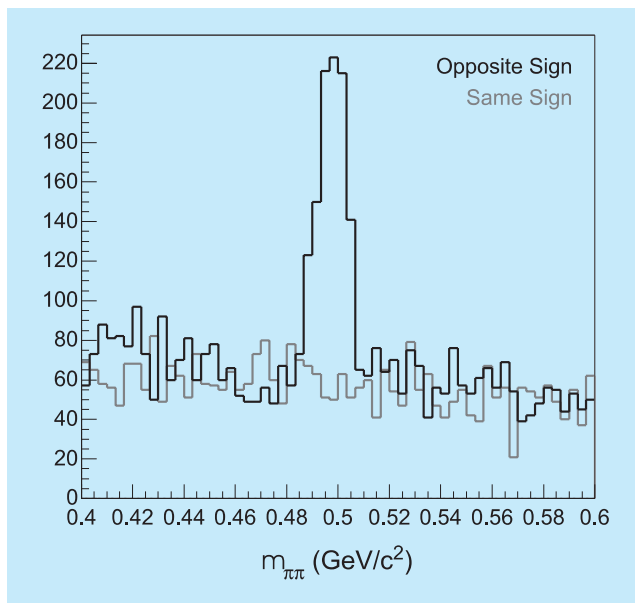


Abbildung 39: Der Zerfall $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$. Gezeigt wird die invariante Masse von $\pi^+\pi^-$ -Kombinationen („Opposite Sign“) und $\pi^+\pi^+/\pi^-\pi^-$ -Kombinationen („Same Sign“). Von den Pionen wurde verlangt, dass sie nicht auf einen der Targetdrähte zeigen und also nicht von der primären Wechselwirkung des Protons mit dem Target kommen können. Andererseits müssen die Pionen aus einem gemeinsamen Vertex kommen, dem potenziellen Zerfallsvertex des K_S^0 . Während bei gleichen Ladungen nur Zufallskombinationen auftreten, die keine Struktur im Massenspektrum ergeben, zeigt sich im Fall von $\pi^+\pi^-$ -Kombinationen ein deutliches Signal bei der Masse des K_S^0 .

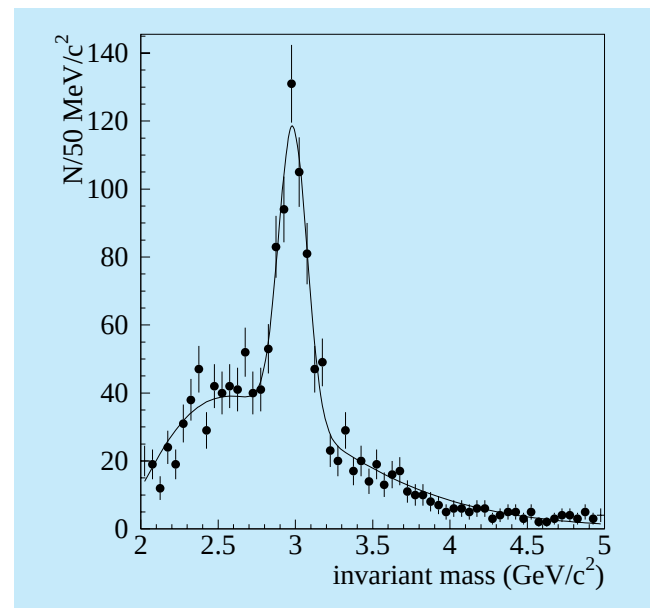


Abbildung 40: Der Zerfall $J/\psi \rightarrow e^+e^-$. Gezeigt wird die invariante Masse von e^+e^- -Kombinationen. Deutlich ist ein Signal bei der Masse des J/ψ zu sehen (bei 3.1 GeV), das auf einem Untergrund von Zufallskombinationen liegt. Dieser Untergrund steigt eigentlich unterhalb von 2.5 GeV extrem stark an. Durch den Trigger werden diese uninteressanten Ereignisse jedoch gleich am Anfang der Datennahmekette zurückgewiesen.

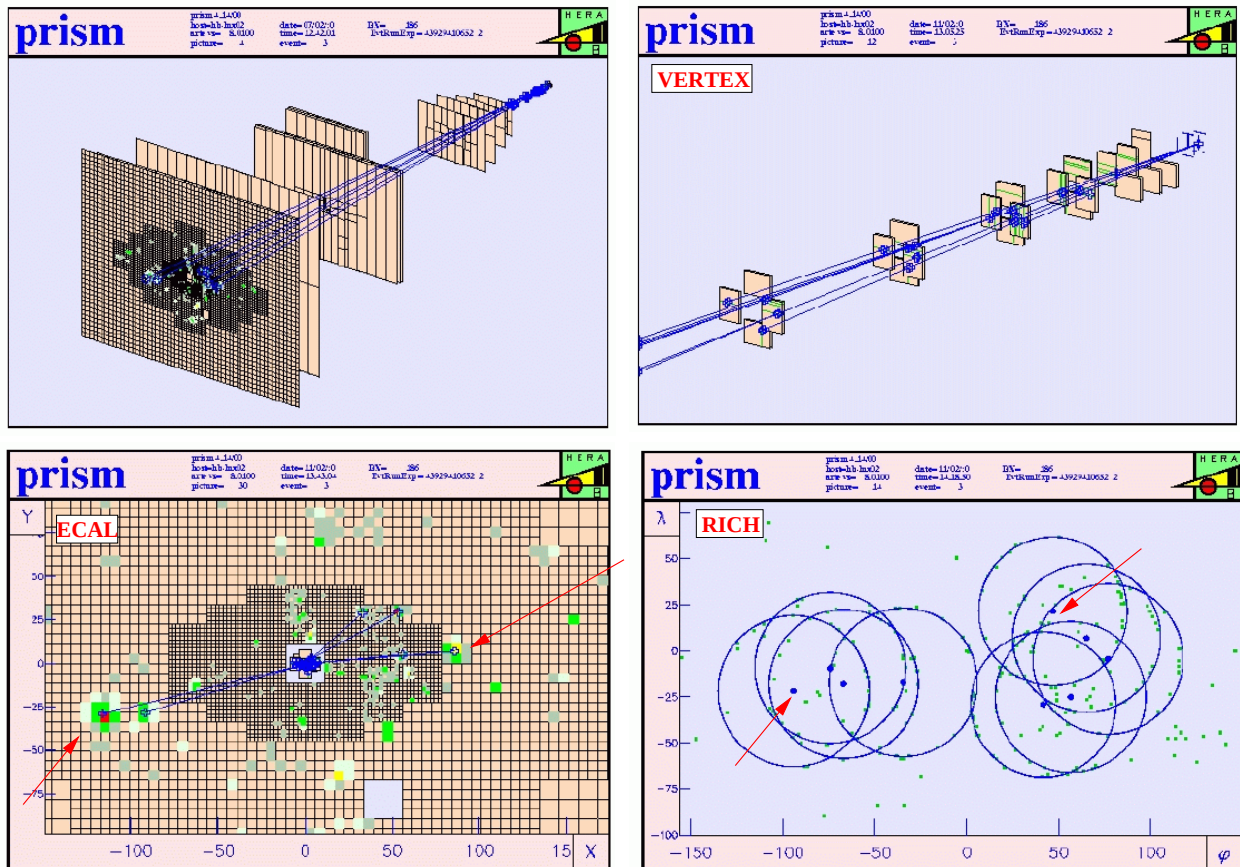


Abbildung 41: HERA-B: Ein einzelnes Ereignis des Zerfalls $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, wobei die Information der verschiedenen Detektorkomponenten separat dargestellt ist. Gezeigt werden die im Vertexdetektor rekonstruierten Spuren, die Blöcke des elektromagnetischen Kalorimeters welche angesprochen haben, sowie die im RICH rekonstruierten Ringe. Die Elektron- bzw. Positron-Spuren sind jeweils gekennzeichnet.

ständig verbessert. Abbildung 39 zeigt ein klares K^0 -Signal in der $\pi^+\pi^-$ Massenverteilung für Spurkombinationen mit einem rekonstruierten Zerfallsvertex. Bei Kombinationen, bei denen beide Spuren vom Targetdraht kommen, ist kein Signal zu beobachten. Für die Analyse sind der Vertexdetektor, RICH und ECAL benutzt worden, jedoch noch nicht die inneren und äußeren Spurkammern.

Ein wesentliches Ziel des Experiments ist es, J/ψ -Mesonen zu rekonstruieren. Die momentan verfügbare Statistik erlaubt es noch nicht, zwischen „promp-

ten“ J/ψ -Mesonen, die in der primären Wechselwirkung entstehen, und solchen aus den Zerfällen von B-Mesonen zu unterscheiden. Das Signal für J/ψ -Mesonen in der invarianten e^+e^- -Massenverteilung hat sich im Lauf des Jahres kontinuierlich verbessert. Ein Beispiel dafür aus einer kurzen Datennahmeperiode im Oktober/November 1999 wird in Abbildung 40 gezeigt.

Die Analyse basiert im Wesentlichen auf dem Vertexdetektor und dem elektromagnetischen Kalorimeter. Auch hier sind die inneren und äußeren Spurkammern

nicht berücksichtigt. Um Untergrund zu unterdrücken wird sowohl ein gut gemessener Ring im Čerenkov-Zähler als auch ein nachgewiesenes Bremsstrahlungs-Photon im ECAL verlangt. In Abbildung 41 ist die Detektorinformation für ein Ereignis mit einem Zerfall $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ dargestellt.

Anfang des Jahres 2000 werden die letzten verbleibenden Zähler eingebaut. In der Messzeit bis September werden folgende Untersuchungen durchgeführt werden:

- Inklusive Wirkungsquerschnitte verschiedener Teilchenarten (γ , π^+ , π^- , π^0 , η , K , K^* , ϕ usw.) und die Abhängigkeit des Wirkungsquerschnitts vom Atomgewicht des Targets,
- Produktion „prompter“ J/ψ -Mesonen, im Unterschied zu J/ψ -Mesonen aus B-Zerfällen,
- Zerfälle $B \rightarrow J/\psi X$ und Messung des Wirkungsquerschnitts von Bottom-Hadronen,
- Zerfälle $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ und Suche nach CP-Verletzung.