

Pedro Waloschek

HERA durchleuchtet das Proton

Der Aufbau der Materie aus vielleicht unteilbaren oder „elementaren“ Teilchen fasziniert die Menschen seit vielen Jahrhunderten. Von den „atomos“ der alten Griechen sind wir nun zu den „Quarks“ gelangt, aus denen die Atomkerne und viele andere der früher als elementar betrachteten Teilchen bestehen. Mit dem Ringbeschleuniger HERA wollen Physiker nun die Quarks noch genauer untersuchen.

Nach siebenjähriger Bauzeit wurde 1991 die weltweit einzigartige „Hadron-Elektron-Ring-Anlage“, HERA, in Hamburg in Betrieb genommen. Sie besteht aus zwei Speicherringen (Abbildung 1), die mit 6,4 km Umfang zu den größten Einrichtungen dieser Art zählen [1]. Etwa 700 Physiker aus aller Welt haben bei HERA zwei riesige Meßapparaturen aufgestellt und untersuchen damit den inneren Aufbau der Protonen genauer als je zuvor. Dabei fahnden sie auch nach neuen oder noch nie beobachteten Vorgängen, die zu einem besseren Verständnis der Grundgesetze der Natur führen können.

Streuxperimente

HERA stellt die neueste Verfeinerung einer Meßmethode dar, die schon 1910 von Lord Ernest Rutherford in Manchester eingeführt wurde. Dabei wird der innere Aufbau kleinster Partikel durch Zusammenstoß mit schnellen Teilchen in sogenannten Streuxperimenten untersucht.

Lord Rutherford hat Atome einer Metallfolie mit α -Teilchen einer radioaktiven Substanz bombardiert und dabei festgestellt, daß die meisten seiner Geschosse die Atome fast unbehindert durchqueren. Nur wenige werden merkbar abgelenkt, und manche prallen nach hinten ab. Daraus folgerte Rutherford, daß die Atome einen relativ kleinen, elektrisch geladenen Kern haben müssen, in dem fast ihre ganze Masse konzentriert ist. Der äußere Teil der Atome besteht aus einer Wolke aus leichten und relativ langsamen Elektronen, die α -Teilchen kaum ablenken konnten. Die Energie der α -Teilchen betrug einige MeV. Für diese Untersuchungen erhielt Rutherford 1908 den Nobelpreis für Chemie.

Höhere Energie beim Zusammenstoß (oder genauer, höherer Impuls im Schwerpunktsy-



stem) entspricht nach der von de Broglie 1924 aufgestellten Beziehung einer kleineren Wellenlänge und dementsprechend auch einer besseren Auflösung – etwa wie in einem Elektronenmikroskop. Deshalb muß man Atomkerne mit Teilchen noch höherer Energie beschießen, um ihr Inneres genauer zu untersuchen. Schon 1964 konnte man am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg mit Elektronen von 6 GeV experimentieren und zwei Jahre später in Stanford (USA) an einem Linearbeschleuniger mit 16-GeV-Elektronen. Es wurden dabei auch Protonen beschossen.

Die berühmten Theoretiker J. Bjorken und R. Feynman haben 1968 aus den Ergebnissen dieser Experimente abgeleitet, daß die hochenergetischen Elektronen nicht nur an den Protonen als Ganzes abprallen, sondern gelegentlich auch an viel kleineren, elektrisch geladenen Teilchen im Inneren des Protons, die man „Partonen“ nannte und die nur einen Teil („a part“) der Masse der Protonen beinhalten. Heute identifiziert man sie mit den Quarks, den Grundbausteinen aller Atomkerne, deren Existenz schon 1964 von M. Gell-Man vorge schlagen wurde. Die Leiter der Stanford-Experimente, J. I. Friedman, H. W. Kendall und

Abb. 1. Blick in den HERA-Tunnel mit dem supraleitenden Speicherring für Protonen (oben) und dem modular aufgebauten Elektronenring (unten). (Foto: Waloschek)

R. E. Taylor, erhielten für ihre wichtigen Beiträge erst 1990 den Physik-Nobelpreis.

Nach 1970 wurden Nukleonen (Protonen und Neutronen) mit Teilchen noch höherer Energie beschossen, und zwar mit Myonen und Neutrinos, aus der Familie der Leptonen (siehe Tabelle 1), die in einigen großen Beschleunigerzentren zur Verfügung stehen. Leptonen sind für die Untersuchung des Inneren der Nukleonen besonders geeignet, weil sie von den starken Kräften, die zwischen den Quarks wirken, nicht direkt beeinflusst werden.

Das Innere der Protonen

Das Ergebnis all dieser Experimente führte zu unserem heutigen Wissen über die Struktur der Nukleonen: Sie bestehen jeweils aus drei sogenannten Valenzquarks, die durch sehr starke Kräfte aneinandergelagert sind. Die Quanten dieser Kraftfelder sind die soge-

nannten „Gluonen“, die, entsprechend der Stärke der Quarkkräfte, in großer Zahl im Proton und im Neutron vorhanden sind.

Auch zwischen den Gluonen wirken die starken Quarkkräfte, wie zwischen den Quarks selbst, und entsprechend werden dabei weitere Gluonen ausgetauscht. Etwa die Hälfte der Gesamtenergie oder der Ruhemasse eines Nukleons steckt in den vielen Gluonen.

Die Farbkraft kann man sich anschaulich etwa wie Gummibänder vorstellen, die die Quarks und Gluonen in einer Art Blase fest aneinander gebunden halten. Die „Gummibänder“ werden gebildet, weil sich auch die Gluonen gegenseitig anziehen und so die Feldlinien beeinflussen. Gluonen verwandeln sich gelegentlich in virtuelle Quark-Antiquark-Paare (Abbildung 2), die man auch als Bestandteile der Nukleonen betrachten muß. Zwischen diesen Teilchen werden wiederum Gluonen ausgetauscht. Durch weitere Wiederholung dieser Vorgänge entstehen schließlich sehr viele Teilchen, die allerdings einem immer kleineren Anteil der Gesamtenergie des Protons entsprechen. Das Nukleon besteht also aus den drei Valenzquarks und aus einem recht komplizierten „See“, in dem viele Gluonen, Quarks und Antiquarks herumschwirren. Sehr schnelle, elektrisch geladene Teilchen, die das Nukleon durchqueren, können auch die virtuellen Quarks und Antiquarks des Sees treffen.

Die Erkenntnis über die innere Struktur der Protonen und Neutronen haben es erlaubt, wichtige Naturvorgänge besser zu verstehen. Wenn zum Beispiel Nukleonen sehr nahe aneinander geraten, wie es in den Atomkernen der Fall ist, dann können zwischen ihnen Quarks, Antiquarks und Gluonen ausgetauscht werden (Abbildung 3). Bei bestimmten Konfigurationen bildet sich so eine anziehende Kraft aus, die für die Entstehung von Atomkernen verantwortlich ist. Es handelt sich um die wohlbekannte Kernkraft, die man heute aus der viel stärkeren Quarkkraft ableiten kann. Es ist dadurch auch klar, daß eine genauere Kenntnis der komplizierten Nukleonblase für zukünftige Entwicklungen auf dem Gebiet der Kernphysik von großer Bedeutung sein kann.

Die meisten Untersuchungen, die zum heutigen Wissensstand über die innere Struktur der Nukleonen beigetragen haben, wurden bei sehr hohen Energien durchgeführt. Man kann die Ergebnisse nicht einfach auf die niedrigen Energien der Atomkerne übertragen. Die Theorie der Quarkkräfte, die Quantenchromodynamik, QCD, muß dafür noch genauer in ihren Details entwickelt werden. Experimente bei hohen Energien, insbesondere bei HERA, sollen hierfür hilfreiche Grundinformationen, speziell über den „See“, liefern.

Beim Beschuß ruhender Protonen mit sehr

viel leichteren Teilchen steigt die Stoßenergie im Schwerpunktsystem nur relativ langsam mit der Energie der Geschosse an. Schon Anfang der siebziger Jahre wurde deshalb in Stanford die Möglichkeit untersucht, Elektronen und Protonen frontal gegeneinander zu schießen [3]. Dabei entstanden Pläne für ein Speicherringssystem, in dem Protonen und Elektronen in entgegengesetzter Richtung umlaufen und an geeigneten Stellen zum Zusammenstoß gebracht werden. Diese Methode war schon 1943 von Rolf Wideröe [4] in Hamburg vorgeschlagen worden, um bei Kernreaktionen gleichzeitig eine hohe Energie und eine genügende Kollisionsrate zu erreichen. Bei jedem Umlauf bekommen die Teilchen nämlich eine neue Chance zum Zusammenstoß.

Wiederum in Hamburg wurde 1972 [5] ein erster, relativ bescheidener Elektron-Proton-Speicherring für das Forschungszentrum DESY vorgeschlagen. Erst 1979/80 ist dann HERA geplant worden [4], mit einem 820-GeV-Protonenring und einem 30-GeV-Elektronenring. Es ist die einzige Maschine, in der diese Art von Zusammenstößen schließlich realisiert wurden. Um die gleiche Schwerpunktsenergie wie in HERA zu erreichen, müßte man ruhende Protonen mit Elektronen von 52 000 GeV beschießen. Und um Elektronen mit unserer heutigen Technologie so hoch zu beschleunigen, müßte man einen 3 000 km langen Linearbeschleuniger bauen.

Tabelle 1. Die Urteilchen der Materie und die vier elementaren Kräfte [2].

Teilchen	Ladung	Generation		
		1.	2.	3.
Quarks	+2/3 -1/3	u-Quarks d-Quark	c-Quark s-Quark	t-Quark b-Quark
Leptonen	-1 0	Elektron e-Neutrino	Myon μ-Neutrino	Tauon τ-Neutrino
Wechselwirkung		„Ladung“	Bindeteilchen	
starke Farbkraft		Farbe	Gluon	
elektromagnetische Kraft		elektrische Ladung	Photon	
schwache Kraft		schwache Ladung	W ⁺ , W ⁻ und Z ⁰	
Gravitation		Masse	Graviton	

Physik mit HERA

Der Zusammenstoß eines Elektrons und eines Quarks ist der interessanteste Elementarprozess bei HERA. Wenn man die beiden Teilchen als abgeschlossenes System betrachtet, kann man den Stoß durch zwei Parameter charakterisieren: den relativen Impulsanteil des Quarks (x), der auch die beim Elementarstoß zur Verfügung stehende Gesamtenergie bestimmt, und der Q²-Wert (er wird oft „Impulsübertrag“ genannt), der das Quadrat der Masse des Teilchens darstellt, das zwischen Quark und Elektron ausgetauscht wurde. Diese Austauscheteilchen sind die Quanten der zwischen den Teilchen wirkenden Kraftfelder. Die in einer bestimmten Reaktion gemessenen Werte von Q² und x sind unabhängig vom benutzten Bezugssystem, was beim Vergleich von Daten verschiedener Experimente besonders nützlich ist. Der kinematische Bereich, der bei HERA untersucht wird, erstreckt sich bis zu sehr hohen Q²-Werten und extrem kleinen x-Werten, bei denen bis

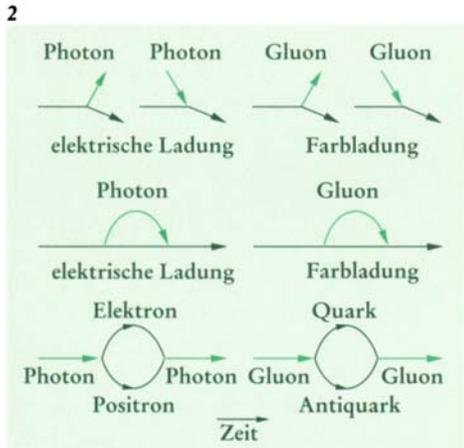


Abb. 2. Darstellung einiger Elementarreaktionen als Feynman-Graphen.

Abb. 3. Schematische Darstellung zweier Nukleonen und der Entstehung der Kernkräfte durch Austausch von Quarks, Antiquarks und Gluonen zwischen zwei Nukleonen. Die Gluonen werden als Doppelbänder (grün) dargestellt, die sich gelegentlich in Quark-Antiquark-Paare verwandeln.

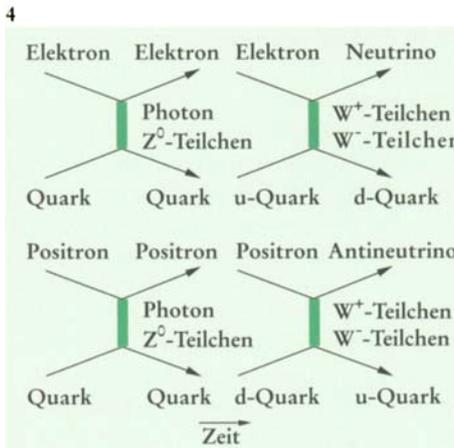
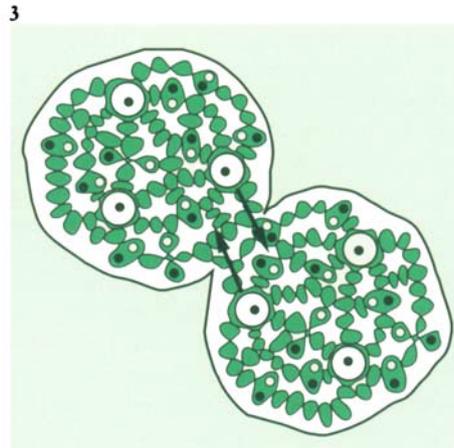


Abb. 4. Feynman-Graphen zu den möglichen Austauschteilchen beim Quark-Elektron-Stoß.

jetzt noch nie geforscht werden konnte. Dementsprechend muß man bei HERA besonders auf Ereignisse achten, die mit unseren heutigen Theorien oder Vorstellungen nicht verstanden werden können.

In erster Näherung treten beim Elektron-Quark-Stoß nur die elektromagnetischen und die schwachen Kräfte auf. Für genügend große Werte von Q^2 (dies entspricht einem fast zentralen Stoß) sind diese Kräfte von vergleichbarer Stärke, und man kann außerdem die Quarks als „freie“ Teilchen im Proton behandeln. Der Austausch von 4 Feldquanten muß also berücksichtigt werden: Photonen, W^+ , W^- und Z^0 -Teilchen (Abbildung 4).

Beim Austausch von Photonen und Z^0 -Teilchen (dies wird als neutrale Ströme bezeichnet) bleiben die Ladungen der beteiligten Teilchen erhalten und ein Rückstoßelektron sollte in den Meßapparaturen beobachtet werden. Der Austausch von W-Teilchen (geladene Ströme) dagegen beinhaltet einen Austausch der elektrischen Ladungen: Das ankommende Elektron verwandelt sich in ein Neutrino und das getroffene u-Quark (Ladung +2/3)

in ein d-Quark (-1/3). Eine entsprechende W-Austauschreaktion mit d-Quarks gibt es nur dann, wenn man mit Positronen anstelle von Elektronen auf das Proton schießt. Das Positron verwandelt sich dabei in ein Antineutrino. HERA und das gesamte Injektions-system sind deshalb auch für Positronen ausgelegt worden. Für die Antiquarks des „Sees“ müssen diese Aussagen, die ja aus der Erhaltung der elektrischen Ladung entstehen, sinngemäß geändert werden.

Das in den W-Austauschreaktionen entstehende Neutrino oder Antineutrino kann nicht direkt beobachtet werden. Es macht sich nur durch die fehlende Energie und den fehlenden Impuls bei den beobachteten Reaktionsprodukten bemerkbar. Die angestoßenen Quarks hingegen sind durch starke Farbkraft an die anderen Bausteine des Protons gebunden. Ein Teil der nun vorhandenen Energie verwandelt sich in zusätzliche Quark-Antiquark-Paare, die sich in Dreiergruppen (Baryonen) oder in Zweiergruppen (Mesonen) verwandeln und schließlich in der ursprünglichen Richtung des Quarks oder Antiquarks als Teilchenbündel oder „Jet“

wegfliegen. Dieser Vorgang heißt „Fragmentation“ und wird im Rahmen des heutigen QCD relativ gut verstanden. Die Jets müssen in den Experimentieranlagen sorgfältig ausgemessen werden.

Nach unserem heutigen Verständnis kann der W-Austausch nur bei besonderen Zuständen der inneren Drehimpulse oder Spins der beteiligten Teilchen stattfinden. Er hängt von der Orientierung der Spins (parallel oder antiparallel zur Fluglinie der Teilchen) ab, was einer Links-Rechts-Asymmetrie der schwachen Kräfte entspricht. HERA bietet eine einzigartige Möglichkeit, dieses Verhalten bei hohen Energien genau zu untersuchen. Elektronen (oder Positronen) werden nach etwa einer Viertelstunde im HERA-Ring durch die Abstrahlung von Photonen (Synchrotronstrahlung) zum Teil vertikal polarisiert. Mit einem Satz besonderer Ablenkmagnete, den Spin-Rotatoren, kann man nun den Spin nach vorne oder nach hinten (zur Flugrichtung) „drehen“. Damit wird es also möglich sein, die Asymmetrie der schwachen Kräfte beim W-Austausch genau zu testen.

Bei der Streuung von Elektronen an Quarks lassen sich noch weitere Effekte untersuchen. Neben den erwähnten W- und Z-Teilchen kann es noch andere Träger der schwachen Kräfte geben, die man einstweilen W' und Z' genannt hat. Solche Austauschteilchen könnten mit HERA erkannt werden, wenn ihre Masse nicht zu hoch ist.

Die Winkelverteilung der elastischen Elektron-Quark-Streuung kann erste Informationen über die Größe der beteiligten Teilchen liefern. Dies wäre ein sensationelles Ergebnis, da nach unseren heutigen Vorstellungen ausgedehnte Objekte eine innere Struktur haben müssen. Und es gibt Theoretiker, die mit dem Aufbau der Quarks und der Leptonen aus noch kleineren Teilchen spekulieren.

Die Streuung des eintreffenden Elektrons mit einem der Valenzquarks des Protons ist nicht der häufigste Vorgang bei den HERA-Energien. Mehrere Prozesse komplizierterer Art (man spricht von „höherer Ordnung“) haben eine vergleichbare oder sogar höhere Rate, insbesondere Kollisionen mit den Quarks oder Antiquarks des Sees und Zusammenstöße zwischen den virtuellen Teilchen, welche die beteiligten Teilchen umgeben oder in die sie sich gelegentlich verwandeln. Einige dieser Reaktionen werden wir hier kurz erwähnen.

Jedes Elektron wird zum Beispiel von einer Wolke virtueller Photonen begleitet (Abbildung 2). Diese kurzlebigen Photonen können im Rahmen der Unbestimmtheitsrelation eine beliebig hohe Masse haben. Viele von ihnen haben aber auch sehr kleine Masse und entsprechen „fast reellen“, also fast masselosen, Photonen. Man kann zum Beispiel zeigen, daß bei einem sehr kleinen Ablenkwinkel des Elektrons die „Masse“ der abgestrahlten Photonen auch sehr klein sein muß. Wechselwirkungen dieser Photonen, sie werden Photoproduktionsprozesse genannt (Abbildung 5), kann man leicht identifizieren. Das Elektron wird dabei ja kaum abgelenkt, verliert aber einen Teil seiner Energie und verläßt den Reaktionsort durch das Strahlrohr. Dort kann man es dann, wegen seines geringeren Impulses, mit Hilfe eines Magnetfeldes aus dem Strahlrohr herauslenken und in geeigneten Zählern nachweisen. Das im Proton zurückgelassene Photon kann an einem der Quarks oder Antiquarks streuen (Photon-Quark Compton-Streuung) oder bei der Wechselwirkung mit einem Gluon Teilchenpaare erzeugen (Photon-Gluon-Fusion). Dabei können auch Quarkpaare höherer Generationen und resonante Quark-Antiquark-Zustände, wie etwa Teilchen der J/psi- oder Ypsilon-Familie, entstehen. Die mit den Elektronen ein-treffenden, fast reellen Photonen können sich gelegentlich auch in Quark-Antiquark-Paare verwandeln, die dann mit den Bausteinen der Protonen stark wechselwirken.

Es gibt Fragestellungen, die sich seit dem ersten Vorschlag zum Bau von HERA etwas verändert haben. So ist zum Beispiel die Suche nach exotischen Teilchen, die von verschiedenen Theorien der Vereinigung der Urkräfte vorausgesagt werden, in dem für HERA zugänglichen Massebereich zu einem großen Teil in der Zwischenzeit schon an anderen Beschleunigern durchgeführt worden, allerdings erfolglos. Die Chancen für HERA

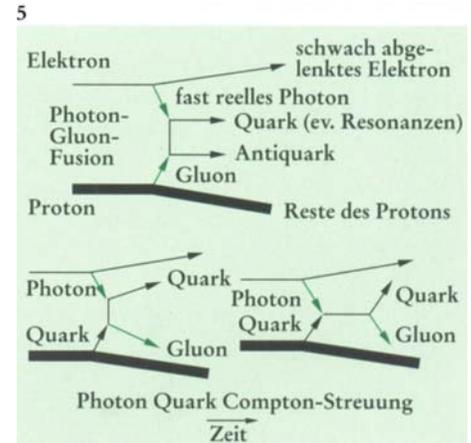
sind also entsprechend gering. Die Top-Quarks und die hypothetischen Higgs-Teilchen sind nach unserer heutigen Kenntnis bei HERA nicht beobachtbar. Offen ist jedoch unter anderem noch die Suche nach sogenannten Leptoquarks, hypothetischen Quark-Lepton-Verbindungen, für deren Erzeugung HERA besonders gut geeignet ist. Sie können nämlich im Elektron-Quark-Stoß einzeln erzeugt werden, während sie an anderen Beschleunigern nur als Teilchen-Antiteilchen-Paare auftreten würden. Entsprechend kann bei HERA ein relativ großes Gebiet möglicher Massen erforscht werden.

Die HERA-Beschleuniger

Die meisten physikalischen Fragestellungen bei HERA ergänzen die Untersuchungen, die an den beiden anderen Hochenergiebeschleunigern der 90er Jahre (Tabelle 2), LEP in Genf (Elektron-Positron-Streuung) und TEVATRON in Chicago (Proton-Antiproton-Streuung), durchgeführt werden können. Anfang 1980 kam man bei DESY zu dem Schluß, daß es möglich ist, einen unterirdischen Ring von 6,4 km Umfang in der Umgebung des DESY-Geländes zu errichten (Abbildungen 6 und 7). Damit waren gleichzeitig die Höchstwerte für die erreichbaren Energien der umlaufenden Teilchen festgelegt. Für Protonen ist diese Grenze durch die maximale Stärke der Ablenkmagnete gegeben und beträgt etwa 820 GeV. Supraleitende Magnete, wie sie damals im Fermilab für den TEVATRON entwickelt wurden, mußten auch bei HERA eingesetzt werden. Für Elektronen dagegen begrenzt der Energieverlust durch Synchrotronstrahlung bei der Beschleunigung in den Kurven die Energie auf etwa 30 GeV. Bei höherer Energie kann man den Teilchen die verlorene Energie in den Beschleunigungsstrecken nicht mehr ersetzen. Für Protonen ist dieser Verlust, auf Grund ihrer hohen Masse, vernachlässigbar klein.

Tabelle 2. Die drei Beschleuniger höchster Energie in den 90er Jahren.

Name	TEVATRON	HERA	LEP
Laboratorium	Fermilab	DESY	GENF
Ort	Chicago	Hamburg	Genf
Ringumfang	6,3 km	6,3 km	27 km
Teilchenart	Proton + Antiproton	Proton + Elektron	Elektron + Positron
Energie	900 + 900 GeV	820 + 30 GeV	50 + 50 GeV (100 + 100 GeV)
in Betrieb seit	1987	1991	1989 (1993)



Das HERA-Projekt [6] wurde in einem Abkommen zwischen der Bundesregierung (Ministerium für Forschung und Technologie) und der Stadt Hamburg nach fast vierjährigen Verhandlungen am 6. April 1984 genehmigt. Schon nach wenigen Wochen konnte mit den Bauarbeiten begonnen werden. Der HERA-Tunnel liegt zwischen 10 und 25 m unter der Erde, und somit ist jede Gefahr durch Strahlung an der Oberfläche so gut wie ausgeschlossen. Die Investitionen betragen insgesamt etwas mehr als eine Milliarde DM. Etwa 15 % davon waren Beiträge ausländischer Institute, meist in Form von Komponenten, die im eigenen Land hergestellt wurden. Italien hatte dabei den größten Anteil und lieferte die Hälfte der supraleitenden Ablenkmagnete. Wichtige Beiträge kamen aber auch aus Frankreich, Kanada, Israel und USA. Physiker, Ingenieure und Techniker aus der Volksrepublik China (50), Polen (40), Großbritannien (3), CSFR (3) und aus der ehemaligen DDR (3) kamen zu DESY und halfen beim Bau von HERA. Der Elektronenring ist schon 1988 zum ersten Mal in Betrieb genommen worden, der Protonenring 1991.

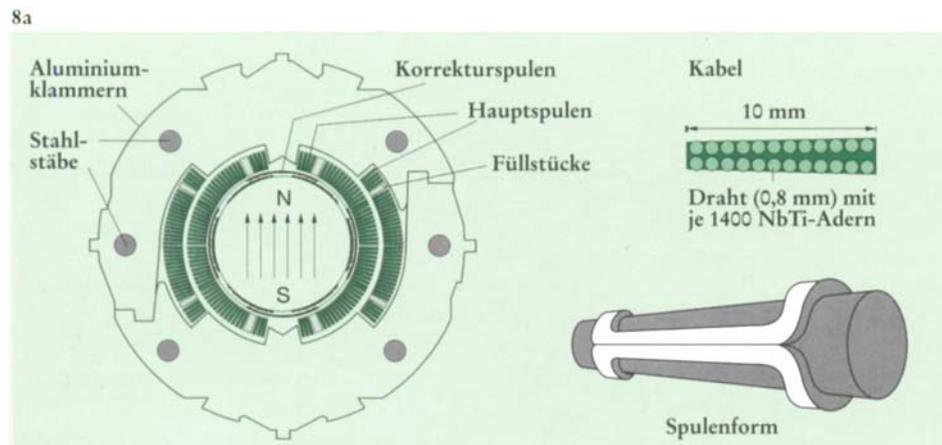
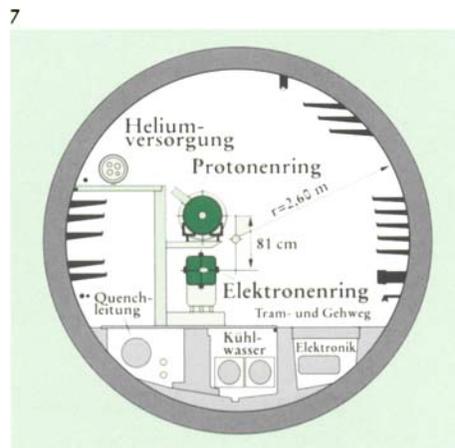
Das Hauptproblem bestand in der Entwicklung und Herstellung der supraleitenden Magnete für den Protonenring. Eisenmagnete sind schon bei 1,8 Tesla in der Sättigung und normalleitende Kupferspulen, die das geforderte Magnetfeld von 4,5 Tesla erreichen könnten (sie hätten über 3 m Durchmesser), kommen aus Kostengründen und wegen ihres hohen Stromverbrauchs nicht in Frage. Der Protonenring enthält außer einigen normalleitenden Magneten 416 jeweils 9 m lange supraleitende Ablenkmagnete, mit denen die Teilchen auf ihrer Ringbahn gehalten werden, und 224 supraleitende Quadrupolmagnete, die den Strahl fokussieren. Die Spulen dieser Magnete sind aus besonderen Kabeln hergestellt, die bei 4,2 K supraleitend werden und,



Abb. 5. Feynman-Graphen einiger Photo-produktionsprozesse beim Elektron-Quark-Stoß.

Abb. 6. Luftbild der Umgebung von DESY, in dem der Verlauf des unterirdischen HERA-Ringes eingezeichnet ist. Das DESY-Gelände und die Injektionsbeschleuniger befinden sich innerhalb des kleineren PETRA-Ringes. (Foto DESY)

Abb. 7. Querschnitt des HERA-Tunnels mit den wichtigsten Komponenten [1].



was hier besonders wichtig ist, diese Eigenschaft auch in Anwesenheit eines Magnetfeldes von 5 Tesla beibehalten.

Schon ab 1979 wurden bei DESY Ablenkmagnete und im Forschungszentrum Saclay (südlich von Paris) Quadrupole in Zusammenarbeit mit Industriefirmen für HERA entwickelt, gebaut und erfolgreich getestet. Sie entsprachen den amerikanischen Vorbil-

dern aus dem Fermilab und dem Brookhaven National Laboratory und waren auch für die industrielle Serienfabrikation geeignet. 1984 wurde ein Zwischentyp vorgeschlagen, der Vorteile beider Bauarten aufweist und als „HERA-Magnettyp“ bekannt wurde (Abbildung 8). Die hiermit gesammelten Erfahrungen betrachtet man heute als wegweisend für zukünftige Anwendungen der Supraleitung und der zugehörigen Kryotechnik. Das Prin-

zip der HERA-Magnete wurde später von den Beschleunigerprojekten LHC bei CERN, Genf, SSC in USA und UNK in der früheren UdSSR übernommen.

Abb. 8. a) Die Spulen der supraleitenden HERA-Magnete [1]. Unten rechts ein Schema der Geometrie der Windungen. Die supraleitenden Niob-Titan-Adern sind in einem Kupferdraht eingebettet. 24 solche Drähte werden als Kabel zusammengefaßt, durch das im Betrieb 4500 A fließen. Die starken Kräfte zwischen den Spulen, sie betragen bis zu 100 kN pro Längensmeter, werden von robusten Aluminiumklammern übernommen. Dabei müssen selbst kleinste Verschiebungen der Windungen vermieden werden, die durch Reibung Wärme erzeugen und somit zum Verlust der Supraleitung führen können („Quench“). b) Schnitt eines supraleitenden Ablenkmagneten des HERA-Protonenringes [1]. Die Kühlung der Magnete erfolgt in einem Rohr, in dem Helium bei atmosphärischem Druck siedet und dabei genau auf 4,2 Kelvin bleibt. Die Ableitung der Wärme aus den anderen Teilen des Magneten an dieses Rohr übernimmt superkritisches Helium, das bei 2,5 bar nicht sieden kann (keine störende Bläschenbildung) und das alle Hohlräume und Ritzen füllt.

eine Testhalle für supraleitende Magnete versorgt. Die Kryoanlage ist die größte, die je in Europa gebaut wurde.

Das Eisenjoch, das als Rückführung für das Magnetfeld dient, kühlt man auch auf 4,2 K ab, was die außen liegende Isolierung erleichtert. Auch das innere Vakuumrohr wird auf 4,2 K gekühlt und wirkt somit als effektive Kryopumpe: Alle noch im Strahlrohr enthaltenen Gase kondensieren an der Oberfläche.

Protonen werden in HERA mit 40 GeV eingeschossen und dann auf (maximal) 820 GeV beschleunigt. Dafür dienen zwei Gruppen von Hochfrequenzsystemen, eines mit 52 und eines mit 208 MHz. Durch geeignete Veränderung ihrer Beschleunigungsspannung lässt sich gleichzeitig die Länge der Teilchenpakete von 90 auf etwa 40 cm verringern, was für die Experimente sehr wichtig ist. Sobald die gewünschte Protonenenergie erreicht ist, dient die Hochfrequenz nur mehr zur Aufrechterhaltung der Paketlänge.

Beim Elektronenring handelt es sich um eine konsequente Weiterentwicklung der schon vorher bei DESY gebauten Elektron-Positron-Speicherringe DORIS (300 m Umfang) und PETRA (2700 m Umfang). Der Aufbau wurde durch eine modulare Technik besonders vereinfacht. Je ein 9 m langer Ablenkmagnet (Abbildungen 1 und 9), ein Quadrupol und die eventuell nötigen weiteren Korrekturlemente wurden auf einem 12 m langen Standardmodul aufgebaut und als Einheit aufgestellt.

Das Hochfrequenz-Beschleunigungssystem des Elektronenringes wurde weitgehend vom Speicherring PETRA übernommen, wo es jetzt nicht mehr benötigt wird. Zusätzlich wurden aber supraleitende Beschleunigungsresonatoren eingebaut (Abbildung 10), die bei DESY entwickelt wurden und ihre Vorteile am Speicherring PETRA schon bewiesen hatten. Man erreicht damit eine höhere Beschleunigungsspannung und geringere Verluste. Sie wurden aus reinem Niobmetall hergestellt, das auch bei 4,2 K supraleitend ist.

Die innere Oberfläche dieser Resonatoren muß extrem rein und glatt sein, was nur durch besonders entwickelte Herstellungsverfahren erreicht werden konnte. In Zusammenarbeit mit Industriefirmen ist es gelungen, 8 jeweils 7 m lange Einheiten zu bauen, die je zwei Gruppen von 4 Beschleunigungszellen enthalten (Abbildung 11).

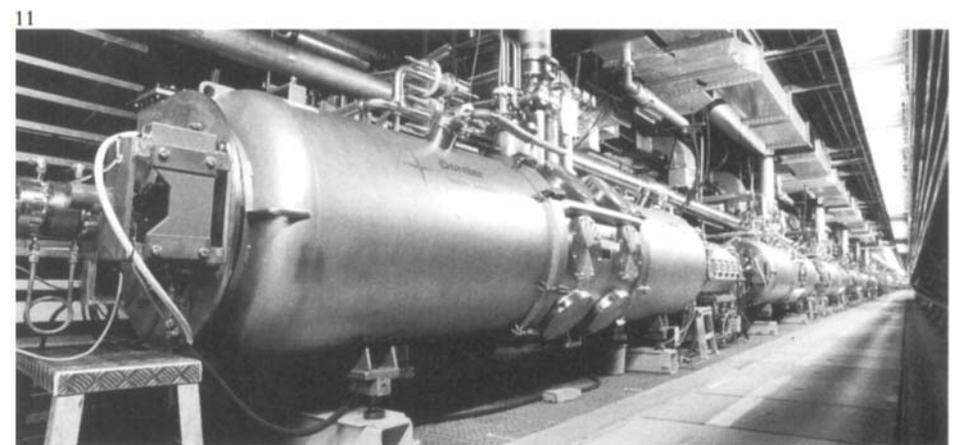
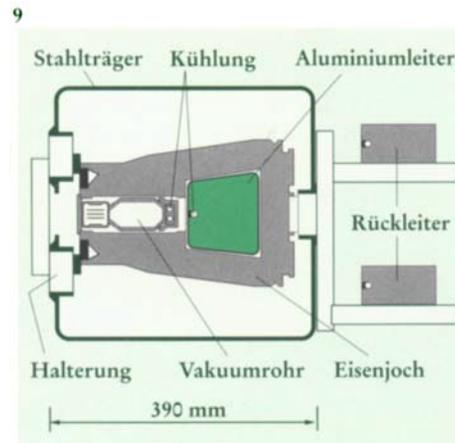
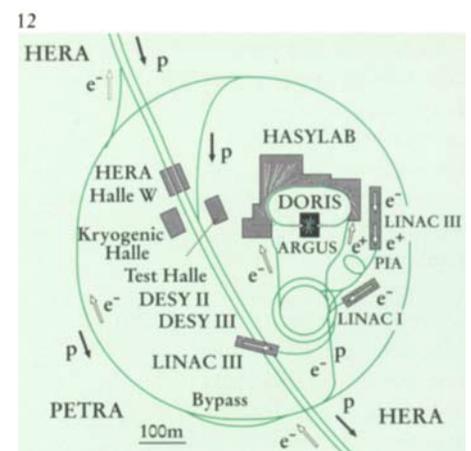


Abb. 9. Schnitt durch einen Ablenkmagneten des Elektronenringes. Ein durchgehender Aluminiumleiter erregt alle Magnete. Das Vakuumrohr wurde aus hartgelöteten Kupferprofilen in einem besonders entwickelten Verfahren hergestellt. Es enthält verteilte Ionen-Getterpumpen und eine Wasserkühlung [1].

Abb. 10. a) Schema einer der supraleitenden Resonatoreinheiten des HERA-Elektronenringes; b) Resonator im DESY-Labor. (Zeichnung: W. Knaut)

Abb. 11. Ansicht der im HERA-Elektronenring betriebenen, supraleitenden Resonatoreinheiten. (Foto: Waloschek)

Abb. 12. Schema der Injektionswege bei DESY [1]. Die beiden HERA-Speicherringe (grün) werden von dem umgebauten PETRA-Ring mit Teilchen versorgt. In PETRA können Elektronen oder Positronen im Uhrzeigersinn von 7 bis auf etwa 13 GeV und in entgegengesetzter Richtung Protonen von 7 bis auf 40 GeV beschleunigt werden. PETRA erhält Elektronen (oder Positronen) vom Synchrotron DESY



II und Protonen vom Synchrotron DESY III. Als Protonenquelle für DESY III wird der neue Linearbeschleuniger LINAC III eingesetzt. Als Elektronen- und Positronenquelle für DESY II dient der Linearbeschleuniger LINAC II. Die Teilchen werden vorher in einem kleinen Zwischenspeicherring PIA für die Injektion aufbereitet. Das umfangreiche Injektionssystem und der Betrieb werden von einem zentralen Kontrollraum mit mehreren großen Rechnern gesteuert.

Die durch Synchrotronstrahlung verursachte Polarisation der Elektronen kann nur dann aufrechterhalten werden, wenn die vielen im Ring normalerweise vorhandenen Depolarisationseffekte möglichst sorgfältig aufgehoben werden. Schon bei ersten Messungen und ohne jede Korrektur wurde festgestellt, daß sich die Elektronen zu 18 % ihre Spins vertikal ausrichten. Es besteht Hoffnung, daß ein hoher Polarisationsgrad von über 60 % erreicht werden kann. Ein Magnetsystem zur Spin-Rotation steht schon bereit, und weitere können relativ kurzfristig bei den Experimenten eingebaut werden. Ein Experiment mit dem Namen „HERMES“ wurde von einer internationalen Kollaboration vorgeschlagen, um mit den polarisierten Elektronen polarisierte Atomkerne zu untersuchen.

Bis auf den Speicherring DORIS werden alle bei DESY vorhandenen Beschleuniger für die Injektion von Teilchen in die HERA-Ringe benutzt (Abbildung 12). Einige Umbauten

waren erforderlich, und ein neuer Linearbeschleuniger (LINAC III) mußte gebaut werden. In Tabelle 3 sind die wichtigsten Parameter von HERA zusammengefaßt.

Die Experimentieranlagen

Zwei große, international zusammengesetzte Teams aus insgesamt 17 Ländern haben je eine Experimentieranlage für HERA vorgeschlagen, entwickelt und aufgebaut. Sie wurden Anfang 1992 in Betrieb genommen. Sie tragen den Namen H1 [7] und ZEUS [8] und haben etwa die Dimensionen eines dreistöckigen Hauses. Die H1-Apparatur, von 350 Wissenschaftlern betrieben, wurde in der HERA-Halle Nord eingebaut und die ZEUS-Anlage, an der 450 Forscher tätig sind, in der Halle Süd. Diese Apparaturen berücksichtigen die Besonderheiten der bei HERA auftretenden Reaktionen (Abbildung 13), insbesondere die Asymmetrie, die sich aus dem hohen Impuls der Protonen ergibt. Die Richtung dieses

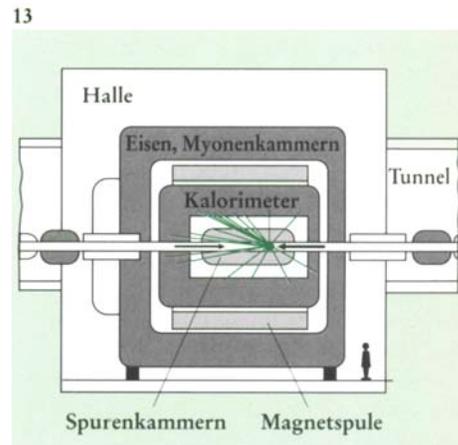


Abb. 13. Prinzipskizze eines HERA-Experiments [1].

Tabelle 3. Wichtigste Parameter des Speicherringsystems HERA.

Umfang/m	6336	
Tunneldurchmesser	5,20	
Tiefe unter der Erde/m	10 bis 25	
Wechselwirkungsorte (möglich)	3	
Kreuzungswinkel	0	
unterirdische Hallen	4	
Größe der Hallen/m ²	25 × 43	
Platz für Experimente/m	11	
Schwerpunktenergie/GeV	314	
Luminosität/cm ⁻² s ⁻¹	1,5 × 10 ³¹	
Die Speicherringe (maximale Sollwerte)	Elektronen	Protonen
Höchstenergie/GeV	30	820
Injektionsenergie/GeV	13	40
Teilchenstrom/mA	60	160
Teilchen pro Paket	3,5 × 10 ¹⁰	10 ¹⁰
Zahl der Pakete	210	210
Abstand zwischen den Paketschwerpunkten/m	28,8	28,8
Länge der Pakete/mm	25	440
Strahlbreite am Wechselw.-Punkt/mm	0,264	0,300
Strahlhöhe am Wechselw.-Punkt/mm	0,017	0,095
Polarisationszeit bei 30 GeV/min	27	–
Energieverlust pro Umlauf/MeV	70,38	1,4 × 10 ⁻¹⁰
Füllzeit/min	15	20
Magnete insgesamt	2009	1833
Hauptablenkmagnete	456	422 (supral.)
Feldstärke/T	0,16	4,68
Hauptquadrupole	605	224 (supral.)
Hochfrequenz-Resonatoren	82 + 16 (supral.)	2 + 4
Frequenz/MHz	500	52/208

Impulses wird oft als „Vorwärtsrichtung“ bezeichnet.

So können zum Beispiel einzelne Teilchen und die beschriebenen Jets bei HERA eine Energie von vielen 100 GeV erreichen. Dabei ist zu beachten, daß jedes Teilchen oder Teilchenbündel von elektrisch neutralen Teilchen begleitet werden kann, die keine Ionisation verursachen und in den üblichen Zählern und Kammern nicht beobachtbar sind. Die bei niedrigeren Energien übliche Bestimmung des Impulses geladener Teilchen aus der Krümmung ihrer Bahn in einem Magnetfeld ist bei den hier auftretenden höheren Energien nicht mehr genau genug. Deshalb wurde im letzten Jahrzehnt eine neue Technik entwickelt, die man „Kalorimetrie“ nennt. Das einfallende Teilchen oder Teilchenbündel trifft dabei auf Materieschichten, in denen es durch Wechselwirkungen verschiedener Art seine Energie möglichst vollständig abgibt. In den Spalten zwischen den Schichten wird die hauptsächlich von den Sekundärteilchen erzeugte Ionisation gemessen. Somit kann die Energie und die Richtung eines Teilchens (selbst wenn es neutral ist) oder eines Teilchenbündels relativ genau bestimmt werden.

Bei Energien von einigen 100 GeV beträgt der relative Meßfehler nur einige Prozent.

Eine gewisse Schwierigkeit ergibt sich aus der unterschiedlichen Entwicklung verschiedener Teile der Sekundärkaskaden in dem Absorbermaterial des Kalorimeters: Elektromagnetische Schauer, die von Photonen, Elektronen oder Positronen stammen, verursachen im allgemeinen einen anderen Ionisierungseffekt als die Sekundärteilchen hadronischer Kaskaden, die sich durch Kernreaktionen entwickeln.

Eine elektromagnetische Komponente bildet sich oft innerhalb einer hadronischen Kaskade durch den Zerfall neutraler Pionen in Photonen. Die somit entstehende Unsicherheit bei der Energiebestimmung kann bis zu einem gewissen Grad rechnerisch berücksichtigt werden. Eine bessere Methode wurde am CERN vorgeschlagen [9]. Man benutzt hierbei als Absorber ein Material mit hohem Atomgewicht, in dem die Hadronen Kernspaltungen hervorrufen. Dabei werden Neutronen von einigen MeV abgestrahlt. Zum Nachweis der Ionisation werden dann wasserstoffreiche Plastiksintillatoren benutzt, in denen die von den Neutronen angestoßenen Protonen den Ionisationseffekt erhöhen. Eine entsprechend gute Energieauflösung erreicht man durch die Wahl der Schichtdicken. Mit Schichten aus Uran (man benutzt hier abgereichertes oder „depleted“ Uran, ein Restmaterial aus der Kernindustrie) und Szintillatormaterial wurden solche Anordnungen erfolgreich betrieben.

Die ZEUS-Gruppe hat ein Kalorimeter aus Uran und Szintillatorplatten in ihre Apparatur eingebaut. Dabei wird eine Genauigkeit bei der Bestimmung der Jet-Energie von 3,5 % bei 100 GeV erreicht (die relative Auflösung ist proportional zu $E_{\text{jet}}^{-1/2}$). H1 wurde für die Identifizierung von Teilchen, besonders von Elektronen, optimiert. Das Kalorimeter dagegen besteht aus Edelstahlplatten und benutzt zum Nachweis der Ionisation flüssiges Argon. Die Genauigkeit der Energiebestimmung beträgt dabei etwa 5,5 % bei 100 GeV. Beide Gruppen haben ihre Kalorimetermodule mit hochenergetischen Strahlen am CERN getestet. Bei beiden beträgt der systematische Fehler zusätzlich etwa 1 bis 2 %, unabhängig von der Energie des Jets.

Obwohl die Kalorimetrie die bei weitem anspruchsvollste Herausforderung für die Experimentalphysiker bei HERA darstellt, ist doch der konventionelle Nachweis von Spu-

14

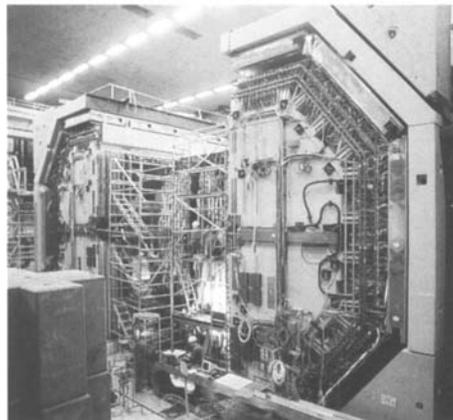


Abb. 14. Die ZEUS-Apparatur. (Foto: Walschek)

ren geladener Teilchen nach wie vor von großer Bedeutung. Die Krümmung der Bahnen von Teilchen relativ niedriger Energie in einem parallel zum Strahl verlaufenden Magnetfeld ergibt ein Maß ihres Transversalimpulses. Zur Identifizierung verschiedener Teilchenarten werden dann noch weitere Vorkehrungen getroffen.

Beide Anlagen haben einen zentralen Detektor, in dem Teilchenspuren sehr genau ausgemessen werden können. Es handelt sich um große zylindrische Drift-Proportionalkammern; sie haben sowohl bei H1 wie bei ZEUS eine Länge von etwa 2,5 m und einen Durchmesser von 1,7 m. Es handelt sich um Driftkammern mit Gas-Driftstrecken verschiedener Form. Die durch Ionisation gebildeten Elektronen wandern in den Driftkammern relativ langsam zu den Nachweisdrähten. Die Impulse auf den Signaldrähten werden mit Hilfe modernster Digitalisieretelektronik möglichst genau registriert. Somit kann auch die Driftzeit mit hoher Präzision bestimmt werden. Eine Ortsauflösung von 0,1 bis 0,2 mm wird erreicht. Die Driftstrecken im Gas betragen bis zu 5 cm.

In der Vorwärtsrichtung werden noch zusätzlich ebene Kammern verschiedener Art eingesetzt. Hier benutzt man zum Beispiel die Übergangsstrahlung, um die Energie sehr schneller Teilchen zu bestimmen. Die ZEUS-Gruppe hat außerdem einen besonders genauen „Vertex-Detektor“ aus Halbleiterelementen um den Wechselwirkungspunkt angeordnet; die H1-Gruppe baut solch einen Detektor erst in der zweiten Ausbaustufe.

Bei ZEUS (Abbildung 14) wird ein Magnet-

15

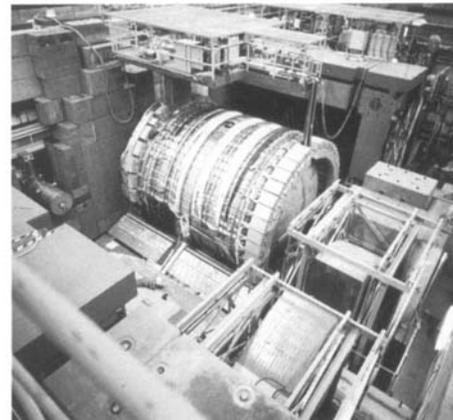


Abb. 15. Die H1-Apparatur. (Foto: M. Schulze-Alex)

feld von 1,8 Tesla von einem Solenoid mit sehr dünner Wandstärke (0,8 Strahlungslängen) und 1,8 m Durchmesser erzeugt; bei H1 (Abbildung 15) ist es ein Feld von nur 1,2 Tesla, jedoch mit einem Durchmesser von 6 m, um ein sehr homogenes Feld im Bereich der Spurenkammern zu erhalten und um die Materieschicht vor dem Kalorimeter zu verringern. Beide Solenoide sind supraleitend. Um den Betrieb der Speicherringe nicht zu stören, mußten supraleitende Kompensationssolenoiden mit entgegengesetztem Feld am Strahl eingebaut werden.

Die Energie von elektromagnetischen Showern wird in einem besonders gestalteten inneren Teil der großen Kalorimeter gemessen. Damit wird es möglich, in Verbindung mit Informationen aus den zentralen Spurenkammern, Elektronen und Photonen zu identifizieren. Auch eventuell vorhandene Myonen spielen bei der Datenanalyse eine wichtige Rolle: Viele instabile Teilchen zerfallen nämlich in Myonen und können somit bei der Rekonstruktion der Ereignisse erkannt werden.

Deshalb wurde das Eisenjoch des Magneten sowohl bei H1 als auch bei ZEUS zur Erkennung der Myonen (nur sie durchdringen das Eisen) mit besonderen Nachweiskammern ausgelegt. Dieser Teil der Detektoren dient auch zur Beobachtung der eventuell auftretenden Restteilchen (Restenergie), die aus dem Kalorimeter doch noch austreten können (sog. „Tail-Catcher“). In Vorwärtsrichtung wurde bei beiden Apparaturen ein magnetisiertes Eisenjoch toroidaler Form angebaut, in dem der Impuls von Myonen oder, bei hoher Energie, deren Ladungsvorzeichen bestimmt werden kann.

Im Normalbetrieb von HERA durchdringen sich die relativ kurzen Elektronen- und Protonenpakete in den Wechselwirkungszonen nach genau 96 ns. Die kurze Zeit zwischen zwei solchen Durchdringungen reicht nicht aus, um die ankommende Information vollständig zu registrieren und über ihre Tauglichkeit zu entscheiden. Die Information wird deshalb in sogenannten Pipelines gespeichert, in denen sie gewissermaßen weiterwandert und somit noch einige Zeit zur Verfügung steht. Speziell programmierte, computerähnliche Schaltkreise können nun genauere Untersuchungen durchführen, wobei ein weiterer Eingang von Information stattfindet. Dabei werden alle digital eingelesenen Signale in mehreren Stufen untersucht, bis schließlich entschieden wird, ob eine möglicherweise brauchbare Reaktion vorliegt. In letzterem Fall werden alle Daten in komprimierter Form an das zentrale Rechenzentrum von DESY weitergeleitet und dort auf Magnetbandkassetten gespeichert. Die Auswertung dieser Bänder geschieht in den beteiligten Instituten.

Seit Ende Mai 1992 werden in HERA Protonen mit 820 GeV gespeichert und mit Elektronen von bis zu 30 GeV zum Zusammenstoß gebracht. Gleichzeitig hat die systematische Aufnahme von Meßdaten begonnen. Die DESY-Mitarbeiter, die den Betrieb von HERA aufrechterhalten, und die 700 an den Experimenten beteiligten Teilchenphysiker werden in den nächsten Jahren ihre Apparaturen rund um die Uhr betreiben, Verbesserungen einbringen, die Daten analysieren und schließlich ihre wissenschaftlichen Ergebnisse veröffentlichen.

Literatur

- [1] P. Waloschek, *Reise ins Innerste der Materie – mit HERA an die Grenzen des Wissens*, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1991.
- [2] P. Waloschek, *Neuere Teilchenphysik – einfach dargestellt*, AULIS-Verlag Deubner, 4. Aufl. Köln 1991.
- [3] C. Pellegrini, J. Rees, B. Richter, M. Schwartz, D. Möhl und A. Sessler, Proc. Intern. Conf. on High Energy Accelerators, CERN, Genf, September 1971.
- [4] R. Wideröe, Anordnung zur Herbeiführung von Kernreaktionen, Patentschrift BRD Nr. 876279 Kl.21g Gr. 36, 8. Sept. 1943, erteilt am 26. März 1953.

[5] H. Gerke, H. Wiedemann, B. Wiik und G. Wolf, DESY-Bericht H-72/22, Hamburg 1972.

[6] Study on the Proton-Electron Storage Ring Project HERA, ECFA Report 80/42; DESY-Bericht HERA 80/81; HERA: A Proposal for a large Electron-Proton Colliding Beam Facility at DESY, DESY-HERA 81/80, Hamburg, Juli 1981.

[7] The ZEUS Collaboration: The ZEUS Detector, Technical Proposal, DESY, Interner Bericht, Hamburg, März 1986.

[8] The H1-Collaboration: „Technical Proposal for the H1 Detector“, DESY, Interner Bericht, Hamburg, März 1986.

[9] C. W. Fabian und W. J. Willis, Phys. Lett. **60B** 105 (1975)

Der Autor:

Pedro Waloschek, geb. 1929, promovierte 1954 in Buenos Aires und wurde 1960 in Bologna habilitiert. Seit 1968 ist er einer der leitenden Wissenschaftler bei DESY in Hamburg. Er ist Autor zahlreicher allgemeinverständlicher Darstellungen zu wissenschaftlichen Themen.

Anschrift:

Prof. Dr. Pedro Waloschek, DESY, Notkestraße 85, W-2000 Hamburg 52.