

WEG WEISER.

Mit HERA
die Zukunft der Physik gestalten



Fünfzehn Jahre lang prallten in dem Teilchenbeschleuniger HERA tief im Hamburger Untergrund Elektronen und Protonen aufeinander. Im Sommer 2007 endete die Datennahme an HERA. Anlass für eine Rückschau auf Deutschlands größtes Forschungsinstrument, das Physikgeschichte schrieb; und einen Ausblick auf das, was HERA noch zu bieten hat. Denn die bis ins nächste Jahrzehnt dauernde Auswertung der Messdaten wird ein umfassendes Gesamtbild des Protons und der darin wirkenden Kräfte offenbaren – in einer Präzision, die über Jahre hinweg von keinem Beschleuniger der Welt übertroffen werden kann.

Beschleuniger | Forschung mit Photonen | [Teilchenphysik](#)

Deutsches Elektronen-Synchrotron
Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft



Blick in den HERA-Tunnel: Unterhalb des Protonenbeschleunigers mit seinen supraleitenden Magneten (beige) verlaufen die normalerweise leitenden Magnete des Elektronenrings.



INHALT.



TEAM WORK

Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile

4

Jedes große Forschungsprojekt ist eine Expedition in unerforschte Welten, und wie jede Expedition kann das Projekt nur gelingen, wenn sich Einzelne engagieren, neue Ideen entwickeln und ihre Mitarbeiter begeistern, sich zusammen mit ihnen auf den Weg zu machen, um die technischen und wissenschaftlichen Herausforderungen zu meistern.

LAUF BAHN

Wie Hamburg zu einer Rennstrecke mit Weltgeltung kam

6

Auf Hamburgs prominentester Rennbahn drehten keine Spitzensportler ihre Runden, sondern Milliarden Teilchen, allesamt noch viel kleiner als ein Atom: Tief im Hamburger Untergrund prallten in einem gigantischen, kreisrunden Teilchenbeschleuniger Elektronen und Protonen bei höchsten Energien aufeinander. Seit 1992 war die Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA bei DESY in Betrieb. Ende Juni 2007 wurde der Forschungsbetrieb beendet und der Beschleuniger abgeschaltet – Anlass für eine Rückschau auf den Werdegang von Deutschlands größtem Forschungsinstrument, auf 15 Jahre bemerkenswerte Forschungserfolge und einen Ausblick auf das, was HERA noch zu bieten hat. Denn die Auswertung der HERA-Messdaten wird die Teilchenphysiker noch weit über 2010 hinaus in Atem halten.

MIKRO LABOR

Haushohe Nachweisgeräte und das kleinste Labor der Welt

10

Der 6,3 Kilometer lange Speicherring HERA bei DESY ist der einzige weltweit, in dem unterschiedliche Teilchensorten – Protonen und Elektronen, bzw. ihre Antiteilchen, die Positronen – getrennt beschleunigt und zum Zusammenstoß gebracht wurden. In solchen Elektron-Proton-Kollisionen fungiert das Proton als Mikrolabor, in dem sich die unterschiedlichsten Fragestellungen der Teilchenphysik gezielt untersuchen lassen. Als Super-Elektronenmikroskop ermöglicht HERA den Physikern dabei den weltweit schärfsten Blick ins Proton. So können sie mit Hilfe der HERA-Experimente den inneren Aufbau des Protons und die fundamentalen Naturkräfte genau erforschen.



GIPFEL STÜRMER

Ganz oben auf der Lumi-Spitze

18

Von September 2000 bis Mai 2001 wurde HERA umgebaut. Das Ziel der ehrgeizigen Umrüstungsarbeiten: die „Trefferrate“ (Luminosität), also die Anzahl der miteinander kollidierenden Teilchen, auf das Vierfache erhöhen, um den Experimenten Zugang zu seltenen Prozessen zu verschaffen und somit HERAs Blick für Teilchen und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte zu schärfen. Gemeinsam gelang es Beschleuniger-mannschaft und Experimenteteams, alle Herausforderungen zu meistern und HERAs „Lumi“ zu neuen Höhenflügen zu verhelfen.

WELT BILD

HERA schreibt Physikgeschichte

20

Die brodelnde Teilchensuppe im Proton, die laufende Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung oder die Verbindung von elektromagnetischer und schwacher Kraft – all diese Einsichten von HERA in die Tiefen des Mikrokosmos haben Einzug in die Lehrbücher gehalten. Und die Entdeckungsreise ist noch lange nicht zu Ende. Während die bisherigen Analysen eine Vielzahl von Einzelaspekten beleuchteten, wird die Auswertung aller aufgezeichneten Daten schließlich ein präzises und umfassendes Gesamtbild des Protons liefern, dessen theoretische Interpretation noch einige Herausforderungen darstellt.

WEIT BLICK

HERA – Physik mit Zukunft

38

Zwar ist die aktive Datennahme an den HERA-Experimenten seit Sommer 2007 beendet, doch die Auswertung der aufgezeichneten Datenmengen ist weiterhin in vollem Gang – sie wird bis weit ins nächste Jahrzehnt hinein reichen. Es bleibt also spannend, denn was die HERA-Physiker nun vervollkommen, ist eine umfassende, experimentelle Beschreibung des Protons, wie es sie in dieser Präzision und Vielseitigkeit noch nie gab.

TEAM WORK.

Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile

Jedes große Forschungsprojekt ist eine Expedition in unerforschte Welten, und wie jede Expedition kann das Projekt nur gelingen, wenn sich Einzelne engagieren, neue Ideen entwickeln und ihre Mitarbeiter begeistern, sich zusammen mit ihnen auf den Weg zu machen, um die technischen und wissenschaftlichen Herausforderungen zu meistern.

Herausforderung HERA

Bei HERA waren es drei Personen, die stellvertretend für das gesamte Team genannt werden sollen: Bjørn H. Wiik, der das grundlegende Konzept des Elektron-Proton-Speicherrings vorschlug und die Projektleitung für den Bau des Protonenrings übernahm; Gustav-Adolf Voss, der seine ganze Erfahrung im Bau von Beschleunigern einbrachte und den Elektronenring baute; und Volker Soergel, der als Vorsitzender des Direktoriums in der Planungsphase und während der Bauzeit entscheidend zum Gelingen des Projekts beitrug.

HERA war auch ein richtungweisendes Experiment in Bezug auf die internationale Zusammenarbeit. Neben Deutschland trugen internationale Partner aus zahlreichen Ländern ein Viertel der Kosten, insbesondere durch den Bau von wichtigen Komponenten. Ohne unsere Partner wäre HERA nicht zu realisieren gewesen.

Ein Beschleuniger ist nur so gut wie die Experimente, die an ihm durchgeführt werden. Rund 1000 Wissenschaftler aus aller Welt haben dazu beigetragen, dass an HERA vier große Experimente entwickelt, gebaut und betrieben werden konnten, und dass aus der Flut der Daten neues Wissen gewonnen wird. Ihr Einfallsreichtum und persönlicher Einsatz war und ist ein wichtiges Element für den Erfolg.

Diese Broschüre ist allen Menschen gewidmet, die für HERA Großartiges geleistet haben und dies bei der weiteren Auswertung der Daten noch tun werden.





„Wer nach einer langen Bergtour schließlich den Gipfel erreicht, wird mit einer Aussicht auf die Welt belohnt, die er in dieser Weise vorher nicht gesehen hat. So geht es uns nach 15 Jahren Forschung mit HERA. Schon heute können wir mit Freude feststellen, dass das Wissen, das wir mit HERA gewonnen haben, Eingang in die Lehrbücher gefunden hat und uns besser verstehen lässt, was die Welt im Innersten zusammenhält.“



Prof. Dr. Albrecht Wagner
Vorsitzender des DESY-Direktoriums

Albrecht Wagner



Prof. Dr. Rolf-Dieter Heuer
Direktor für Teilchenphysik

Rolf-Dieter Heuer

LAUF BAHN.

Wie Hamburg zu einer Rennstrecke mit Weltgeltung kam

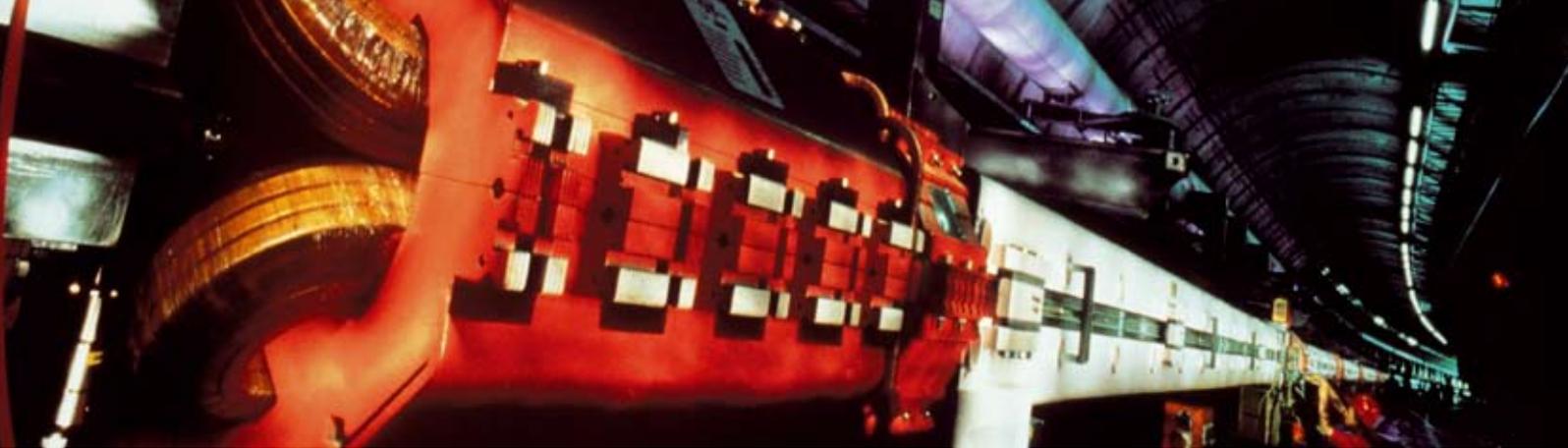
Auf Hamburgs prominentester Rennbahn drehten keine Spitzensportler ihre Runden, sondern Milliarden Teilchen, allesamt noch viel kleiner als ein Atom: Tief im Hamburger Untergrund prallten in einem gigantischen, kreisrunden Teilchenbeschleuniger Elektronen und Protonen bei höchsten Energien aufeinander. Seit 1992 war die Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA bei DESY in Betrieb. Ende Juni 2007 wurde der Forschungsbetrieb beendet und der Beschleuniger abgeschaltet – Anlass für eine Rückschau auf den Werdegang von Deutschlands größtem Forschungsinstrument, auf 15 Jahre bemerkenswerte Forschungserfolge und einen Ausblick auf das, was HERA noch zu bieten hat. Denn die Auswertung der HERA-Messdaten wird die Teilchenphysiker noch weit über 2010 hinaus in Atem halten.

Ein ehrgeiziger Plan

Als DESYs Physiker in den 1970er Jahren die Zukunft planten, stand eines fest: Das nächste Projekt musste einmalig sein. Es sollte Wege bei der Erforschung des Mikrokosmos öffnen, die den anderen Beschleunigerzentren auf der Welt verschlossen waren. In den Forschungszentren in der Schweiz, in Amerika und in Japan arbeitete man mit Teilchen und deren Antiteilchen: Elektronen und Positronen, Protonen und Antiprotonen. Bei DESY entschloss man sich, einen radikal neuen Weg zu wählen und ein „Super-Elektronenmikroskop“ für Protonen zu bauen – eine Maschine, die den Physikern Einblick in den innersten Aufbau der Materie gewähren würde.

Die Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA war geboren, die weltweit einzige Speicherringanlage, in der zwei unterschiedliche Teilchenarten beschleunigt werden. Hier kollidierten in einem 6,3 Kilometer langen Tunnel tief unter Hamburg die leichten, punktförmigen Elektronen mit den fast 2000-mal schwereren Wasserstoffkernen, den Protonen aus der Familie der Hadronen.





Technisches Neuland

Wenn im HERA-Beschleuniger ein Elektron mit einem Proton zusammenstößt, wirkt das Elektron wie eine winzige Sonde, die das Innenleben des Protons abtastet. Je höher die Energie beim Zusammenstoß der Teilchen ist, desto tiefer können die Physiker in das Proton hineinblicken, desto schärfer können sie die Details erkennen. Dazu müssen beide Teilchensorten getrennt beschleunigt und bei höchsten Energien zum Zusammenstoß gebracht werden. Man benötigt dazu zwei getrennte, technisch höchst anspruchsvolle Beschleuniger.

So etwas hatte zuvor noch keiner versucht. Auch wenn in der Gründungsphase von DESY Elektronen auf ruhende Protonen geschossen worden waren, hatte man sich seitdem auf die Physik mit Elektronen und Positronen konzentriert und besaß daher keinerlei Erfahrung mit dem Bau von Protonenbeschleunigern. Doch die Rechnung ging auf: Am 6. April 1984 wurde HERA genehmigt, am 8. November 1990 feierte man die symbolische Inbetriebnahme – und, wie Hamburgs damaliger Wissenschaftssenator Prof. Ingo von Münch hervorhob, eine finanzielle „Punktlandung“. Denn trotz der enormen technischen Herausforderungen war HERA innerhalb des vorgegebenen Termin- und Kostenrahmens fertig gestellt worden.

Der „Vater“ von HERA und spätere DESY-Direktor Bjørn H. Wiik im HERA-Tunnel. Bereits 1971 hatte Wiik die bahnbrechende Idee, Elektronen und Protonen getrennt zu beschleunigen und frontal zusammenprallen zu lassen. Sein Ziel: ein überdimensionales Elektronenmikroskop für Protonen zu bauen. Sein Konzept erwies sich als brillant; seine Arbeit begründete maßgeblich den späteren Erfolg von HERA.



Hannelore Grabe-Çelik

Die gelernte technische Zeichnerin Hannelore Grabe-Çelik bekam 1985 die Aufgabe, den Einbau von HERA zu koordinieren. Was das bedeutete, wurde ihr erst richtig klar, als sie inmitten von Bauteilen in der unterirdischen Baustelle stand und mit dem Satz „Frauen unter Tage bringen Unglück“ empfangen wurde. Mit Energie, Humor und ungetrübtem Optimismus organisierte sie noch heute alles – vom PETRA III-Einbau bis zum HERA-Fest.

HERA war mein größter Job. Ich bin mittlerweile seit 40 Jahren bei DESY und die Ringe sind meine Kinder: Ich habe mit der Planung von PETRA angefangen und höre mit PETRA III auf. 1986 bin ich mit meinen Jungs in den Untergrund gegangen. Die fast fünf Jahre „unter Tage“ als einzige Frau unter ca. 200 Männern waren aufregend (und für die Männer gewöhnungsbedürftig). Wir haben geregelt, was wann in den Tunnel kommt (und vor allem wie), aufgepasst, dass die Arbeit nie ins Stocken geriet, und ich war gleichzeitig Kummerkasten und DESY-Schnittstelle. Bei mir beschwerten sich die Firmen, wenn sie Flachmänner in den Wasserrohren oder Einkaufswagen im Tunnel fanden. Wir haben alle Probleme gelöst und das auch gefeiert – es gab ja Erfolge am laufenden Band! Nachdem hunderte Kilometer Kabel, 24 800 Gitterroste, Magnetmodule für Elektronen, supraleitende Magnete für Protonen und jede Menge anderer großer und kleiner Komponenten eingebaut waren, wurde am 19. September 1990 der letzte Protonenmagnet mit Trommelwirbel montiert. Wir hatten es geschafft!





Ein Bauprojekt der Superlative

Die Bauarbeiten für HERA waren ein hartes Stück Arbeit. Vier unterirdische Hallen galt es auszuschachten, jede von ihnen sieben Stockwerke tief. Dazwischen fraß sich die Schildvortriebsmaschine HERAKLES in 10 bis 25 Meter Tiefe durch den Sandboden Hamburgs: sechs Meter im Durchmesser, etwa genauso lang, ein riesiger Stahlbohrer, wie man ihn sonst für den Bau von Eisenbahn- und U-Bahn-Tunneln verwendet. So konnte der 6,3 Kilometer lange unterirdische Tunnel, in dem die beiden Beschleuniger von HERA aufgestellt sind, auch gleich unterirdisch gebaut werden. Ohne Gefahr für Haus und Hof bahnte HERAKLES unter Wohngebieten, Gewerbeflächen, Straßen und Grünanlagen den Weg für die Tunnelröhre.

Genau 28 Monate nach ihrem Start durchbrach die lasergesteuerte Schildvortriebsmaschine am 19. August 1987 die Wand zur HERA-Halle Süd und schloss damit den Kreis. Nur zwei Zentimeter war sie von ihrem Sollpunkt entfernt – zehn hätten es maximal sein dürfen. 180 000 Kubikmeter Erdreich hatte sie auf ihrem Weg unter der Bahrenfelder Trabrennbahn, diversen Wohn- und Gewerbegebiete sowie dem Hamburger Volkspark beiseite geschafft.

Ein gigantisches Schneiderad: Die Tunnelbohrmaschine HERAKLES räumte den Weg frei für HERA.

Zwei Beschleuniger für HERA

Kaum hatte HERAKLES den ersten Tunnelabschnitt zwischen den HERA-Hallen Süd und West fertig gebohrt, rückten die Installationstrupps an. Kabeltrassen, Strom- und Wasserleitungen, Licht und Lüftung – und dann folgten die ersten Magnete für den Elektronenring. Als HERAKLES im August 1987 an seinen Ausgangspunkt zurückkehrte, war beinahe die Hälfte des Elektronenbeschleunigers im Tunnel aufgestellt. Ein Jahr später konnte der Elektronenring in Betrieb genommen werden.

Dann begann der schwierigere Teil – der Aufbau des Protonenbeschleunigers, der mit seinen neuen supraleitenden Magneten und der aufwändigen Helium-Kühlung oberhalb des Elektronenrings installiert wurde. Insgesamt etwa 650 supraleitende Magnete kamen von den Herstellerfirmen in Deutschland und Italien, blieben jeder im Durchschnitt 80 Stunden in der Testhalle bei DESY und wurden schließlich im Tunnel aufgestellt. Am 19. September 1990 stand der letzte Protonenmagnet an Ort und Stelle. In der Nacht vom 14. zum 15. April 1991 gelang es, im großen HERA-Ring zum ersten Mal Protonen zu speichern. Am 19. Oktober 1991 war es soweit: HERA lieferte die ersten Elektron-Proton-Zusammenstöße.





● Tieftemperatur im großen Stil: die 2500 m² große Kältehalle von HERA

Der größte Kühltank Europas

Damit die schweren Protonen bei den hohen Energien von HERA tatsächlich die Kurve kriegen, sind sehr starke Magnetfelder nötig. Genauer gesagt: dreimal höhere Magnetfelder, als normale Magnete aus Eisenjoch und Kupferspule erzeugen können. Solche Felder lassen sich sinnvoll nur mit Hilfe der Supraleitung erreichen – also der Eigenschaft ausgewählter Materialien, Strom bei sehr tiefen Temperaturen verlustfrei zu leiten.

Das Konzept, das DESY für die 650 supraleitenden Magnete des HERA-Protonenrings zur Serienreife entwickelte, war auf Anhieb so erfolgreich, dass es sich inzwischen weltweit durchgesetzt hat. Die supraleitenden HERA-Magnete arbeiten bei einer Temperatur von minus 269 Grad Celsius – das ist gerade mal ein Grad mehr als im Weltraum. Um dieses frostige Klima über die 6,3 Kilometer des HERA-Beschleunigers aufrechtzuerhalten, baute DESY 1986 die damals größte Kälteanlage Europas. In der 2500 Quadratmeter großen Halle wird das Gas Helium abgekühlt, bis es sich verflüssigt. Anschließend wird das flüssige Helium in den HERA-Ring geleitet, wo es die Magnete durchströmt und kühlt. Für die europäische Industrie war der Bau von HERA damit eine einmalige Chance: Erstmals bekamen die Unternehmen die Gelegenheit, großtechnische Erfahrungen auf den Gebieten der Supraleitung und der Tieftemperaturtechnik zu sammeln.

Ein multikulturelles Großereignis

Der Bau von HERA war ein multikulturelles Großereignis: Insgesamt elf Länder trugen ihren Teil dazu bei – ein Novum in der Geschichte der Teilchenforschung. Bis dahin wurden die Detektoren zwar in internationaler Zusammenarbeit gebaut, der Beschleuniger selbst war jedoch Aufgabe des Gastgeberinstituts. Das internationale Interesse an HERA war dagegen so groß, dass Institute aus Frankreich, Italien, Israel, Kanada, den Niederlanden und den USA auf eigene Rechnung wesentliche Teile der Anlage lieferten oder wichtige Tests durchführten. Großbritannien, Polen, die CSFR, die Schweiz, die Volksrepublik China und deutsche Institute aus der DDR und der Bundesrepublik entsandten Fachkräfte zur Mitarbeit.

Am Bau der Anlage beteiligten sich 45 Institute und 320 Firmen (berücksichtigt wurden nur Firmen mit einem Auftragsvolumen von mehr als 25 000 Euro). Insgesamt wurde HERA zu über 20 Prozent aus dem Ausland finanziert, die vier HERA-Experimente sogar zu etwa 60 Prozent. Dieses „HERA-Modell“ der internationalen Zusammenarbeit funktionierte so gut, dass es inzwischen als Vorbild für die Durchführung großer, internationaler Forschungsprojekte gilt. ●



● Aufregendes Wochenende: erste Elektron-Proton-Kollisionen in HERA (19.10.1991)

MIKRO LABOR.

Haushohe Nachweisgeräte und das kleinste Labor der Welt

Der 6,3 Kilometer lange Speicherring HERA bei DESY ist der einzige weltweit, in dem unterschiedliche Teilchensorten – Protonen und Elektronen, bzw. ihre Antiteilchen, die Positronen – getrennt beschleunigt und zum Zusammenstoß gebracht wurden. In solchen Elektron-Proton-Kollisionen fungiert das Proton als Mikrolabor, in dem sich die unterschiedlichsten Fragestellungen der Teilchenphysik gezielt untersuchen lassen. Als Super-Elektronenmikroskop ermöglicht HERA den Physikern dabei den weltweit schärfsten Blick ins Proton. So können sie mit Hilfe der HERA-Experimente den inneren Aufbau des Protons und die fundamentalen Naturkräfte genau erforschen.

HERAs scharfe Augen

Vier große unterirdische Hallen gibt es am HERA-Speicherring – in jeder Himmelsrichtung eine. Sieben Stockwerke tief unter der Erde stehen hier die Detektoren, mit denen die internationalen Forscherteams die kleinsten Bausteine der Materie untersuchen. Bis Mitte 2007 waren die haushohen Nachweisgeräte in Betrieb und haben riesige Datenmengen aufgezeichnet. Zwar ist die aktive Datennahme nun beendet, doch die HERA-Experimente laufen weiter: Die Auswertung der Daten wird bis weit über 2010 hinaus spannende Einsichten in das Innenleben des Protons und die Natur der fundamentalen Kräfte liefern.

1992 gingen die ersten zwei Experimente an HERA in Betrieb: H1 in der HERA-Halle Nord und ZEUS im Süden. Beide Experimente beobachten die hochenergetischen Zusammenstöße von Elektronen und Protonen, die Aufschluss über das Innenleben des Protons und die Grundkräfte der Natur geben. In der Halle Ost steht seit 1995 das Experiment HERMES, das den Elektronenstrahl von HERA benutzt, um dem Eigendrehimpuls – dem Spin – der Protonen und Neutronen auf die Spur zu kommen. Im Westen der Anlage machte sich HERA-B von 1999 bis 2003 den Protonenstrahl des Speicherrings zunutze, um die physikalischen Geheimnisse schwerer Quarks zu lüften.

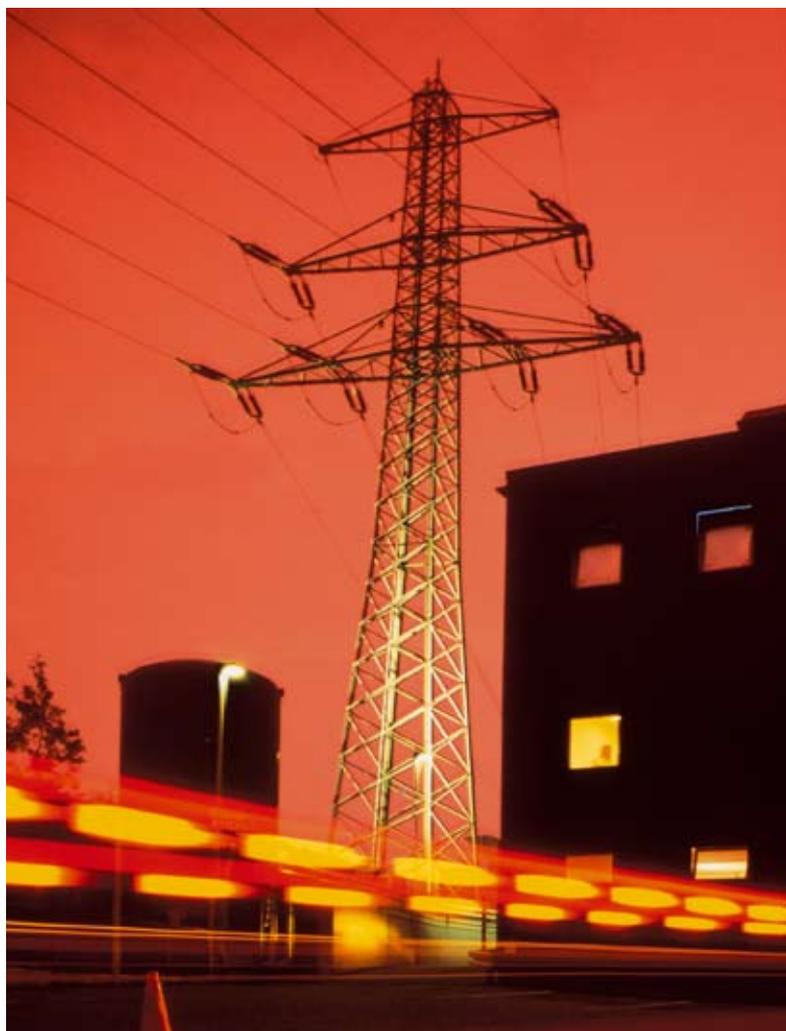
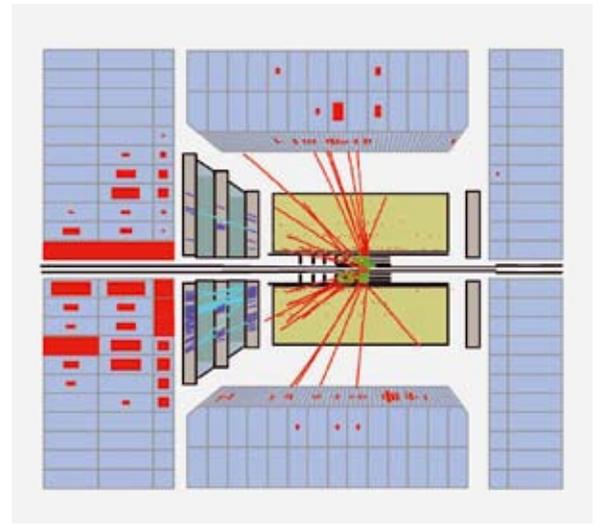


Bild einer Teilchenkollision:
 Dieses Ereignis registrierte der
 ZEUS-Detektor beim Zusammenstoß
 eines Protons und eines Positrons
 (Antiteilchen vom Elektron).
 Gemessen wurden die Richtung der
 Spuren und die Energie der Teilchen.



Bilderflut

Die in den unterirdischen HERA-Hallen aufgebauten Detektoren funktionieren wie riesige Hochleistungskameras: Sie sind groß wie ein dreistöckiges Haus, halb so schwer wie der Eiffelturm und angefüllt mit Hunderttausenden von elektronischen Bauteilen. Die Detektoren sind in der Lage, zehn Millionen digitale Bilder pro Sekunde aufzunehmen. Unmittelbar nach der Aufnahme wählt die Elektronik aus den zehn Millionen Bildern eigenständig die fünfzig besten aus – und das Sekunde für Sekunde. In einem normalen Betriebsjahr von HERA entstehen so allein bei den Experimenten H1 und ZEUS über 100 Millionen Bilder von Teilchenkollisionen, die anschließend am Computer genau analysiert werden müssen. Große international besetzte Forscherteams werten die Messdaten aus.



HERA: Hadron-Elektron-Ring-Anlage

Speicherringanlage für die Teilchenphysik

Forschungsbetrieb: 1992 bis 2007

Auswertung der gesammelten Daten: bis über 2010 hinaus

Länge: 6336 m

Energie der Elektronen: 27,5 Giga-Elektronenvolt (GeV)

Energie der Protonen: 920 Giga-Elektronenvolt (GeV)

longitudinal polarisierter Elektronenstrahl

Experimente: H1, ZEUS, HERMES, HERA-B

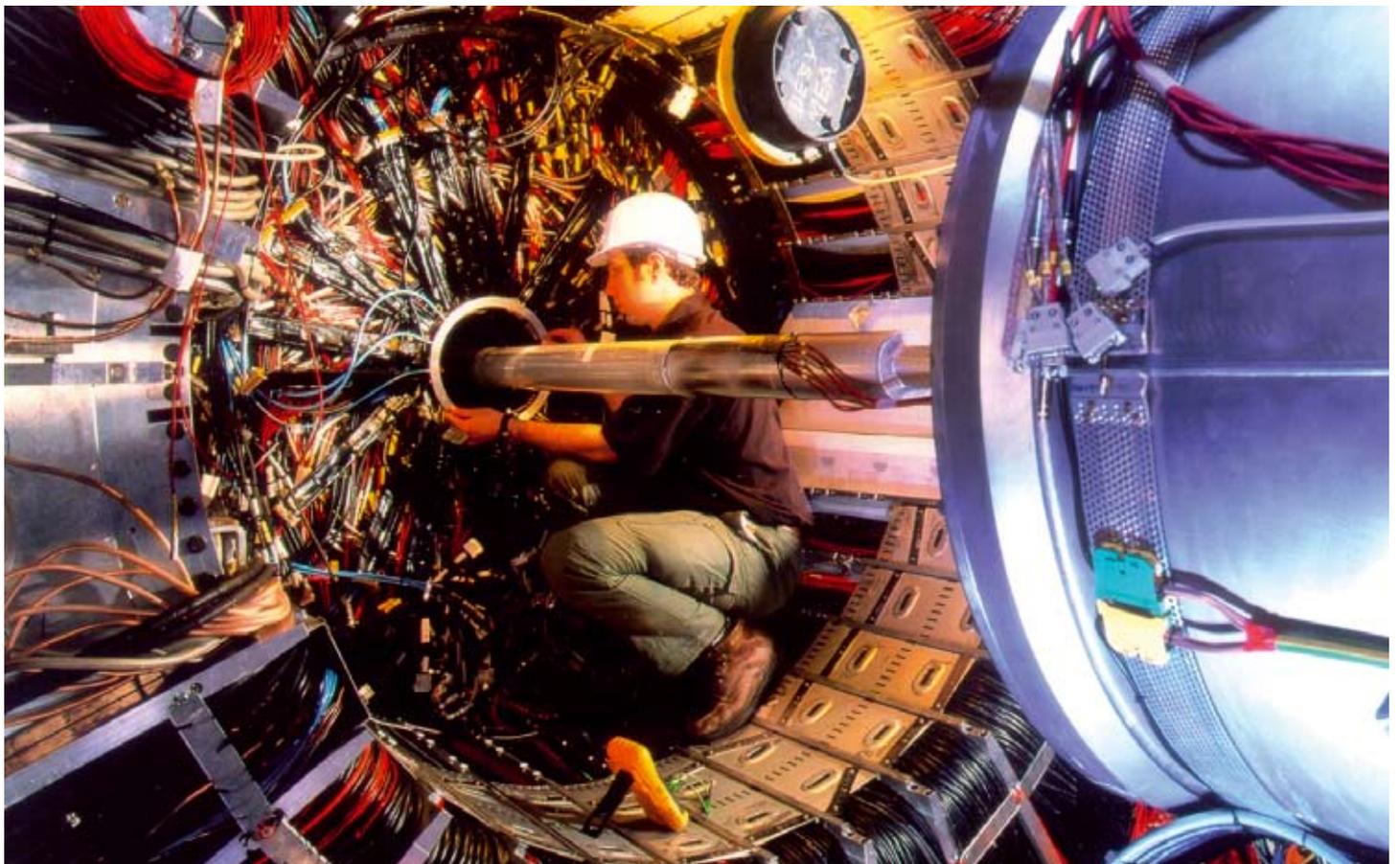
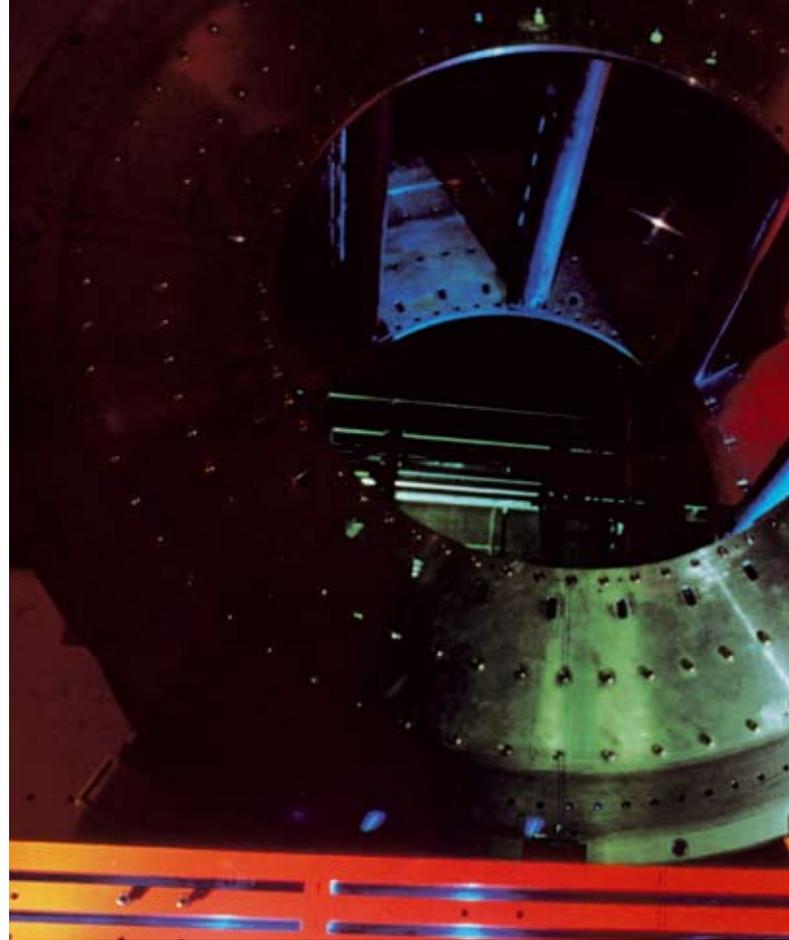
- > Elektron-Proton-Kollisionsexperimente H1 und ZEUS
 Entschlüsselung der inneren Strukturen des Protons
 Erweiterung des Verständnisses der fundamentalen Kräfte
 Suche nach neuen Formen der Materie
 Suche nach in der Teilchenphysik unerwarteten Phänomenen
- > H1-Experiment
 Datennahme: 1992-2007; HERA-Halle Nord
 Universaldetektor: 12 m x 10 m x 15 m; 2800 Tonnen
- > ZEUS-Experiment
 Datennahme: 1992-2007; HERA-Halle Süd
 Universaldetektor: 12 m x 11 m x 20 m; 3600 Tonnen
- > Strahl-Target-Experiment HERMES
 Untersuchung der Herkunft des Spins der Nukleonen
 Nutzung des longitudinal polarisierten Elektronenstrahls
 Datennahme: 1995-2007; HERA-Halle Ost
 Detektor: 3,50 m x 8 m x 5 m; 400 Tonnen
- > Strahl-Target-Experiment HERA-B
 Untersuchung der Eigenschaften schwerer Quarks
 Nutzung des Protonenstrahls
 Datennahme: 1999-2003; HERA-Halle West
 Detektor: 8 m x 20 m x 9 m; 1000 Tonnen

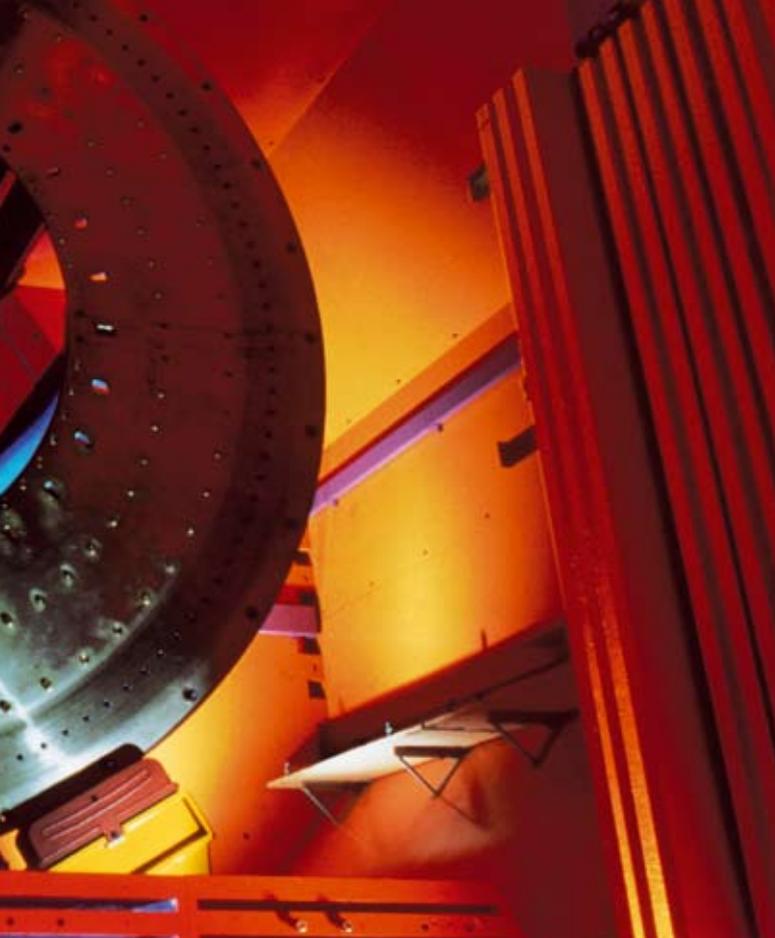
H1 UND ZEUS.

Teilchen auf Kollisionskurs

Die Kollisionsexperimente H1 und ZEUS nahmen von 1992 bis 2007 Daten. Dazu prallten die in HERA kreisenden Elektronen genau im Mittelpunkt der Detektoren frontal auf die ihnen entgegen fliegenden Protonen. Bei diesem Zusammenstoß wirkt das punktförmige Elektron wie eine winzige Sonde, die das Innere des Protons abtastet: Es dringt in das Proton ein, trifft dort auf einen von dessen Bausteinen – ein Quark – und kommuniziert mit diesem über den Austausch eines Kraftteilchens. Das Quark wird dabei aus dem Proton herausgeschlagen; es bildet sich ein ganzes Bündel neuer Teilchen, die zusammen mit dem Elektron in alle Richtungen auseinanderfliegen.

Aus den Spuren, welche die Teilchen in den Detektoren hinterlassen, lassen sich Rückschlüsse darauf ziehen, was im Inneren des Protons im Detail passiert. Hierbei geht es nicht nur um die einzelnen Bestandteile des Protons, sondern auch um die Grundkräfte der Natur, die zwischen den Teilchen wirken. Die dafür verfügbare Energie ist etwa zehnmal größer als bei früheren, ähnlichen Experimenten – damit bietet das Super-Elektronenmikroskop HERA den Physikern den weltweit schärfsten Blick ins Proton.





Quark-Gluon-Suppe

Vor gut 30 Jahren entdeckten die Physiker, dass das Proton aus drei Quarks besteht. Die Quarks werden von der starken Kraft zusammengehalten. Die Botenteilchen dieser Kraft, die Gluonen, fand man 1979 bei DESY. Gluonen können sich für unvorstellbar kurze Zeit in Paare von Quarks und Antiquarks aufspalten, die dann wiederum Gluonen aussenden, usw. Das Proton ist also gleichsam mit einem „See“ aus Quarks, Antiquarks und Gluonen gefüllt, die spontan auftauchen und wieder verschwinden. Die Ergebnisse von H1 und ZEUS zeigen, dass es hierbei viel turbulenter zugeht als zunächst gedacht. Die HERA-Physiker fanden im Proton deutlich mehr Quark-Antiquark-Paare und Gluonen, als man vorher angenommen hatte. Je genauer man hinschaut, desto mehr Teilchen scheint es im Proton zu geben. Quarks, Antiquarks und Gluonen bilden im Proton eine „brodelnde Suppe“. Wie diese zustande kommt, versuchen Theoretiker und Experimentalphysiker gemeinsam herauszufinden.

Zurück zur Urkraft

Die Experimente H1 und ZEUS konnten eine zentrale Vorhersage der gängigen Teilchentheorie, des Standardmodells, glänzend bestätigen: Sie haben gezeigt, dass zwei der grundlegenden Naturkräfte nur verschiedene Erscheinungsformen einer Kraft sind. Die elektromagnetische Kraft und die schwache Kraft wirken normalerweise unterschiedlich stark. Bei niedrigen Energien ist die schwache Kraft – wie der Name schon verrät – wesentlich schwächer als die elektromagnetische. Bei den höchsten Energien der Teilchenzusammenstöße in HERA jedoch werden beide Kräfte gleich stark. H1 und ZEUS konnten somit direkt belegen, dass beide Kräfte den gleichen Ursprung haben: die elektroschwache Kraft, zu der sich die beiden Kräfte bei nochmals deutlich höheren, im Labor unerreichbaren Energien vereinigen. Damit beobachteten die HERA-Experimente unmittelbar die Auswirkungen des ersten Schritts auf dem Weg zur großen Vereinheitlichung aller vier Grundkräfte der Natur.

HERA und der Nobelpreis

H1 und ZEUS konnten präzise vermessen, wie stark die starke Kraft zwischen den Quarks wirklich ist. Erstmals wiesen die Physiker in einem einzelnen Experiment über einen weiten Energiebereich durchgängig nach, dass sich die Stärke dieser Kraft ändert – und zwar genau andersherum als bei den anderen Naturkräften: Je dichter zwei Quarks beieinander sind, desto freier bewegen sie sich; je weiter sie sich voneinander entfernen, desto stärker zieht die starke Kraft sie – wie ein Gummiband – wieder zusammen. Das besondere Verhalten der starken Kraft hatten die Physiker David Gross, David Politzer und Frank Wilczek 1973 theoretisch vorhergesagt – 20 Jahre später konnte HERA dies eindrucksvoll bestätigen. Für ihre Entdeckung erhielten Gross, Politzer und Wilczek im Jahr 2004 den Nobelpreis für Physik.

Die Grundkräfte der Natur

Vier fundamentale Kräfte regieren die Welt: die Gravitation, die elektromagnetische, die schwache und die starke Kraft. Die Gravitation lässt den Apfel vom Baum fallen und die Planeten um die Sonne kreisen. Die elektromagnetische Kraft verbindet Elektronen und Protonen zu Atomen und sorgt für Strom aus der Steckdose. Die schwache Kraft ermöglicht die Kernfusion in der Sonne und den radioaktiven Zerfall von Atomkernen, und die starke Kraft hält Quarks und Gluonen im Proton sowie Protonen und Neutronen im Kern zusammen. Die Kräfte (oder Wechselwirkungen) werden durch Austauschteilchen übertragen, die für jede Kraftart spezifisch sind: die elektromagnetische Kraft durch die als Lichtquanten bekannten Photonen; die schwache Kraft durch das neutrale Z-Teilchen, das negativ und das positiv geladene W-Teilchen; die zwischen Quarks wirkende starke Kraft durch die Gluonen; die Gravitation durch das masselose, allerdings noch nicht beobachtete Graviton.

Die Physiker vermuten, dass kurz nach dem Urknall, als das gesamte Universum ein winziger Feuerball von unvorstellbarer Energie war, nur eine einzige Urkraft das Geschehen beherrschte. Experimente an Teilchenbeschleunigern wie HERA untersuchen Kräfte und Teilchen mit höchster Genauigkeit, was den Physikern erlaubt, Rückschlüsse auf die Verhältnisse bei jenen extrem hohen Energien zu ziehen, bei denen sich die fundamentalen Kräfte zu einer Urkraft vereinen – und damit quasi das Geschehen kurz nach dem Urknall zu rekonstruieren.



Eckhard Elsen ●

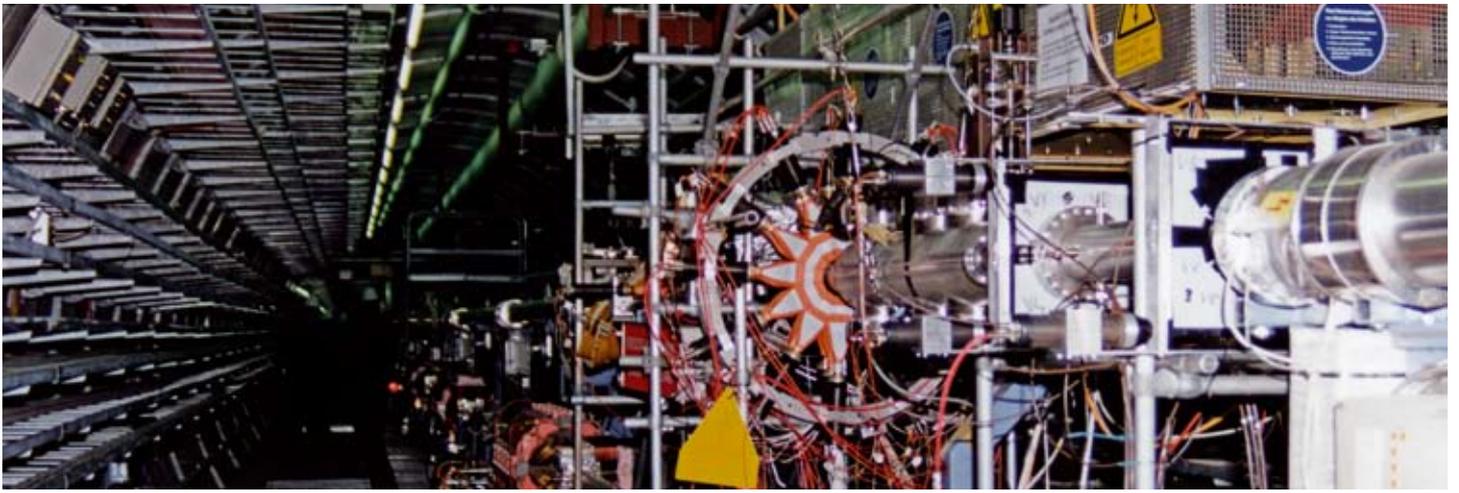
Der Teilchenphysiker Eckhard Elsen war von 1999 bis 2002 Sprecher des HERA-Experiments H1. Obwohl bei ihm mittlerweile viele Fäden für den geplanten Internationalen Linearcollider ILC zusammenlaufen, war er bis zuletzt bei H1 „auf Schicht“.

Als wir Ende 1996 bei HERA erstmals mit den Analysen in den Bereich höchster Energien vordringen konnten, gab es im Massenspektrum eine Anhäufung von Ereignissen, die einige Physiker als Leptoquarks interpretierten – das wäre eine Revolution für die Teilchenphysik gewesen. Wir beobachteten zwölf Ereignisse (fünf waren erwartet) und die Aufregung in der Kollaboration war groß. Fieberhaft haben wir an Datenanalyse, Interpretationen und der statistischen Signifikanz dieser Beobachtung gearbeitet. Alle haben beigetragen, und Enthusiasten und Skeptiker lagen in einem edlen Wettstreit. Unser Konkurrenzexperiment ZEUS sah ebenfalls Zeichen einer Anhäufung.

Als wir uns schließlich vorsichtig an die Öffentlichkeit wagten, überschlug sich die Fachwelt und sogar die New York Times berichtete. Erst einige Jahre später, mit deutlich mehr Messdaten, konnten wir nachweisen, dass „unsere Leptoquarks“ nur eine statistische Fluktuation waren. Das H1-Team hat aber trotzdem profitiert: Durch diese Laune der Natur entstand eine Intensität der Zusammenarbeit, die noch heute Ton und Arbeitsstil in der Kollaboration prägt.



Mitglieder der internationalen ZEUS-Kollaboration vor dem geöffneten Detektor. So komplexe und aufwändige Unterfangen wie die heutigen Teilchenphysik-Experimente lassen sich nicht mehr im nationalen Alleingang bewältigen. Die Detektoren werden von großen Teams mit Mitgliedern aus vielen Nationen geplant, gebaut und betrieben.



HERA-B.

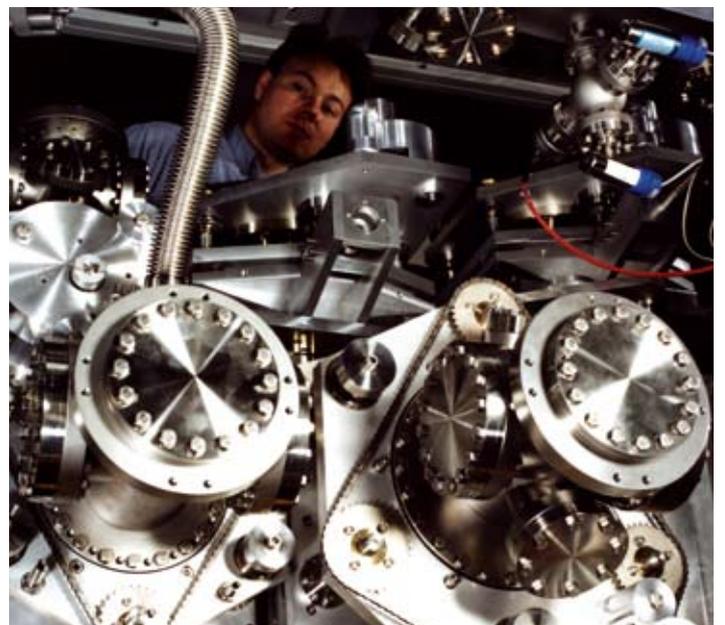
Wegbereitende Pionierarbeit

Das Experiment HERA-B nahm von 1999 bis 2003 Daten und nutzte dazu den Protonenstrahl von HERA, der auf ein Target aus feinen Drähten prallte. Dabei entsteht eine Kaskade von Teilchen, darunter in ganz seltenen Fällen auch Paare von Teilchen aus schweren Quarks, so genannte B-Mesonen, deren Zerfälle im Detektor registriert werden. Ursprünglich sollte HERA-B der Frage nachgehen, warum das Universum im Wesentlichen nur aus Materie besteht, obwohl im Urknall Materie und Antimaterie zu gleichen Teilen erzeugt wurden. Dieses Rätsel lässt sich an den B-Mesonen besonders gut studieren.

Die Teilchenphysikzentren KEK in Japan und SLAC in den USA bauten dafür spezielle Elektron-Positron-Speicherringe (so genannte B-Meson-Fabriken) mit je einem Detektor. Bei DESY entschied man sich für die Nutzung des Protonenstrahls von HERA und den Bau des Detektors HERA-B – eine technische Herausforderung, denn im Gegensatz zu den Elektron-Positron-Detektoren gab es für HERA-B kein einziges Vorbild. Es mussten also völlig neue Nachweismethoden entwickelt und erprobt werden. Insbesondere ging es um Detektorkomponenten mit bisher nicht erreichter Strahlungsbeständigkeit und um das elektronische Datennahmesystem, das in einer Sekunde so viele Signale bewältigen muss wie der gesamte Informationsfluss der Deutschen Telekom.

In der Targetkammer des HERA-B-Experiments prallten die hochenergetischen Protonen von HERA auf dünne Metalldrähte, wobei ganze Kaskaden von Teilchen erzeugt wurden. Die gesuchten Teilchenzerfälle sind allerdings äußerst selten, so dass der Detektor eine gewaltige Flut von Teilchenspuren bewältigen musste, ehe ab und zu einer der gewünschten Prozesse auftrat. Diese Datenflut stellte enorme technische Anforderungen an die Strahlungsbeständigkeit der Detektoren und das elektronische Datennahmesystem.

Im Jahr 2000 stand dann fest, dass die Experimente an den beiden B-Meson-Fabriken schneller zum Ziel führen, so dass die HERA-B-Gruppe dazu übergang, mit ihrem Detektor andere physikalische Fragestellungen zu untersuchen, zum Beispiel, wie Teilchen aus charm-Quarks im Inneren von Atomkernen produziert werden und wie sie mit dieser Kernmaterie wechselwirken. Die für HERA-B geleisteten Entwicklungen sind gleichwohl Pionierarbeit für zukünftige Experimente, bei denen ähnlich harte Bedingungen herrschen, wie zum Beispiel beim Protonenbeschleuniger LHC bei CERN in Genf.



HERMES.

Der richtige Dreh

Ähnlich wie sich die Erde um sich selbst dreht, drehen sich auch die Teilchen im Kern von Atomen, die Nukleonen (Protonen und Neutronen): Sie besitzen einen Spin. Diese Eigenschaft gibt den Physikern Rätsel auf. Denn Mitte der 1980er Jahre fanden sie heraus, dass die drei Hauptbestandteile der Nukleonen – die Valenzquarks – zusammengenommen nur etwa ein Drittel des Spins der Nukleonen liefern. Wo kommen die restlichen zwei Drittel her? Dies herauszufinden, ist Aufgabe des HERA-Experiments HERMES, das von 1995 bis 2007 Daten nahm.

Mit Hilfe des HERMES-Detektors beobachten die Physiker, wie die Elektronen des HERA-Speicherrings durch eine mit Gas gefüllte Zelle fliegen und mit den Atomen des Gases zusammenstoßen. Sowohl die Elektronen von HERA als auch die Gas-Atome sind polarisiert, das heißt ihr Spin zeigt in eine bestimmte Richtung. Da die Art und Häufigkeit der Zusammenstöße von dieser Ausrichtung abhängen, lässt sich anhand der beobachteten Teilchenreaktionen untersuchen, wo der Spin des Protons eigentlich herkommt.

Das Spinrätsel

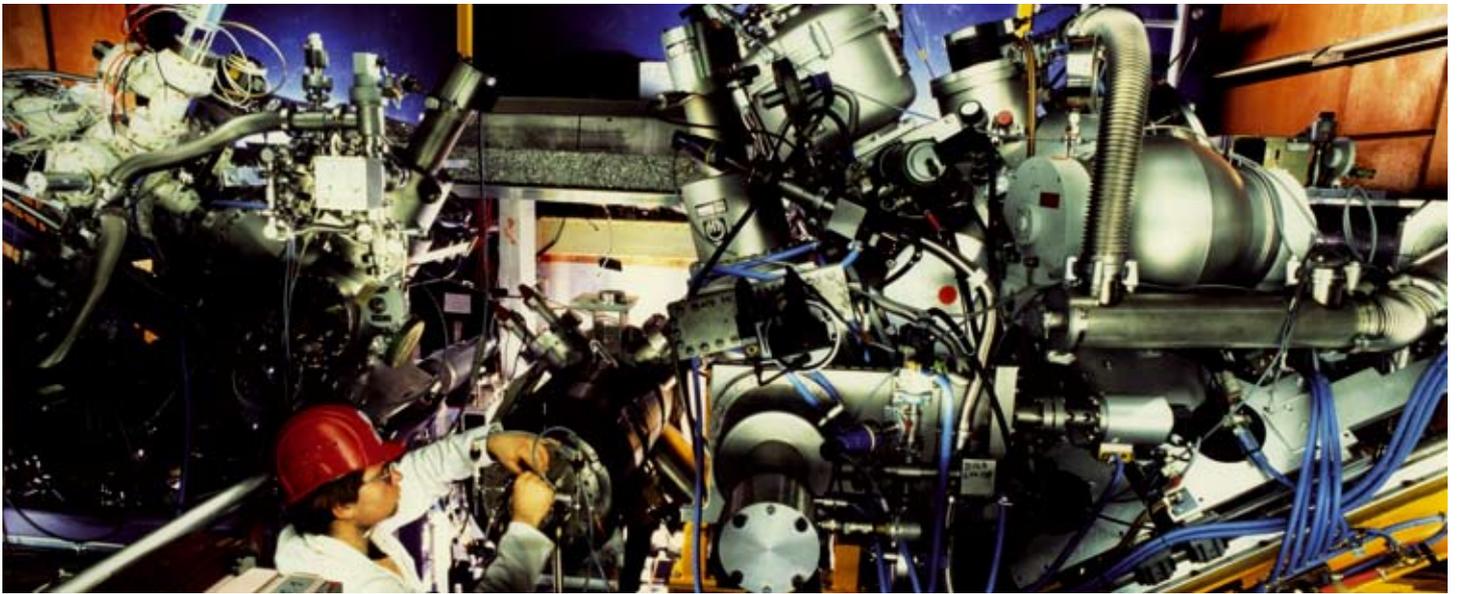
Inzwischen ist klar, dass man sich bei der Erklärung des Spins nicht auf die drei Valenzquarks beschränken darf. Denn Proton und Neutron sind zusätzlich mit einem ganzen See aus Quarks, Antiquarks und Gluonen gefüllt. Alle diese Teilchen haben einen Spin; alle bewegen sich und besitzen damit auch einen Bahndrehimpuls. Möchte man den Spin der Nukleonen wirklich verstehen, so muss man die Beiträge dieser brodelnden Masse einzeln bestimmen. Genau hierin liegt die Stärke von HERMES: Sein spezielles Konzept erlaubt es, die Beiträge der verschiedenen Sorten von Quarks getrennt zu vermessen. Zudem gehört HERMES zu den ersten Experimenten der Welt,



● Blick in die Targetkammer von HERMES: Innovationen wie das gasförmige Target ermöglichen es dem HERMES-Team, die verschiedenen Beiträge zum Nukleonenspin einzeln aufzuschlüsseln.

die einen direkten Hinweis auf den Spin der Gluonen geben konnten. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass der Quarksee kaum zum Spin des Nukleons beiträgt, und auch der Beitrag der Gluonen scheint eher gering zu sein. Ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zur Lösung des Spinrätsels – denn dies bedeutet, dass neben dem Spin der Quarks und Gluonen auch deren Bahndrehimpuls einen wesentlichen Beitrag zum Spin der Nukleonen leisten muss. Genau diesem Thema widmen sich die neuesten Untersuchungen von HERMES.





Arbeiten an der Targetkammer von HERMES: Innerhalb dieser Kammer trifft der hochenergetische, polarisierte Elektronenstrahl von HERA auf eine mit Gas gefüllte Zelle, in der die Teilchen mit den Protonen und Neutronen in den – ebenfalls polarisierten – Atomkernen des Gases zusammenstoßen. Die dabei entstehenden Teilchen werden im HERMES-Detektor nachgewiesen (im Hintergrund hinter dem Targetbereich). Links von der Targetkammer befindet sich die Atomstrahlquelle, rechts ein Polarimeter, mit dem die Polarisation der Atomkerne des Gases bestimmt wird.

Elke Aschenauer ●

Die Teilchenphysikerin Elke Aschenauer arbeitet seit 1996 beim HERA-Experiment HERMES mit, dessen Sprecherin sie von 2003 bis 2006 war. Obwohl sie mittlerweile am Jefferson Lab in den USA die Leitung eines neuen Experiments übernommen hat, ist sie „natürlich immer noch bei HERMES“.

Was mir bei HERA besonders gefällt, ist die angenehme, fast familiäre Atmosphäre. Titel sind viel weniger wichtig als Können, was vielen Doktoranden und Postdocs Möglichkeiten eröffnet hat, die sie an anderen Experimenten nie gehabt hätten. Es gab Zeiten, in denen es im HERMES-Management nicht einen Professor gab und niemand älter als 40 Jahre war! Auch das ist ein Zeichen dafür, dass man bei HERMES jungen Leuten immer eine Chance gibt.

Mit HERA bot sich erstmals die Möglichkeit, mit polarisierten Positronen und Elektronen hoher Energie zu experimentieren. Unsere größte Herausforderung bei HERMES war der Versuch, mit unseren Messungen wirklich alle Komponenten des Spins der Nukleonen abzudecken. Eines der spannendsten Ergebnisse von HERMES sind die präzisen Messungen der Beiträge der Quarks zum Spin der Nukleonen, die sogar nach einzelnen Quarksorten aufgeschlüsselt werden konnten. Besonders beeindruckend finde ich, dass mit HERMES viel mehr gemacht wurde, als je geplant war. Mit unseren Ergebnissen haben wir das Physikprogramm von anderen Experimenten entscheidend beeinflusst und werden dies mit unserer zukünftigen Datenauswertung auch weiterhin tun. Insofern erwarte ich mit größter Spannung all die Ergebnisse, die wir noch nicht wirklich im Sinn haben, die aber echte Neuigkeiten sein werden.



GIPFEL STÜRMER.

Ganz oben auf der Lumi-Spitze

Von September 2000 bis Mai 2001 wurde HERA umgebaut. Das Ziel der ehrgeizigen Umrüstungsarbeiten: die „Trefferrate“ (Luminosität), also die Anzahl der miteinander kollidierenden Teilchen, auf das Vierfache erhöhen, um den Experimenten Zugang zu seltenen Prozessen zu verschaffen und somit HERAs Blick für Teilchen und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte zu schärfen. Gemeinsam gelang es Beschleunigermannschaft und Experimenteteams, alle Herausforderungen zu meistern und HERAs „Lumi“ zu neuen Höhenflügen zu verhelfen.

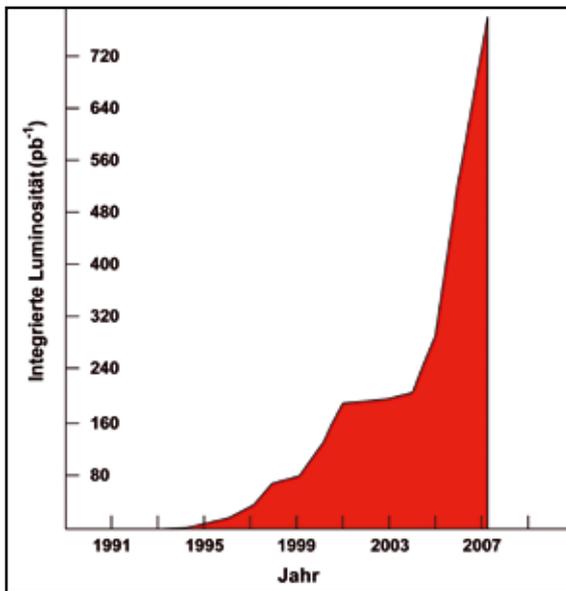


Umbau für mehr Leistung

120 Techniker, Wissenschaftler und Ingenieure waren neun Monate lang mit dem Umbau beschäftigt. 480 Meter Vakuumsystem mussten ausgetauscht, knapp 80 Magnete neu konstruiert und eingebaut werden, jeder von ihnen zwischen einem und vier Meter lang und bis zu sieben Tonnen schwer. Die neuen Magnete drückten die Querschnitte der Teilchenstrahlen, die HERA beschleunigt, unmittelbar vor der Kollision auf ein Drittel ihrer vorherigen Fläche zusammen: von einem hundertstel Quadratmillimeter auf winzige drei tausendstel Quadratmillimeter. Diese Präzisionsarbeit erforderte eine aufwändige Neugestaltung der beiden Wechselwirkungszone, in denen die Teilchen aufeinander prallen. Dadurch wurde die Wahrscheinlichkeit deutlich größer, dass die in HERA beschleunigten Elektronen und Protonen zusammenstoßen, und die Teilchenphysiker konnten auch seltene Prozesse mit für die Statistik ausreichender Häufigkeit beobachten. Allerdings

stieg damit auch die Flut an uninteressanten Prozessen. Daher mussten HERAs hausgroße Nachweisgeräte technisch ebenfalls aufgerüstet werden, so dass sie noch schneller und effektiver entscheiden können, welche Teilchenreaktionen wirklich interessant sind.

Eine weitere Neuerung eröffnete den HERA-Physikern viel versprechende Forschungsperspektiven: Neben dem HERMES-Experiment konnten nach dem Umbau auch die Experimente H1 und ZEUS polarisierte Elektronen für ihre Untersuchungen nutzen. Dazu bekam HERA im Norden und im Süden neue Spinrotatoren – ausgeklügelte Magnetsysteme, die den Spin der umlaufenden Elektronen in Flugrichtung der Teilchen drehen. Im Fachjargon spricht man von longitudinal polarisierten Teilchen. Mit ihrer Hilfe konnten die Physiker von H1 und ZEUS bisher unzugängliche Aspekte der Protonenstruktur genau unter die Lupe nehmen.



HERA hoch hinaus: Die über die Betriebszeit von HERA aufsummierte „Trefferrate“ zeigt die hervorragende Leistung der Speicherringanlage.

Ein schwerer Start

Eine technisch derart komplexe Maschine wie HERA mit ihren zwei Beschleunigerringen, vier Experimenten und entsprechend Tausenden von Hightech-Komponenten in Betrieb zu nehmen, geht nicht einfach auf Knopfdruck. Wenn eine Beschleunigeranlage neu ist oder umfassend umgebaut wurde,



vergehen oft Wochen und Monate des Tüftelns, des Optimierens, der Rückschläge und Fortschritte, bis die Beschleunigermannschaft routinemäßig Idealbedingungen für alle Experimente herstellen kann.

HERA nach dem großen „Lumi-Upgrade“ wieder erfolgreich in Betrieb zu nehmen, war daher eine Herausforderung ersten Ranges. Als der Beschleuniger wieder an den Start ging, machten unerwartet hohe Untergrundraten die Datennahme der Kollisionsexperimente H1 und ZEUS nahezu unmöglich. Unterstützt von externen und internen Beratungsgremien, gelang es der HERA-Mannschaft und den Teams der Experimente, in enger Zusammenarbeit ein Problem nach dem anderen zu identifizieren, nachzuvollziehen und zu lösen. Dazu wurden Veränderungen am Strahlkollimationssystem, am Vakuumsystem und an den Detektoren vorgenommen. Anfang 2004 konnten H1 und ZEUS schließlich bei den ursprünglich geplanten Strahlströmen Daten nehmen.

HERA auf Höhenflug

Von da an ging es steil aufwärts: Die HERA-Mannschaft konzentrierte sich darauf, die Strahlströme kontinuierlich zu steigern, während die Experimenteteams gleichzeitig die Effizienz der Datennahme ihrer Detektoren verbesserten. Bereits zur sommerlichen Betriebsunterbrechung 2004 hatte HERA die höchste Luminosität der ersten Betriebsphase übertroffen und als erster Speicherring weltweit longitudinal polarisierte, hochenergetische Positronen für Kollisionen zur Verfügung gestellt. Im Jahr 2005 übertraf die spezifische Luminosität deutlich den geplanten Wert. Dank unermüdlicher Optimierungsarbeiten gelang es der HERA-Mannschaft, die Verfügbarkeit der Anlage, die Spitzenluminosität und die Untergrundbedingungen Jahr für Jahr weiter zu verbessern und für die HERA-Experimente sowohl im Positronen- als auch im Elektronenbetrieb bis zuletzt ideale Messbedingungen bei höchster Luminosität herzustellen.

Ferdinand Willeke

Ferdinand Willeke, von Kollegen auch gern „Mr. HERA“ genannt, leitete seit 1994 die Gruppe MHE bei DESY, die für den Betrieb der Anlage verantwortlich ist. Im Sommer 2007 wechselte er zum *Brookhaven National Laboratory* in die USA, um dort die Beschleunigersysteme für die Lichtquelle NSLS-II aufzubauen.

Um den Experimenten Luminosität zu liefern, müssen wir mit HERA und der gesamten Beschleunigerkette interessante Beschleunigerphysik und komplexe Betriebsabläufe bewältigen. Unsere größte Herausforderung



ist, alles richtig zu organisieren, um HERA zuverlässig, effizient und störungsfrei laufen zu lassen. Dabei können wir stolz darauf sein, dass bei HERA eigentlich alles sehr gut lief. Manchmal mussten wir dazu jedoch eine Durststrecke bewältigen, zum Beispiel beim Betrieb mit Elektronen, die sich Staubteilchen eingefangen hatten – der Fall wurde durch ein komplett neues Vakuumpumpensystem gelöst. Oder die Untergrundprobleme nach dem Luminositäts-Upgrade, die verbesserte Kollimatoren in den Detektoren H1 und ZEUS notwendig machten. Der Luminositätsbetrieb mit HERA war jedoch überaus erfolgreich, gemessen an den Bedenken, die dem Betrieb mit so unterschiedlichen Teilchenarten entgegengebracht worden waren.

Ich denke, alle am HERA-Betrieb beteiligten Gruppen und Kollegen können stolz darauf sein, dass sie eine so komplexe Anlage wie HERA mit großer Effizienz – HERA erreicht bis zu 80 Prozent des theoretisch erreichbaren Wertes! – betreiben können. Der Erfolg einer Anlage wie HERA ist eine Folge von vielen kleinen Stufen, verteilt über die letzten 20 Jahre. Das Bewältigen jeder dieser Stufen, wie der erste gespeicherte Strahl und die erste Luminosität, ist ein Erfolg, an den man gerne zurückdenkt.

HERA schreibt Physikgeschichte

Die brodelnde Teilchensuppe im Proton, die laufende Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung oder die Verbindung von elektromagnetischer und schwacher Kraft – all diese Einsichten von HERA in die Tiefen des Mikrokosmos haben Einzug in die Lehrbücher gehalten. Und die Entdeckungsreise ist noch lange nicht zu Ende. Während die bisherigen Analysen eine Vielzahl von Einzelaspekten beleuchteten, wird die Auswertung aller aufgezeichneten Daten schließlich ein präzises und umfassendes Gesamtbild des Protons liefern, dessen theoretische Interpretation noch einige Herausforderungen darstellt.

Präzisionsmaschine HERA

In ihrer Art ist die Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA einzigartig: In keinem anderen Beschleuniger der Welt prallen winzige Elektronen bei höchsten Energien auf die 2000-mal schwereren Protonen. Das Elektron fungiert dabei als punktförmige Sonde, die das Innenleben des Protons sichtbar macht, ohne selbst an der starken Wechselwirkung teilzunehmen – jener Kraft, die das Geschehen zwischen den Bausteinen des Protons, den Quarks und Gluonen, beherrscht. Damit ist HERA für Präzisionsmessungen der inneren Struktur des Protons und der darin wirkenden Kräfte ausgelegt, insbesondere der starken Wechselwirkung. Wie es im Fachjargon heißt: HERA ist eine „Präzisionsmaschine für QCD“, ein Super-Elektronenmikroskop zur Untersuchung der Quantenchromodynamik, der Theorie der starken Kraft.

Als Sonden lassen sich bei HERA neben Elektronen auch deren Antiteilchen, die Positronen, einsetzen. Seit dem Umbau der Anlage in den Jahren 2000 und 2001 können die Elektronen und Positronen zudem nicht nur beim Experiment HERMES, sondern auch bei den Kollisionsexperimenten H1 und ZEUS longitudinal polarisiert werden, d.h. der Spin der Teilchen wird in Flugrichtung oder entgegen der Flugrichtung ausgerichtet. Die HERA-Physiker können das Proton also mit

einer Vielfalt von verschiedenen Werkzeugen untersuchen. Damit steht ihnen das komplette Instrumentarium zur Verfügung, das sie brauchen, um die unterschiedlichsten Aspekte des Protons und der Naturkräfte zu erforschen.

Durch die Wahl der punktförmigen Elektronen und Positronen als Sonden erreicht HERA prinzipiell eine hohe Genauigkeit bei der Untersuchung der starken Kraft, da diese Teilchen mit den Quarks im Proton über die elektroschwache Kraft wechselwirken und somit von der starken Wechselwirkung unbeeinflusst bleiben. Der starken Kraft gegenüber wirken die Elektronen und Positronen also wie neutrale Beobachter. Dies ist ein entscheidender Vorteil gegenüber dem bald weltweit leistungsstärksten Beschleuniger, dem Proton-Proton-Collider LHC beim Forschungszentrum CERN in Genf. Dessen Sonden – die Protonen – sind zwar sehr viel energiereicher als die von HERA, da sie aber selbst durch die starke Kraft zusammengehalten werden, ist es deutlich schwieriger, damit Strukturen im Proton aufzulösen. Die Ergebnisse von HERA, die mittlerweile als Grundlagenwissen in die Lehrbücher Eingang gefunden haben, werden ihre Gültigkeit also noch lange unangefochten behalten.



Martin Berg ●

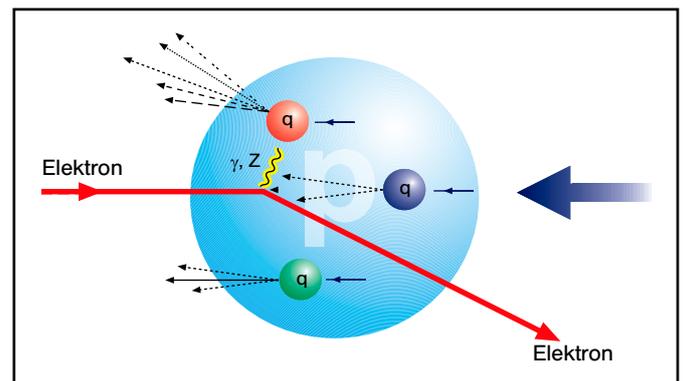
Martin Berg ist Experte fürs Leere: Er kam im Jahr 1983 als Vakuumtechniker zu DESY und hat HERA während seiner gesamten Karriere begleitet. Sein nächstes Projekt ist PETRA III.

Ich kann mich noch gut an den Tag der offenen Tür im Juni 1986 erinnern: Meine Tochter Sophie war gerade vier Wochen alt, und trotz der lauten Proteste meiner Frau habe ich sie im Tragekörbchen mit in die HERA-Halle West heruntergenommen, die damals nur ein großes unterirdisches Loch war. Mit den Jahren ist meine Familie groß geworden und HERA älter, und ich bin schon ein bisschen traurig, dass wir sie abschalten müssen. HERA war und ist nun einmal ein großer Meilenstein für DESY, nicht nur, weil alle Gruppen so harmonisch und effektiv zusammengearbeitet haben, sondern auch wegen der großartigen Wissenschaft. Ich hoffe, dass HERAs wissenschaftliche Ergebnisse gebührend gefeiert werden und die Teilchenphysik bei DESY weiterlebt.

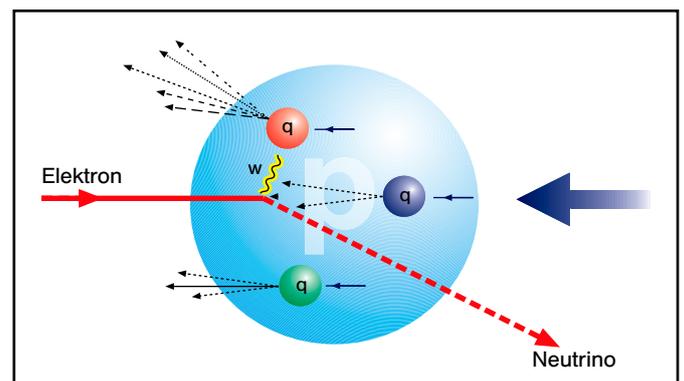


Teilchenreaktionen bei HERA: neutraler Strom und geladener Strom

Trifft ein Elektron im H1- oder ZEUS-Detektor auf ein Proton, so kann es mit einem der Quarks (q) in dessen Inneren zusammenstoßen. Dabei überträgt das Elektron Energie und Impuls auf das Quark, indem es entweder ein Photon als Träger der elektromagnetischen Kraft oder aber ein Z- oder W-Teilchen als Träger der schwachen Kraft aussendet. Das Quark wird aus dem Proton herausgeschlagen und erzeugt ein Bündel von Teilchen. Die verbleibenden zwei Quarks fliegen in ihrer ursprünglichen Richtung weiter und erzeugen ebenfalls Teilchenbündel.



Entsendet das Elektron beim Stoß ein Photon oder Z-Teilchen (oberes Bild), so wird es selber abgelenkt und im Detektor sichtbar. Da die ausgetauschten Kraftteilchen neutral sind, nennt man diese Art der Reaktion „neutraler Strom“. Wird dagegen ein negativ geladenes W-Teilchen übertragen (unteres Bild), so verwandelt sich das Elektron in ein Neutrino, das die Apparatur spurlos durchquert. Aufgrund des geladenen Kraftteilchens wird diese Reaktion entsprechend „geladener Strom“ genannt.

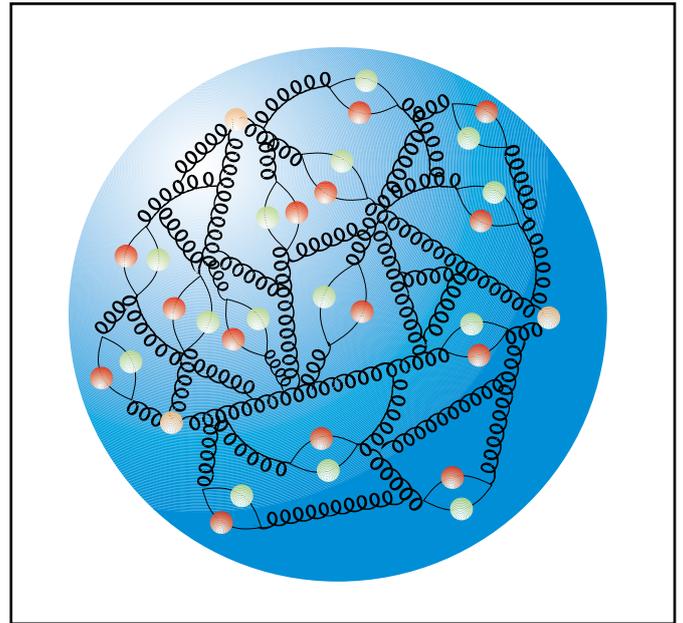


Einblicke in die Tiefen des Protons

Wer die starke Kraft verstehen will, muss zunächst die Struktur des Protons verstehen. Denn die Bestandteile des Protons, die Quarks und Gluonen, unterliegen der starken Kraft, und die Masse des Protons wird über die im Feld dieser Bestandteile gespeicherte Energie ausgemacht. Damit ist das Proton ein ideales Labor zur Untersuchung der starken Kraft.

Ihre Hauptaufgabe, hoch aufgelöste „Bilder“ vom Inneren des Protons zu liefern, hat HERA glänzend erfüllt. Bereits in der ersten Betriebsphase offenbarten sich den HERA-Experimenten H1 und ZEUS völlig neue Einsichten in die Tiefen des Protons. Als HERA 1992 an den Start ging, hatte man nur vage Vorstellungen davon, was im Proton zu erwarten war. Dass die Quarks im Proton Gluonen aussenden – die Klebeteilchen, die die starke Kraft übertragen – und dass diese wiederum Gluonen oder Paare von Quarks und Antiquarks erzeugen, war bekannt. Meist ging man jedoch davon aus, dass sich neben den drei Valenzquarks, die für die Ladung des Protons verantwortlich sind, nur wenige Quark-Antiquark-Paare und Gluonen im Proton befinden. Dank der hohen Energie von HERA konnten H1 und ZEUS zu immer kleineren räumlichen Abständen und immer kleineren Impulsanteilen vordringen und die Strukturfunktion F_2 in einem Bereich messen, der ganze vier Größenordnungen der kinematischen Parameter, x und Q^2 , überspannt – das sind zwei bis drei Größenordnungen mehr, als früheren Experimenten zugänglich war (siehe Kasten). Was sich den Physikern dabei offenbarte, war eine große Überraschung: Wie die HERA-Messungen zeigen, gleicht das Innere des Protons eher einer dichten, brodelnden Suppe, in der Gluonen und Quark-Antiquark-Paare unaufhörlich abgestrahlt und wieder vernichtet werden. Je kleiner die Impulsanteile x sind, auf die das HERA-Mikroskop eingestellt ist, desto mehr Quark-Antiquark-Paare und Gluonen gibt es im Proton. Diese hohe Dichte der Gluonen und Quarks im Proton, die zu kleinen Impulsanteilen x hin immer mehr ansteigt, stellte einen völlig neuen, bis dahin noch nicht untersuchten Zustand der starken Kraft dar.

Valenzquarks, Seequarks und Gluonen

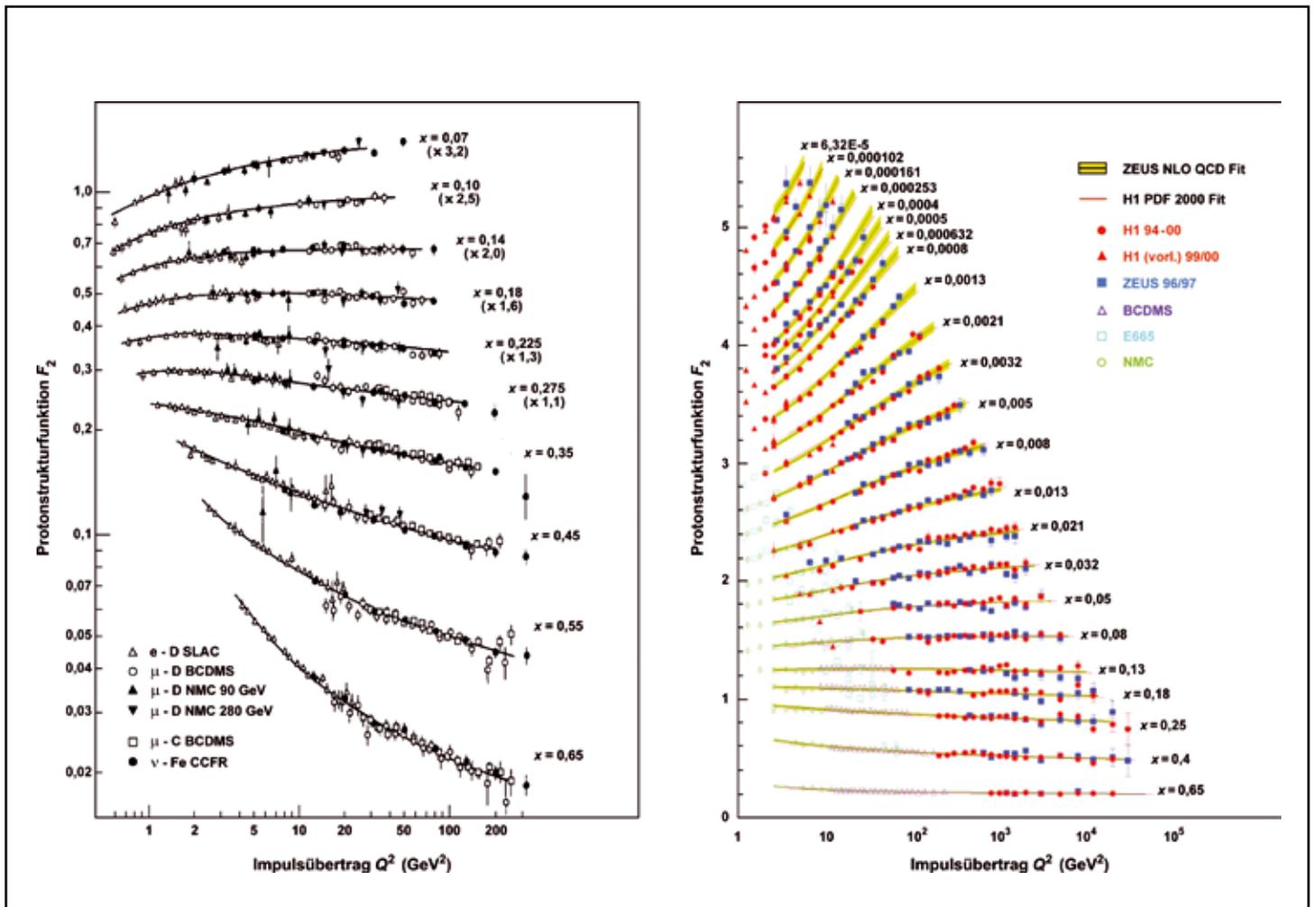


Als Super-Elektronenmikroskop macht HERA den detaillierten Aufbau des Protons sichtbar. Im Proton gibt es drei Valenzquarks, die durch den Austausch von Gluonen aneinander gebunden sind. Die Quantentheorie erlaubt den Gluonen, sich für kurze Zeit in Quark-Antiquark-Paare zu verwandeln. Das Proton erhält somit neben den Valenzquarks und Gluonen einen ganzen „See“ aus kurzlebigen Quark-Antiquark-Paaren.

Die kinematischen Variablen x und Q^2

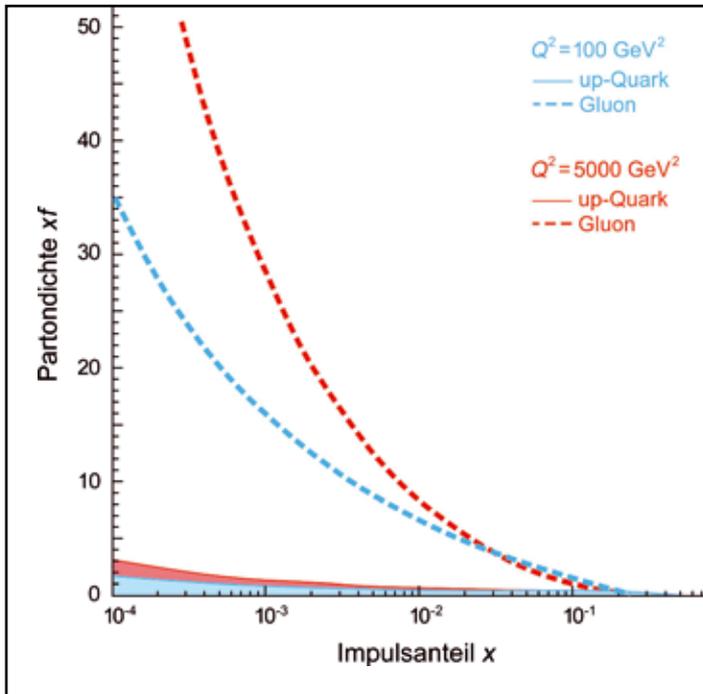
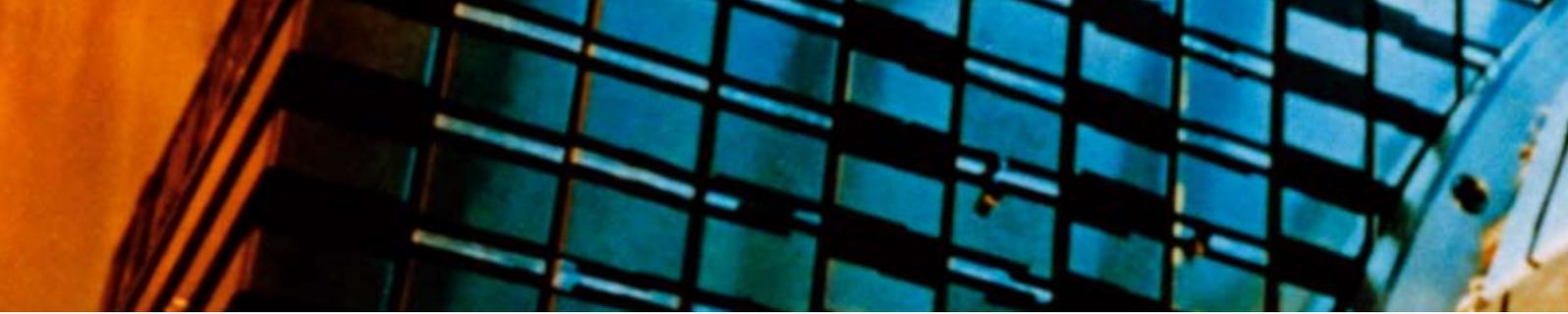
- > **Impulsanteil x :** Anteil des Protonenimpulses, den das Quark trägt, mit dem das Elektron zusammenstößt.
- > **Impulsübertrag Q^2 , auch Auflösungsparameter genannt:** Quadrat des Impulses, der bei der Kollision zwischen den Stoßpartnern übertragen wird; ein Maß für die Auflösung des HERA-Mikroskops ($Q^2 = 1 \text{ GeV}^2$ entspricht einer Auflösung von einem Fünftel des Protonenradius).

Die Strukturfunktion $F_2(x, Q^2)$ des Protons als Funktion der Auflösung Q^2 für verschiedene Impulsanteile x . Auffallend ist das rasche Ansteigen von F_2 mit Q^2 zu kleinen x -Werten hin. Der Vergleich der Messungen bei HERA (rechts) mit den Daten von 1992 (links) zeigt den enormen Fortschritt, sowohl in Bezug auf den zugänglichen kinematischen Bereich als auch die Präzision.



Nobelpreisträger Frank Wilczek zu den HERA-Messungen

„Der spektakulärste experimentelle Beweis dafür, dass Protonen bei zunehmender Auflösung immer mehr aus (...) weichen Gluonen zu bestehen scheinen, wurde erst zwanzig Jahre später an HERA eindeutig erbracht.“



Strukturfunktionen als Schlüssel zum Proton

Aus grundsätzlichen Erwägungen heraus lässt sich die Struktur des Protons mit Hilfe einiger so genannter Strukturfunktionen beschreiben, die jeweils unterschiedliche Aspekte der Wechselwirkung von Elektron und Proton abdecken. Wie diese Strukturfunktionen im Detail aussehen, lässt sich bisher nicht berechnen. Wohl aber weiß man, wie sich die Strukturfunktionen bei Veränderung der Auflösung ändern. Mit anderen Worten: Hat man zunächst bei einer Auflösung die Strukturfunktion experimentell bestimmt, so lässt sich voraussagen, wie sich die Struktur ändert, wenn die Auflösung beispielsweise verdoppelt wird.

Die Struktur des Protons wird durch die Quarks und Gluonen (allgemein „Partonen“ genannt) bestimmt. Kennt man die Dichteverteilungen der Partonen, so kann man daraus entsprechend die Strukturfunktionen berechnen. Den Experimentalphysikern bleibt nur der umgekehrte Weg: Sie messen die Strukturfunktionen und bestimmen daraus die Partonverteilungsfunktionen, die so genannten PDFs (*parton distribution functions*), die die Dichte der verschiedenen Quarks und der Gluonen im Proton als Funktion des Impulsanteils x bei gegebener Auflösung Q^2 beschreiben.

- Partondichteverteilungen der up-Quarks und Gluonen als Funktion des Impulsanteils x bei zwei verschiedenen Auflösungen Q^2 . Die Gluondichte nimmt mit verbesserter Auflösung bzw. höherem Q^2 dramatisch zu. (Die down-Quarks zeigen ein ganz ähnliches Verhalten wie die up-Quarks.)

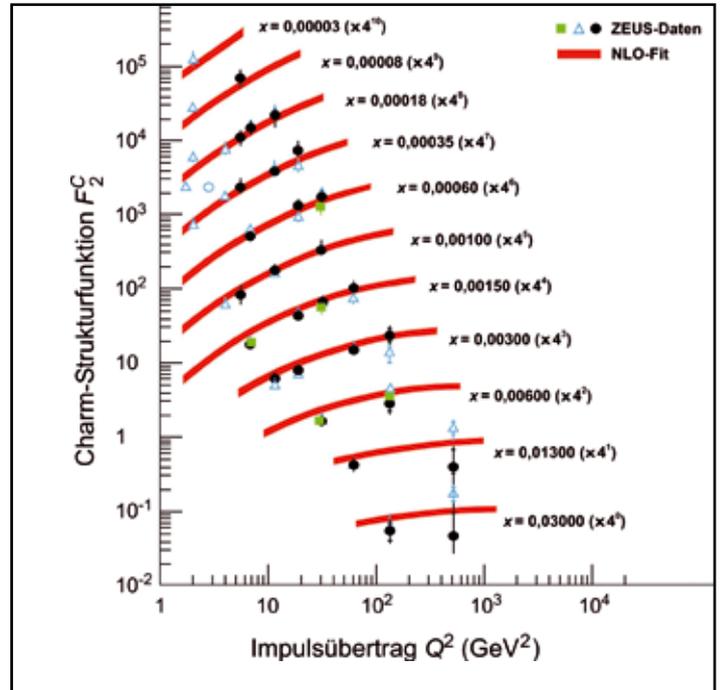
Die hier aufgeführten Strukturfunktionen gelten für Streuprozesse der neutralen Ströme, bei denen zwischen Elektron und Quark ein neutrales Kraftteilchen (ein Photon oder ein Z-Boson) ausgetauscht wird. Dabei wird der dominante Anteil aller Prozesse von der Strukturfunktion F_2 beschrieben. Die Streuprozesse der geladenen Ströme, bei denen die Reaktion über ein geladenes W-Boson erfolgt, lassen sich analog darstellen.

- > Die Strukturfunktion F_2 gibt Aufschluss über die Verteilung der Quarks und Antiquarks im Proton, in Abhängigkeit der Auflösung Q^2 und des Impulsanteils x der betreffenden Quarks und Antiquarks am Gesamtimpuls des Protons. Dabei liefert die Strukturfunktion F_2 ein Gesamtbild der Quarks und Antiquarks im Proton, ohne Unterscheidung zwischen Valenzquarks und Seequarks und -antiquarks (siehe Kasten S. 22).
- > Die Strukturfunktion $x \cdot F_3$ beschreibt den Anteil der schwachen Wechselwirkung, insbesondere die Interferenzeffekte zwischen dem elektromagnetischen Photon und dem Z-Boson der schwachen Wechselwirkung. Diese Strukturfunktion ist deshalb auf ganz andere Partonkombinationen empfindlich als F_2 und hilft, die Struktur des Protons weiter aufzulösen.
- > Die Strukturfunktion F_L spiegelt das Verhalten der Gluonen bei kleinen Impulsanteilen x wider. Ohne Gluonen würde diese Strukturfunktion verschwinden.

HERA ist der einzige Teilchenbeschleuniger weltweit, an dem erstmals alle drei Strukturfunktionen im Detail gemessen werden können. Damit steht den HERA-Physikern das komplette Instrumentarium zur Untersuchung des Protons und der darin wirkenden Kräfte zur Verfügung.



Die Strukturfunktion $F_2^C(x, Q^2)$ des charm-Quarks im Proton als Funktion der Auflösung Q^2 für verschiedene Impulsanteile x . Die Strukturfunktion des charm-Quarks zeigt ein ähnliches Verhalten wie die Strukturfunktion F_2 , die von den leichten up- und down-Quarks bestimmt wird.



Charmante Quarks & Co.

Die Strukturfunktion F_2 beinhaltet alle Arten von Quarks im Proton: die Valenzquarks, die dem Proton seine Identität verleihen, aber auch die zahlreichen Seequarks und -antiquarks, die dank der Heisenberg'schen Unschärferelation für unvorstellbar kurze Zeit als virtuelle Quark-Antiquark-Paare entstehen und wieder verschwinden. Wie H1 und ZEUS entdeckt haben, enthält das Proton dabei nicht nur leichte up-, down- und strange-Quarks. Dank der hohen Auflösung in der zweiten Betriebsphase von HERA konnten die HERA-Physiker im Proton erstmals auch die schweren charm- und bottom-Quarks nachweisen und ihre Strukturfunktionen getrennt vermessen. Dabei zeigte sich, dass die charm-Quarks in manchen Bereichen 20 bis 30 Prozent der Strukturfunktion ausmachen, die bottom-Quarks 0,3 bis 1,5 Prozent. Bei ganz hohen Kollisionsenergien, nämlich dann, wenn selbst die Masse der schweren Quarks keine Rolle mehr spielt, scheint es so, als wenn alle Quarks in gleichem Maße erzeugt werden. Mit der Auswertung der verbleibenden Daten werden die HERA-Physiker diese Ergebnisse weiter präzisieren. Das genaue Verständnis der Erzeugungsmechanismen schwerer Quarks ist insbesondere für das Physikprogramm am LHC-Beschleuniger bei CERN eine wichtige Grundlage.

Nach dem Umbau von HERA zur Erhöhung der Luminosität konnten H1 und ZEUS für ihre Untersuchungen auch longitudinal polarisierte Elektronen und Positronen nutzen. Dadurch erhöhte sich die Empfindlichkeit der beiden HERA-Experimente für die Strukturfunktion $x \cdot F_3$, die Interferenzeffekte zwischen der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung im Proton beschreibt. Diese sind normalerweise nur schwer messbar, ihre Größe wächst jedoch mit der Polarisation der Teilchen – sie werden durch die Polarisation regelrecht herauskristallisiert. Damit bot sich den HERA-Physikern ein willkommenes Zusatzwerkzeug zur weiteren Aufdeckung der Partonstruktur des Protons.

Kurz vor Ende der Betriebszeit von HERA wurde der Beschleuniger schließlich einige Monate mit niedrigeren Protonenenergien von 460 und 575 GeV anstelle der üblichen 920 GeV betrieben. Messungen bei unterschiedlichen Kollisionsenergien, aber ansonsten gleichen kinematischen Verhältnissen, filtern explizit die Beiträge der dritten Strukturfunktion F_L heraus, die Aufschluss über das Verhalten der Gluonen bei kleinen Impulsanteilen x gibt. Diese einzigartige Messung ist für das Verständnis der QCD, der Theorie der starken Kraft, außerordentlich wichtig. Bisher mussten an dieser Stelle relativ willkürliche Annahmen in die Interpretation der Messdaten einfließen.

CRASH KURS.

Die rätselhafte Diffraktion

Bald nach dem Start von HERA erwartete die Physiker eine weitere Überraschung: Bei Kollisionen mit höchsten Impulsüberträgen wird mit aller Wucht ein Quark aus dem Proton herausgeschlagen – dabei sollten die Protonen eigentlich auseinanderbrechen und in eine Vielzahl neuer Teilchen zerbersten. In etwa 10 bis 15 Prozent der Fälle bleibt das Proton trotz der Heftigkeit der Kollision jedoch völlig intakt. Das ist ungefähr so, als hinterließen 15 Prozent aller Frontalzusammenstöße keine Schrammen an Autos!

Bei kleinen Energien waren solche Phänomene wohl bekannt und wurden allgemein mit den eigens entwickelten Mitteln der diffraktiven Physik beschrieben. Als Hilfsmittel diente dabei ein so genanntes Pomeron, ein hypothetisches neutrales Teilchen ohne große Struktur und besonderes Eigenleben mit den Quantenzahlen des Vakuums. Bei HERA zeigten frühe Messungen jedoch, dass sich das Bild dieses Pomerons einfach nicht halten ließ, zudem war es theoretisch unbefriedigend. Bei großen Impulsüberträgen – im Bereich der so genannten harten Diffraktion – versagte es vollständig. Welcher Mechanismus führt also zu dieser merkwürdigen Beobachtung?

Im Rahmen der QCD, der Theorie der starken Kraft, müssen mindestens zwei Gluonen an der diffraktiven Wechselwirkung beteiligt sein, weil diese andernfalls nicht farbneutral sein könnte, wie es im Experiment beobachtet wird. Hat dieses Phänomen also womöglich mit dem hohen Anteil von Gluonen im Proton bei kleinen x zu tun? Sobald ausreichend Daten zu diesen spektakulären Ereignissen zur Verfügung standen, versuchten die Experimentalphysiker von H1 und ZEUS eine Strukturanalyse, wie sie sie bei der einfachen Elektron-Proton-Streuung durchgeführt hatten. Das Ergebnis war eindeutig: Der farbneutrale Austausch wird von Gluonen dominiert.

Als Folge dieser Beobachtungen entwickelte sich eine ganze Industrie zur Beschreibung der harten Diffraktion. Die Auswertungen und Interpretationsversuche sind immer noch im vollen Gang. Auch wenn es bereits erste Erfolge gibt, sind die Ergebnisse noch nicht von Grund auf verstanden. Ein umfassendes Verständnis der QCD sollte auch diese Messdaten erklären können. Umso wichtiger ist es, dass die HERA-Daten gerade in diesem Bereich in alle denkbaren Richtungen ausgewertet werden, um die theoretischen Interpretationen entsprechend überprüfen zu können.



Farbige Quarks

Im Standardmodell wird die starke Kraft durch eine abstrakte Teilcheneigenschaft namens Farbladung verursacht. Quarks z.B. tragen die Farben rot, grün und blau, Antiquarks antirot, antigrün und antiblau. Beobachtet werden allerdings nur farbneutrale Verbände: Teilchen aus drei Quarks mit den drei Farben rot, grün und blau, wie z.B. das Proton, oder Quark-Antiquark-Kombinationen mit einer Farbe und der jeweiligen Antifarbe. Nur solche farblosen Verbände existieren als freie Teilchen – bisher wurde noch nie ein einzelnes farbiges Teilchen nachgewiesen.



Allen Caldwell ●

1987 fing der Teilchenphysiker Allen Caldwell, heute Direktor am Max-Planck-Institut für Physik in München, beim ZEUS-Experiment an, dessen Sprecher er von 1997 bis 1999 wurde. Mit seinen verschiedenen MPI-Gruppen ist er auch weiterhin an der HERA-Physik beteiligt.

Ich finde die HERA-Ergebnisse absolut faszinierend – sie haben zu einem radikal neuen Bild der Materie bei kurzen Abständen geführt. Wir sehen jetzt, dass die Physik bei kurzen Abständen und kleinen x , was kurzen Zeitfluktuationen entspricht, von den Gluonen dominiert wird. Die extrem hohe Dichte der Gluonen führt zu neuen und zuvor unerwarteten Effekten, wie zum Beispiel einer großen Rate von diffraktiven Prozessen selbst bei hohen Q^2 . Die HERA-Daten sind einerseits einfach in ihrem Verhalten, führen aber zu tiefgründigen Fragen über die grundlegende Struktur der Materie. Das theoretische Verständnis befindet sich noch in der Entwicklung, ich schätze jedoch, dass es radikal neue Wege eröffnen wird, die Materie bei kurzen Abständen zu verstehen.

Durch die HERA-Daten angeregt, diskutieren die Theoretiker heute die mögliche Existenz eines „Farb-Glas-Kondensats“ (*color glass condensate*) als grundlegende Struktur im Herzen aller Materie. Andere diskutieren einen möglichen tief gehenden Zusammenhang zwischen diffraktiven Prozessen und Gravitationswechselwirkungen und sehen Verbindungen zwischen Stringtheorien und supersymmetrischen Versionen der QCD. Die wichtigsten Ergebnisse von HERA – die Beobachtungen des starken Anstiegs der Strukturfunktionen bei kleinen x und des großen diffraktiven Wirkungsquerschnitts – stellen daher den Beginn eines völlig neuen Verständnisses der Natur dar, und das ist wirklich aufregend.

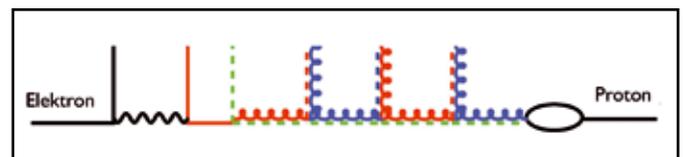
Zu den andauernden theoretischen Entwicklungen kommen derzeit ernsthafte Diskussionen über Ideen zu weiterführenden Experimentierprogrammen hinzu. Diese könnten die Tragweite der HERA-Daten erweitern und uns damit womöglich noch dichter an ein neues Paradigma im Verständnis der Natur heranführen.



Eine Frage der Perspektive

Die Elektron-Proton-Wechselwirkungen bei HERA lassen sich unterschiedlich interpretieren. Beim Standardansatz wird das Elektron als Sonde betrachtet, welche die Struktur des Protons sichtbar macht. Genauso gut kann man jedoch das Elektron als Träger der Struktur betrachten.

Die Abbildung stellt zum Beispiel die Streuung eines Elektrons an einem Proton bei sehr hohen Energien dar. Die durchgehende Linie links steht für das Elektron, das Oval rechts für das Proton. Ebenfalls eingezeichnet sind ein Photon (Wellenlinie), Quarks (rote und grün gestrichelte Linie) und Gluonen (zweifarbige Spirallinien).



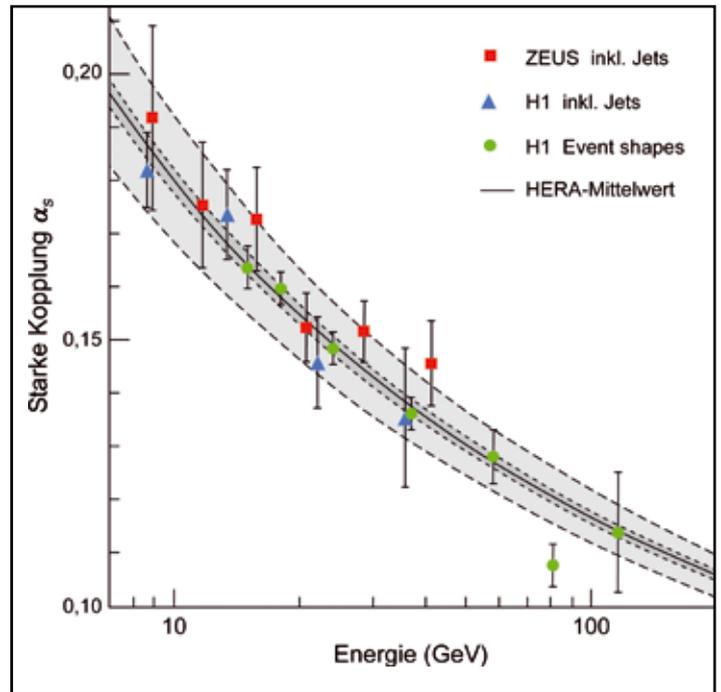
Man kann die Streuung nun folgendermaßen betrachten: Das Elektron strahlt ein Photon ab, welches an einem Quark, das aus dem Proton stammt, streut. Das Quark ist das Endprodukt einer langen Kette virtueller Strahlungen, die überwiegend aus Gluonen besteht.

Der Streuprozess lässt sich jedoch auch wie folgt sehen: Das Elektron strahlt ein Photon ab, welches sich in ein Quark und ein Antiquark aufspaltet. Eines der beiden strahlt eine Kette virtueller Gluonen ab, von denen eines mit dem Proton in Wechselwirkung tritt. Zu welchem Teilchen die Strahlungskette gehört, lässt sich nicht auf eindeutige Weise bestimmen. Die Beobachtung, dass sich die Dichte der Partonen bei steigender Energie verändert, hängt von den grundlegenden Eigenschaften der starken Wechselwirkungen in kürzesten Zeitintervallen ab – nicht von der Strahlungsquelle. Der bei HERA beobachtete steile Anstieg der Strukturfunktionen spiegelt somit eine grundlegende und universelle Eigenschaft der Natur wider – die „Wolke“ virtueller Quarks und Gluonen im Herzen aller Materie. Gegenwärtig gibt es kein theoretisches Verständnis dieser fundamentalen Struktur. Ihre Erforschung könnte letztlich einen revolutionären Paradigmenwechsel in der Beschreibung der starken Wechselwirkung herbeiführen.

KRÄFTE MESSEN.

Die Grundkräfte der Natur

Der Rolle des Mikrolabors zur Untersuchung der QCD wurde das Proton bei HERA an anderer Stelle gerecht. Eine besondere Eigenschaft der starken Kraft ist ihr ungewöhnliches Verhalten in Abhängigkeit des Abstands zwischen den Teilchen: Im Gegensatz zur elektromagnetischen Wechselwirkung, die bei zunehmendem Abstand immer schwächer wird, verhält es sich bei der starken Kraft genau andersherum. Nur wenn sich die Quarks besonders dicht beieinander befinden, ist die Kraft zwischen ihnen schwach – ein Zustand, der „asymptotische Freiheit“ genannt wird. Bei zunehmendem Abstand zwischen den Quarks wird die Kraft zwischen ihnen dagegen immer stärker. Die Quarks sind also quasi im Proton eingesperrt, und niemand hat bisher ein freies Quark beobachtet. Zwar wurde die starke Kopplungskonstante – ein Maß für die Stärke der Kraft – in Abhängigkeit vom Abstand auch von anderen Experimenten gemessen, doch konnten H1 und ZEUS das besondere Verhalten der Kopplungskonstanten erstmals über einen weiten Energiebereich hinweg durchgängig in einem einzelnen Experiment nachweisen. Damit bestätigen die HERA-Ergebnisse eindrucksvoll das 20 Jahre zuvor von den Physikern David Gross, David Politzer und Frank Wilczek vorhergesagte Verhalten der starken Kraft – eine Entdeckung, für die Gross, Politzer und Wilczek im Jahr 2004 mit dem Nobelpreis für Physik geehrt wurden.

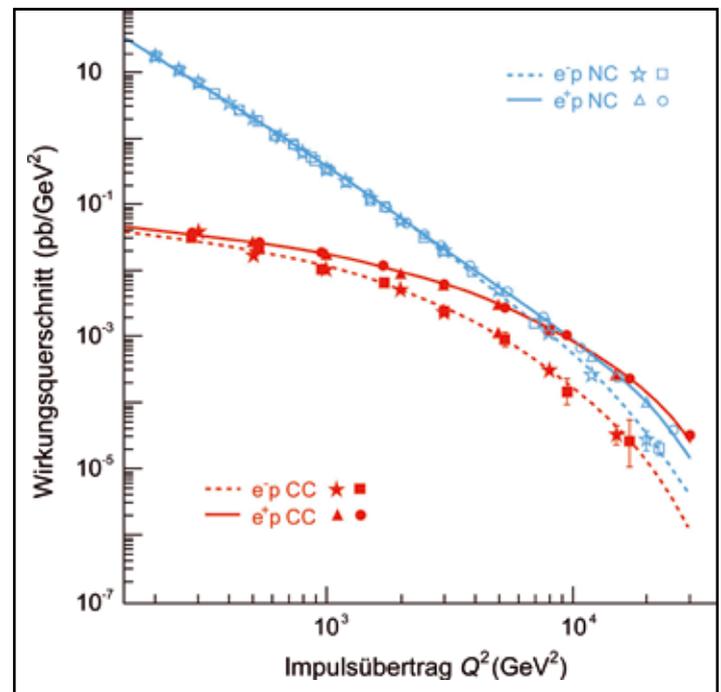


- Die Abhängigkeit der starken Kopplungskonstanten α_s von der Energie im Vergleich zur Erwartung der Quantenchromodynamik. Bei großen Impulsüberträgen (kleinen Abständen) wird die starke Kraft immer schwächer (asymptotische Freiheit).

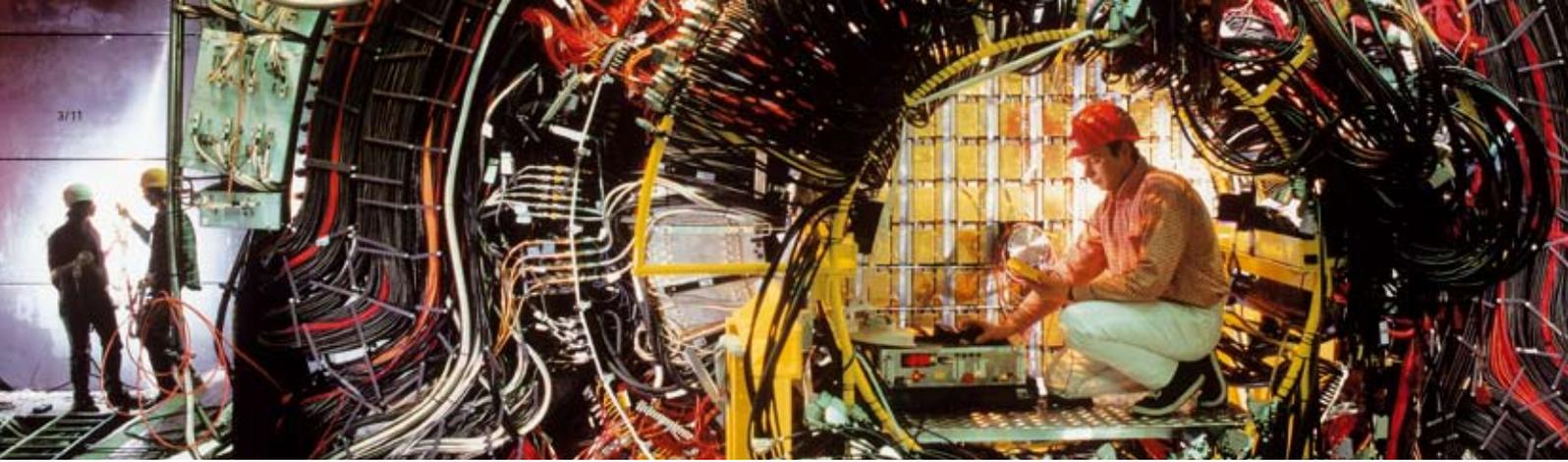
Die elektroschwache Kraft

Obwohl HERA vorrangig für die Untersuchung der starken Wechselwirkung ausgelegt ist, lassen sich mit den hochenergetischen Elektron-Proton-Kollisionen auch die anderen Naturkräfte gezielt unter die Lupe nehmen. So war das Ziel, die elektroschwache Kraft im Detail zu untersuchen, bereits im HERA-Bewilligungsantrag enthalten.

H1 und ZEUS konnten unter anderem die Häufigkeit messen, mit der Reaktionen der so genannten neutralen Ströme (elektromagnetische und schwache Kraft) und geladenen Ströme (schwache Kraft) als Funktion des Minimalabstands der Teilchen beim Zusammenstoß in den HERA-Detektoren auftreten (siehe Kasten S. 21). Bei niedrigen Energien, also größeren Abständen, treten die elektromagnetischen Streuprozesse wesentlich häufiger auf als die schwachen, da die elektromagnetische Kraft bei diesen Abständen viel stärker wirkt als die schwache Kraft. Bei kleineren Abständen und entsprechend hohen Energien dagegen sind beide Reaktionen etwa gleich häufig, d.h. beide Kräfte gleich stark. Dieses Verhalten ist eine wichtige Eigenschaft der elektroschwachen Kraft, zu der sich die beiden Kräfte bei sehr hohen Energien vereinen. H1 und ZEUS beobachteten damit unmittelbar die Auswirkungen der elektroschwachen Vereinheitlichung, wie sie als erster Schritt auf dem Weg zur großen Vereinheitlichung der Grundkräfte der Natur theoretisch vorhergesagt wurde.



- Die Reaktionsquerschnitte des neutralen Stroms (blau, elektromagnetische und schwache Wechselwirkung) und des geladenen Stroms (rot, rein schwache Wechselwirkung) als Funktion des Impulsübertrags Q^2 für Elektron-Proton- und Positron-Proton-Streuung. Die Reaktionsraten werden bei hohen Impulsüberträgen vergleichbar.

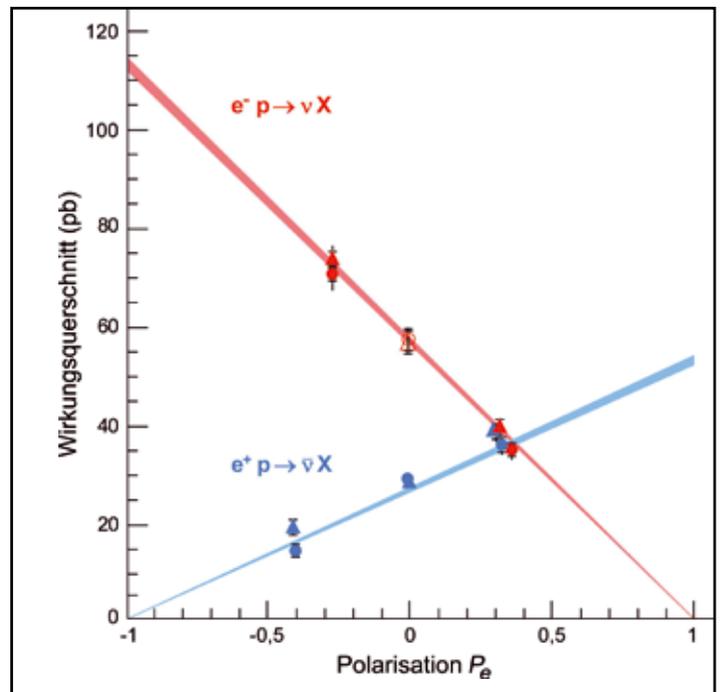


Rechtshändige Neutrinos verboten

Die longitudinale Polarisation der Elektronen in der zweiten Betriebsphase von HERA eröffnet auch bei der Untersuchung der elektroschwachen Kraft neue Möglichkeiten. So konnten H1 und ZEUS die geladenen Ströme als Funktion der verschiedenen Polarisationszustände messen und damit beweisen, dass in der Natur selbst bei den sehr hohen Energien von HERA keine rechtshändigen Ströme vorkommen: Da in der Natur nur linkshändige, also entgegen der Flugrichtung polarisierte Neutrinos existieren, sollte die Umwandlung eines rechtshändigen, in Flugrichtung polarisierten Elektrons über die schwache Wechselwirkung in ein rechtshändiges Neutrino verboten sein. So sagt es die Theorie der schwachen Wechselwirkung voraus, und das umgekehrte Verhalten wurde bereits in früheren Experimenten der Neutrinostreuung nachgewiesen, bei denen ein Neutrino über die schwache Wechselwirkung in ein Elektron umgewandelt wird.

Mit den geladenen Strömen beobachten H1 und ZEUS nun den komplementären Prozess, die inverse Neutrinostreuung (siehe Kasten S. 21 unten; die Neutrinostreuung erhält man, wenn man die Grafik des geladenen Stroms nicht von links nach rechts, sondern umgekehrt von rechts nach links betrachtet). Wie die HERA-Messungen zeigen, verschwindet der Wirkungsquerschnitt tatsächlich für rechtshändige Elektronen (und entsprechend linkshändige Positronen). Damit konnten die HERA-Experimente diese zentrale Vorhersage der Theorie der schwachen Wechselwirkung auch bei den hohen Energien von HERA glänzend bestätigen.

In der zweiten Betriebsphase konnten die HERA-Physiker auch erste Bestimmungen der Kopplung des Z-Bosons, des neutralen Austauschteilchens der schwachen Wechselwirkung, an die up- und down-Quarks im Proton durchführen. Diese ersten Daten ergänzen die Messungen des LEP-Beschleunigers bei CERN und werden mit größerer Statistik in Zukunft noch einmal einen Prüfstein des Standardmodells darstellen.



- Die Wirkungsquerschnitte von Streuprozessen des geladenen Stroms als Funktion der Polarisation der Elektronen und Positronen. Für Elektronen (rot) sind die Reaktionsraten für negative, linkshändige Polarisation größer als für positive, rechtshändige Polarisation. Bei der Extrapolation zu komplett rechtshändigen Elektronen, $P_e = +1$, verschwinden die Ereignisraten. Bei Positronen beobachtet man das entgegengesetzte Verhalten, der Wirkungsquerschnitt geht bei linkshändiger Polarisation gegen null.

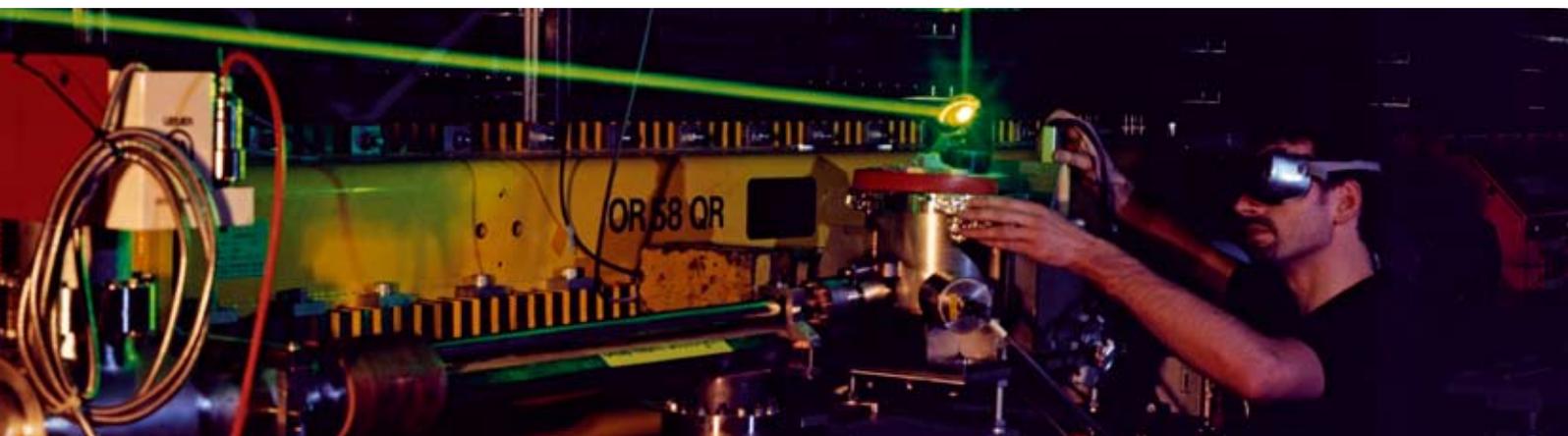
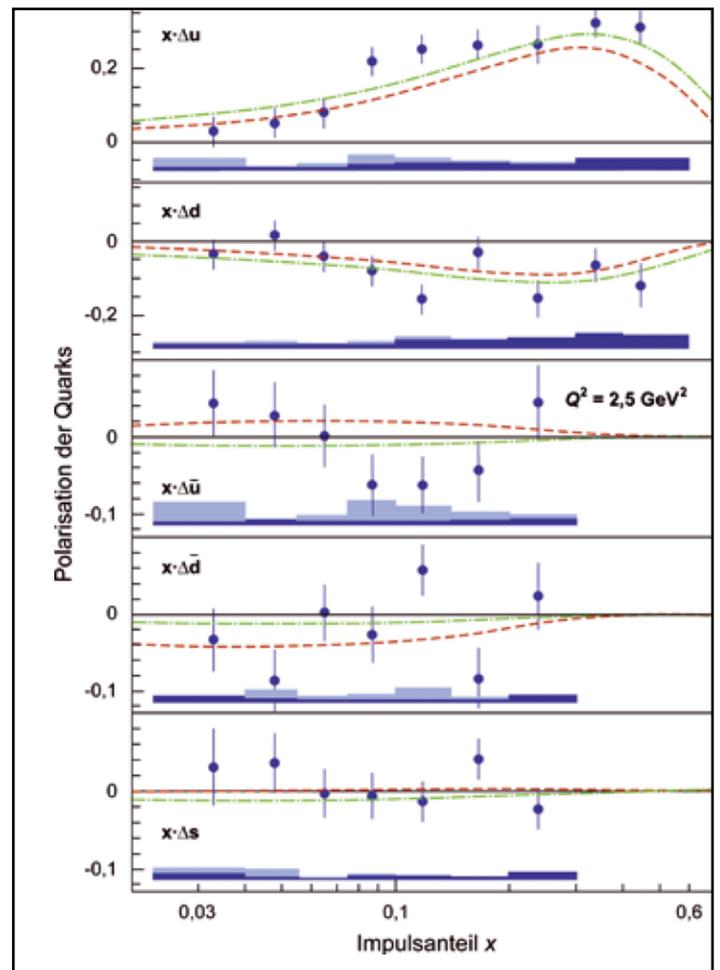
DREH ZAHL.

Der Spin der Nukleonen

Einen weiteren, wichtigen Beitrag zum Gesamtbild des Protons liefert das dritte HERA-Experiment HERMES, das den Ursprung des Nukleonenspins erforscht, also des Spins der Protonen und Neutronen. Wie Experimente an den Forschungszentren CERN und SLAC Mitte der 1980er Jahre herausgefunden hatten, liefern die drei Hauptbestandteile des Nukleons, die Valenzquarks, insgesamt nur etwa ein Drittel des Gesamtspins. Wo die restlichen zwei Drittel herkommen, untersuchen die HERMES-Physiker, indem sie die longitudinal polarisierten Elektronen beziehungsweise Positronen des HERA-Speicherrings durch eine mit Gas gefüllte Zelle leiten, wo die Teilchen mit den ebenfalls longitudinal polarisierten Atomen des Gases zusammenstoßen. Da die Art und Häufigkeit der Zusammenstöße von der Polarisation der Nukleonenbestandteile abhängen, lässt sich anhand der beobachteten Teilchenreaktionen herausfinden, wo der Spin des Nukleons eigentlich herkommt.

Seine ursprüngliche Aufgabe, nämlich die Beiträge der verschiedenen Sorten von Quarks zum Spin des Nukleons einzeln zu vermessen, hat HERMES bereits in der ersten Betriebsphase von HERA brillant gemeistert. Anhand von Messungen an longitudinal polarisierten Gasen gelang es den HERMES-Physikern weltweit zum ersten Mal, die Beiträge der up-, down- und strange-Quarks zum Nukleonenspin modellunabhängig getrennt voneinander zu bestimmen.

Helizitätsverteilungen der up-, down- und strange-Quarks als Funktion von x für ein festes Q^2 . Wie die Messdaten belegen, zeigen die Spins der up-Valenzquarks in die gleiche Richtung wie der Gesamtspin des Nukleons, die Spins der down-Valenzquarks in die entgegengesetzte Richtung. Die Polarisationen der Seequarks sind alle mit null verträglich.





Aufbauarbeiten im Inneren des HERMES-Detektors: Der polarisierte Elektronenstrahl von HERA trifft zunächst rechts außerhalb des Bilds auf die Targetzelle, in der die Elektronen mit den ebenfalls polarisierten Gasatomen zusammenstoßen. Die dabei entstehenden Teilchen und das gestreute Elektron durchqueren den HERMES-Detektor von rechts nach links und werden in den verschiedenen Detektorkomponenten nachgewiesen. Hinter den beiden spiegelnden Folien auf der linken und rechten Seite befinden sich mit Gas gefüllte Drahtkammern, mit deren Hilfe die Spuren der Teilchen rekonstruiert werden. Die aluminiumbeschichteten Folien, die diese Kammern luftdicht verschließen, bestehen aus dem Material Mylar, das zum Beispiel auch in Raumanzügen oder Rettungsdecken Verwendung findet.

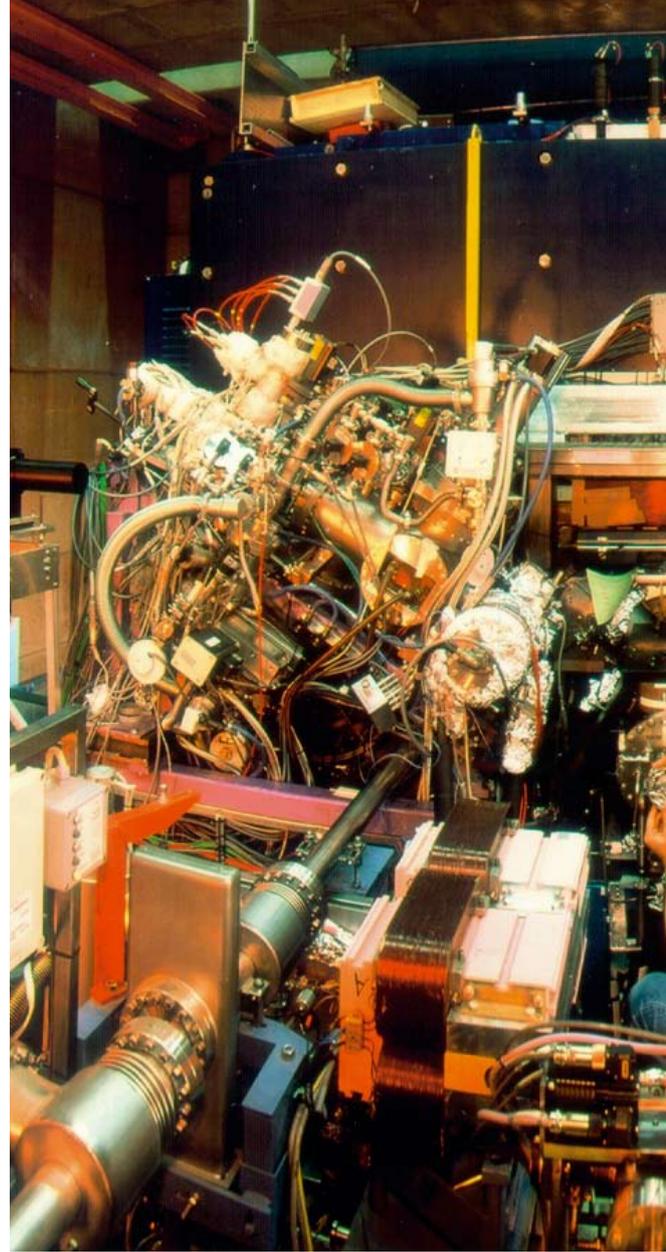
Laser-Polarimeter im HERA-Tunnel: Der grüne Laserstrahl wird im Betrieb von HERA innerhalb des Strahlrohrs gegen den Elektronenstrahl geführt, um zu ermitteln, wie gut die Elektronen polarisiert sind. Hier befindet sich der Laserstrahl für Justierungsarbeiten außerhalb des Strahlrohrs.

Dabei stellte sich heraus, dass die Valenzquarks den größten Anteil beisteuern. Die up-Quarks leisten einen positiven Beitrag zum Gesamtspin, da ihr Spin vorzugsweise in Richtung des Nukleonenspins zeigt, die down-Quarks einen negativen Beitrag. Die Polarisation der Seequarks ist dagegen verschwindend gering – ein besonders wichtiges Ergebnis, da frühere Experimente unter der Annahme, dass sich alle Quarksorten im Nukleon dynamisch gleich verhalten, von einem bedeutenden Beitrag der strange-Quarks ausgegangen waren, der die Beiträge der Valenzquarks teilweise aufheben sollte. Die HERMES-Ergebnisse zeigen nun, dass die Beiträge der Seequarks allesamt gering sind – für eine solche Aufhebung gibt es keinerlei Anzeichen. Die HERMES-Messungen beweisen, dass die Spins der Quarks weniger als die Hälfte des Nukleonenspins erzeugen, und dass dieser Beitrag hauptsächlich von den Valenzquarks herrührt. Damit gelang HERMES ein erster, entscheidender Schritt auf dem Weg zur Lösung des Spinrätsels.

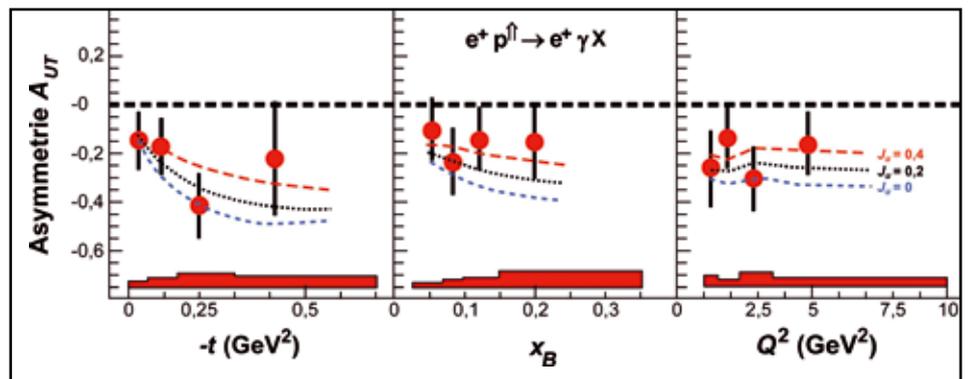
Die letzten Teile des Spinnrätels

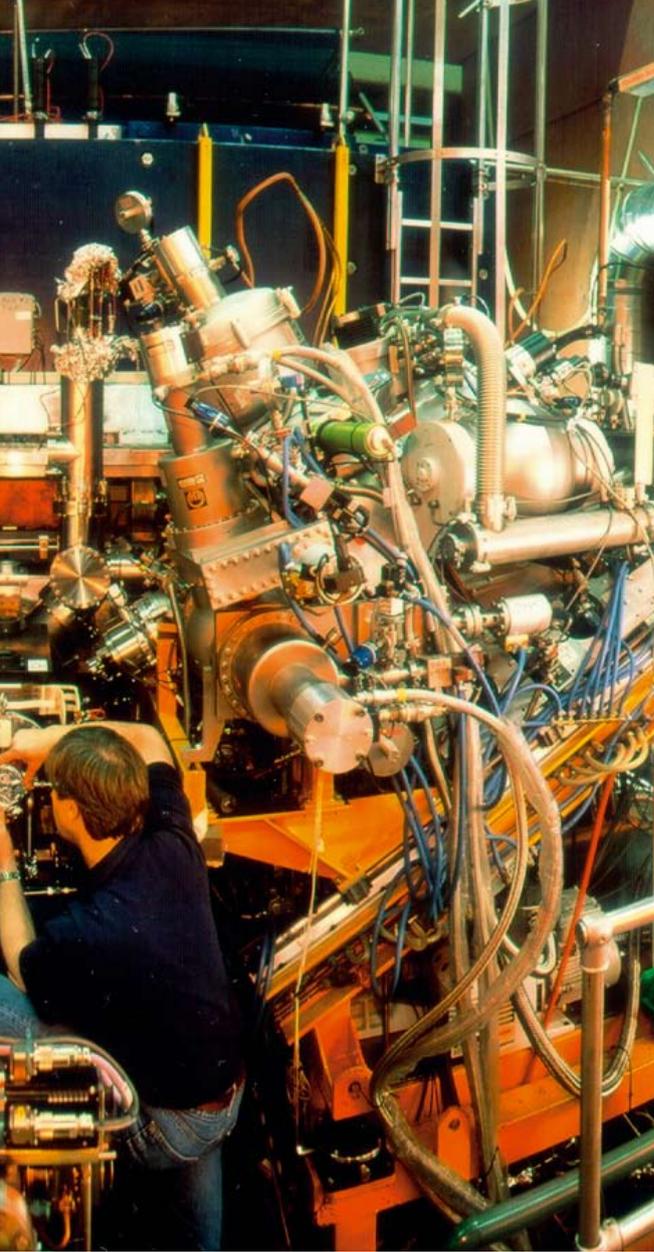
Nach der Untersuchung der Quarkspins richtet sich das Augenmerk der Physiker jetzt auf den Spin der Gluonen und auf die Bahndrehimpulse der Quarks und Gluonen, die ebenfalls zum Nukleonenspin beitragen können. Den HERMES-Physikern gelang dabei eine der ersten Messungen mit dem direkten Hinweis, dass die Gluonen einen kleinen, aber positiven Beitrag zum Gesamtspin leisten – genaueres wird die Analyse der letzten Daten zutage fördern. Der Bahndrehimpuls der Quarks im Nukleon entzog sich bis vor kurzem jeder experimentellen Überprüfung. Neueste theoretische Überlegungen auf der Grundlage der so genannten verallgemeinerten Partonverteilungen (GPD, *generalized parton distributions*) haben jedoch Wege aufgezeigt, wie man den Beitrag dieser Bahndrehimpulse tatsächlich bestimmen kann. In der zweiten Betriebsphase von HERA führten die HERMES-Physiker deshalb Messungen an transversal, also senkrecht zur Flugrichtung der Elektronen polarisierten Wasserstoffgasen durch, anhand derer sich diese letzten Aspekte des Spinnrätels erforschen lassen.

Genauere Einblicke liefern dabei so genannte exklusive Reaktionen, in denen das mit dem Elektron zusammenstoßende Nukleon nicht auseinanderbricht, sondern in seinem Grundzustand bleibt. Bei HERMES lässt sich eine Vielzahl von verschiedenen Messungen mit unterschiedlichen exklusiven Endzuständen durchführen, die Aufschluss über den Gesamtbahndrehimpuls der Quarks im Nukleon geben. So konnten die HERMES-Physiker an einem transversal polarisierten Target mit Hilfe der tief-virtuellen Compton-Streuung (DVCS, *deeply virtual Compton scattering*), die im Jahr 2001 von H1, ZEUS und HERMES sowie dem CEBAF *Large Angle Spectrometer* am Jefferson Lab zum ersten Mal experimentell nachgewiesen wurde, eine erste modellabhängige Berechnung des Gesamtbahndrehimpulses der up-Quarks vorstellen. Anhand von 2006-2007 durchgeführten Messungen mit einem neuen Rückstoßdetektor wird das HERMES-Team das Wissen über DVCS noch weiter verfeinern und somit einen entscheidenden Beitrag dazu leisten, die verallgemeinerten Partonverteilungen (GPDs) noch besser zu bestimmen – in der Hoffnung, damit in naher Zukunft den Gesamtbahndrehimpuls der up-Quarks ermitteln zu können.



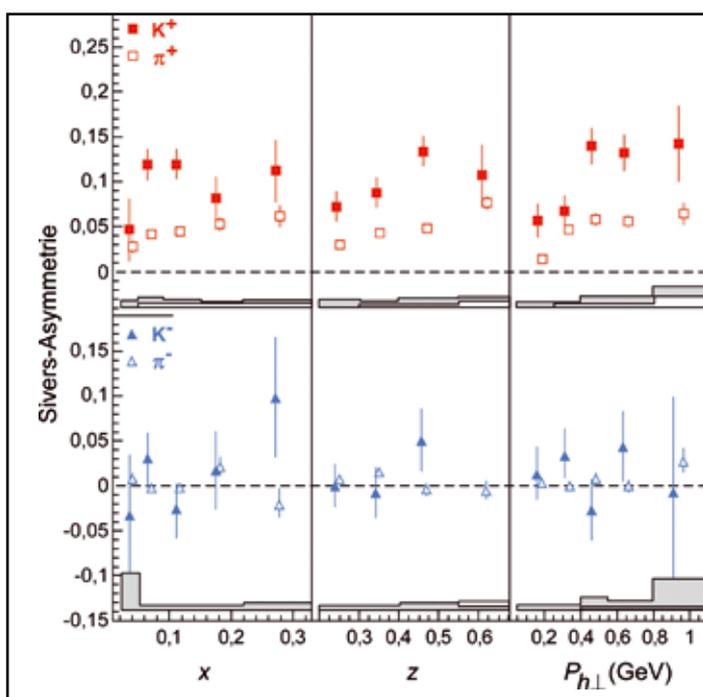
Transversale Target-Spin-Asymmetrie der tief-virtuellen Compton-Streuung im Vergleich mit verschiedenen theoretischen Vorhersagen für unterschiedliche Werte des Gesamtdrehimpulses J_U der up-Quarks bei festem Gesamtdrehimpuls der down-Quarks $J_D = 0$. Dabei handelt es sich um die erste modellabhängige Bestimmung des Gesamtbahndrehimpulses der up-Quarks.





Allgemein kann das Nukleon durch Partonverteilungsfunktionen (PDFs, siehe S. 24) beschrieben werden, die Auskunft darüber geben, wie häufig sich die Bausteine des Nukleons in einem bestimmten Zustand befinden. Dabei gibt es drei grundlegende Quarkverteilungen: die Quarkdichte, die von H1 und ZEUS mit höchster Genauigkeit gemessen wurde; die Helizitätsverteilung, die von HERMES an longitudinal polarisierten Wasserstoff- und Deuteriumgasen bestimmt wurde; und die Transversitätsverteilung, die die Differenz zwischen den Wahrscheinlichkeiten beschreibt, in einem transversal polarisierten Nukleon Quarks mit dem Spin in Richtung des Nukleonenspins und in entgegengesetzte Richtung zum Nukleonenspin zu finden. Anhand der Messungen an transversal polarisiertem Wasserstoff können die HERMES-Physiker nun erstmals diese Transversitätsverteilung bestimmen. Ebenso erhalten sie Zugang zur so genannten Sivers-Funktion, die die Verteilung unpolarisierter Quarks in einem transversal polarisierten Nukleon beschreibt. Da die Sivers-Funktion für Quarks mit verschwindendem Bahndrehimpuls gleich null sein sollte, stellt ihre Messung einen weiteren wichtigen Schritt zur Erforschung der Bahndrehimpulse im Nukleon dar. Wie die Auswertung der ersten Daten zeigt, scheint die Sivers-Funktion deutlich positiv zu sein – ein Hinweis, dass die Quarks im Nukleon tatsächlich einen nicht verschwindenden Bahndrehimpuls besitzen.

Zwar richtet sich das Hauptaugenmerk von HERMES auf den Spin der Nukleonen, doch das gesamte Physikprogramm reicht weit darüber hinaus. So untersuchen die HERMES-Physiker anhand von Messungen an unpolarisierten Gasen, wie Hadronen – also Teilchen, die aus Quarks bestehen –, genau gebildet werden, wie sich Quarks in Kernmaterie fortbewegen oder ob es exotische Zustände aus fünf Quarks, so genannte Pentaquarks, gibt. Die Auswertung der bis Sommer 2007 aufgezeichneten Daten wird auch in diesen Bereichen neue und einmalige Einsichten ins Proton und die Wirkungsweise der starken Kraft liefern.



● Sivers-Asymmetrie für positive und negative Kaonen und Pionen als Funktionen von x , dem Energieanteil z und dem Transversalimpuls des Kaons bzw. Pions. Das positive Sivers-Signal für π^+ und K^+ ist das erste Anzeichen dafür, dass die Quarks im Nukleon einen nicht verschwindenden Bahndrehimpuls besitzen.

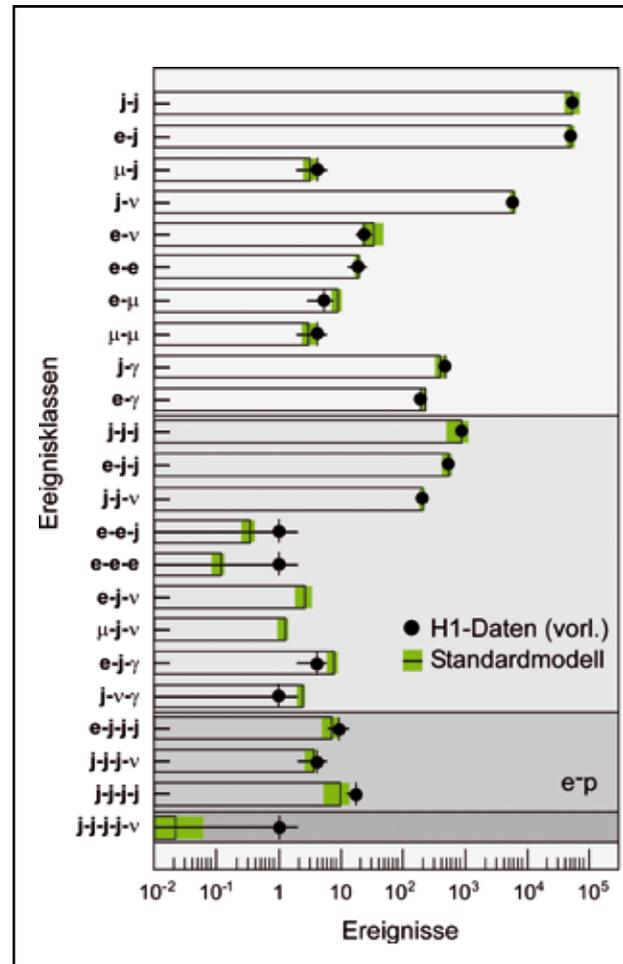
Das Standardmodell auf dem Prüfstand

Nach dem Umbau zur Erhöhung der Luminosität in den Jahren 2000 bis 2001 konnten die HERA-Experimente in der zweiten Betriebsphase das hohe Auflösungsvermögen des Super-Elektronenmikroskops voll ausschöpfen. Denn eigentlich sind Teilchenkollisionen in dem Bereich höchster Impulsüberträge, also höchster Auflösung, vergleichsweise selten. Genau dort, an den bekannten Grenzen des Standardmodells, sollten sich jedoch neue Effekte jenseits der gängigen Teilchentheorie bemerkbar machen.

Dank der gesteigerten Trefferrate gibt es hier nun ebenfalls mehr Kollisionereignisse, so dass die HERA-Physiker auch diesen Bereich statistisch untermauert mit hoher Genauigkeit ausloten können. Dabei zeigen sich bisher keine signifikanten Abweichungen vom Standardmodell – die HERA-Experimente können somit die Gültigkeitsgrenzen des Standardmodells weit hinausschieben und den möglichen Phasenraum für neue Phänomene, neue Teilchen oder Wechselwirkungen immer mehr einschränken. Dabei verfeinern sie die Kenntnis des Standardmodells immer weiter bis zu den höchsten Impulsüberträgen. Ob bei der Frage nach einer möglichen Ausdehnung oder einer Unterstruktur der Quarks, der Suche nach Extra-Dimensionen des Raumes oder der Untersuchung von Leptoquarks oder R-paritätsverletzenden SUSY-Teilchen – die HERA-Physiker können dabei teilweise modellunabhängiger vorgehen und bessere Grenzen erreichen als ihre Mitstreiter an anderen großen Beschleunigern wie LEP in Genf oder Tevatron in Chicago.



Modellunabhängige Analyse zur Suche nach Abweichungen vom Standardmodell bei höchsten Impulsüberträgen. Dargestellt ist eine Vielzahl von Ereignisklassen mit Kombinationen aus Jets, Elektronen, Myonen, Photonen und Neutrinos. Die beobachteten Ereignisraten für Elektron-Proton-Streuung (links) und Positron-Proton-Streuung (rechts) stimmen hervorragend mit den Erwartungen des Standardmodells überein.



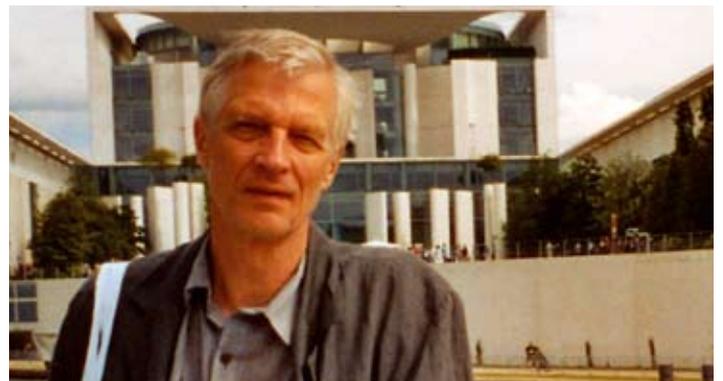
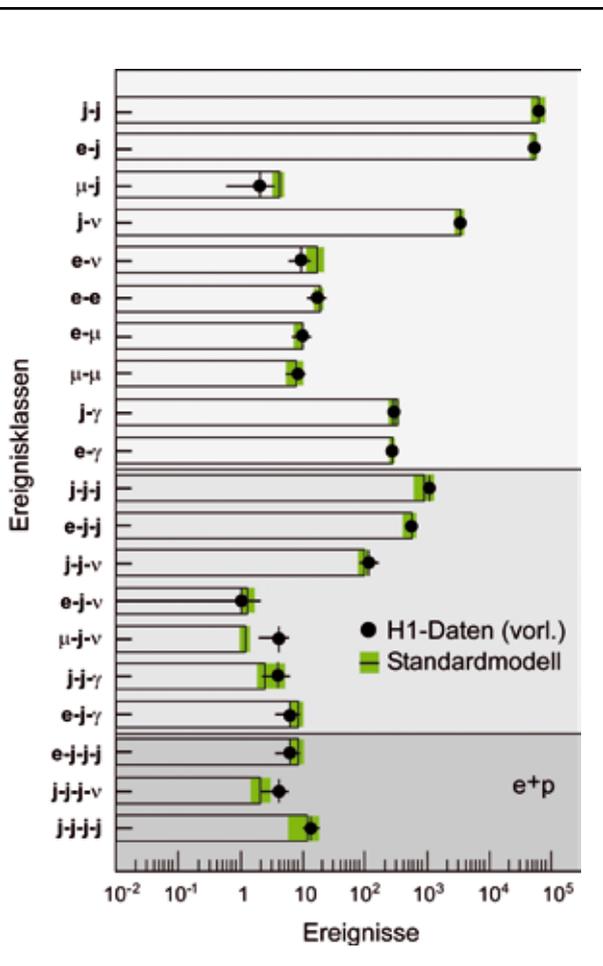


Hans-Ulrich Martyn ●

Eigentlich sollte Hans-Ulrich Martyn von der RWTH Aachen 1974 nur für ein paar Jahre als Postdoc nach Hamburg gehen – nun sind daraus mehr als drei Jahrzehnte geworden. Vom DORIS-Experiment DASP über TASSO am PETRA-Beschleuniger kam Martyn schließlich zu HERA, genauer gesagt zum H1-Experiment, an dem er seit den ersten Vorbereitungen bis heute beteiligt ist. 2007 geht er mit HERA zusammen in den Ruhestand – doch natürlich wird er die Weiterentwicklung der Teilchenphysik auch in Zukunft mit Spannung verfolgen.

Ich möchte unbedingt wissen, wo die Grenzen des bisher so erfolgreichen Standardmodells liegen: Sind Quarks tatsächlich punktförmig oder haben sie eine innere Struktur, eine weitere Lage von Präonen? Gehören Quarks und Elektronen einer größeren Familie an, dann sollten Leptoquarks existieren. Gibt es supersymmetrische Partner der Quarks? Und, total verrückte Vorstellung, gibt es weitere räumliche Dimensionen bei atomaren Ausdehnungen, wodurch die Gravitation direkten Einfluss auf die Teilchenphysik nehmen könnte?

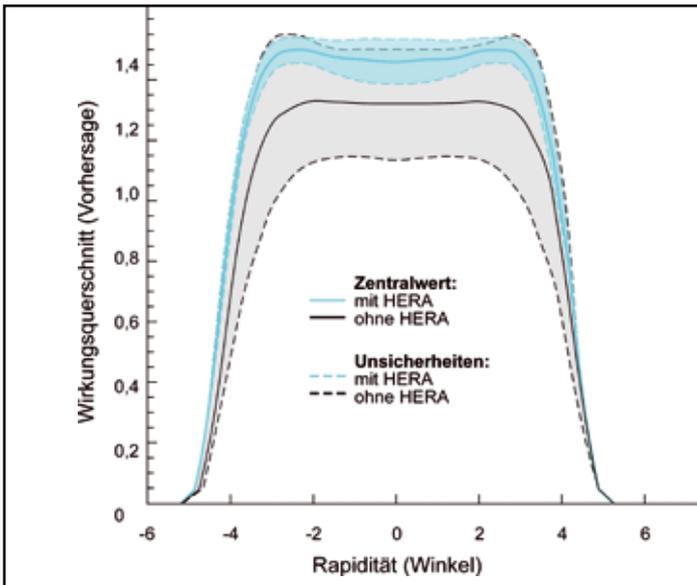
Leider haben wir bei HERA keine Anzeichen für diese revolutionären Ideen gefunden, von denen einige zum Verständnis der Vereinheitlichung der Kräfte bei extrem hohen Energieskalen eine Rolle spielen könnten. Zukünftige Experimente am LHC bei CERN und am Internationalen Linearcollider ILC werden entscheiden, ob und in welche Richtung das Standardmodell erweitert werden muss. Das wird unglaublich spannend.



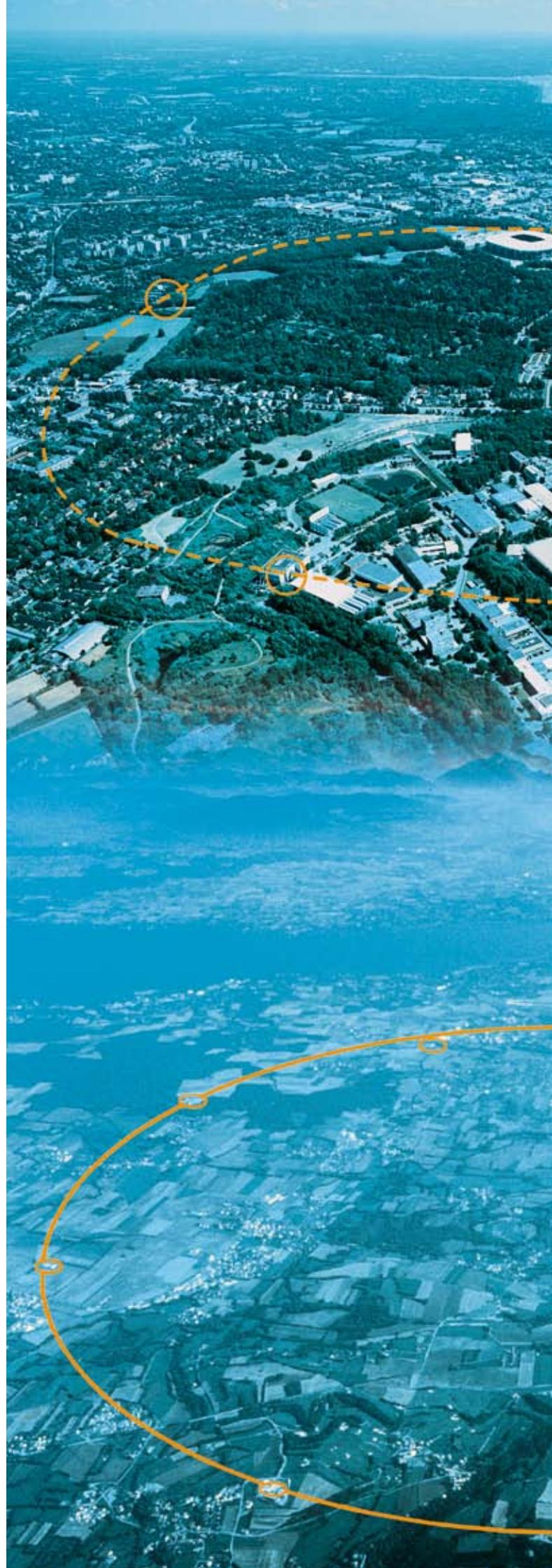
HERA und der LHC

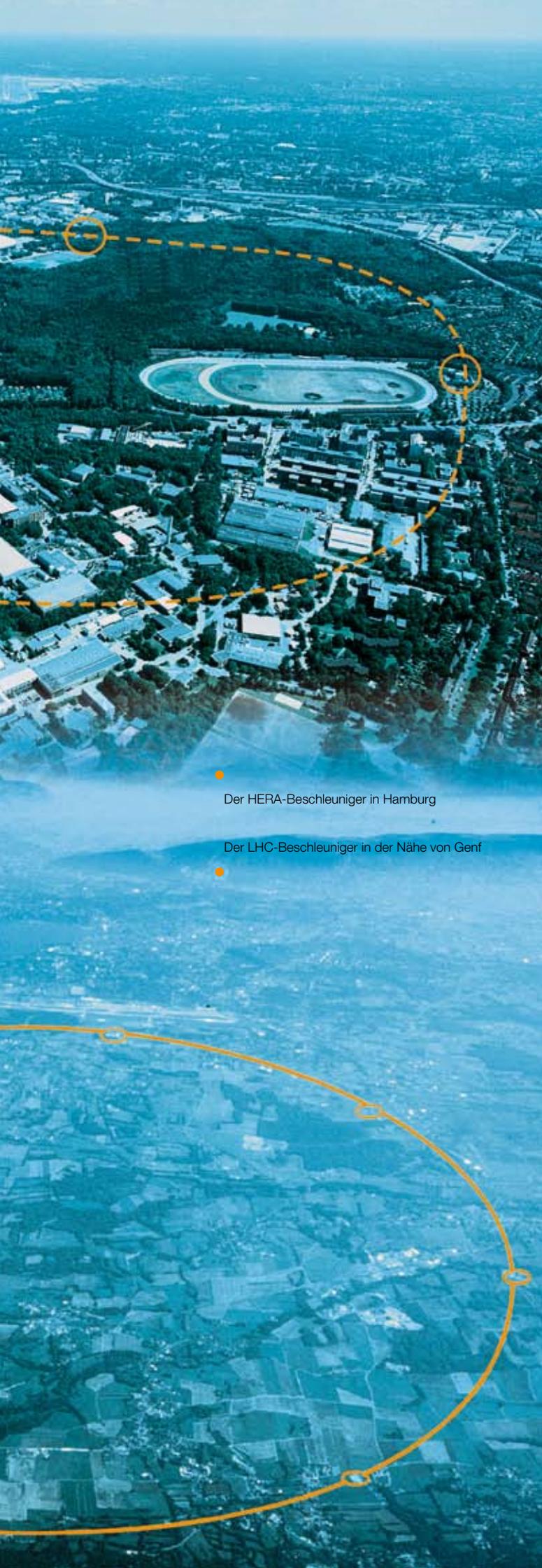
Bei CERN in Genf geht 2007 der leistungsfähigste Beschleuniger der Welt in Betrieb: der *Large Hadron Collider* LHC, in dem Protonen bei einer Energie zusammenstoßen, die etwa 50-mal höher ist als die der Teilchenkollisionen bei HERA. Mit dem LHC wollen die Physiker insbesondere nach dem bisher unentdeckten Higgs-Teilchen und möglichen supersymmetrischen Materiezuständen fahnden. Dabei sind die Ergebnisse von HERA unverzichtbar: Da im LHC Protonen, also keine punktförmigen, sondern ausgedehnte, zusammengesetzte Teilchen aufeinanderprallen, sind die Kollisionen äußerst komplex und damit theoretisch schwierig zu beschreiben. Es ist deshalb unerlässlich, den Eingangszustand der Kollisionen so präzise wie möglich zu kennen – und den liefern die HERA-Experimente mit ihrem detaillierten Bild des Protons.

Besonders wichtig sind zum Beispiel Präzisionsmessungen der Partonverteilungsfunktionen (PDFs, siehe S. 24), die die Dichte der verschiedenen Quarks und der Gluonen im Proton beschreiben. Dank des überaus erfolgreichen HERA-Betriebs der letzten Jahre und der sehr gut funktionierenden Detektoren erhielten die HERA-Experimente dabei sogar Zugang zu den schweren charm- und bottom-Quarks, die im Proton für extrem kurze Zeit als virtuelle Teilchen entstehen. Gerade für die Produktion des Higgs-Teilchens ist es äußerst wichtig, diese Dichteverteilungen so gut wie möglich zu kennen: Je genauer man weiß, wie groß der Anteil an charm- und bottom-Quarks im Proton ist, desto genauer lässt sich die Higgs-Produktion am LHC voraussagen.



Der Wirkungsquerschnitt für die Produktion von W^+ -Bosonen am LHC – ohne und mit HERA. Ohne Berücksichtigung der von HERA gemessenen Partonverteilungen liegt die Unsicherheit der Vorhersage bei 17 % (gestrichelte Linien, schwarz). Dank der HERA-Daten schrumpft diese Unsicherheit auf etwa 3 % (blau). Die Erzeugung von W- und Z-Bosonen ist ein wichtiger Eichprozess des Standardmodells, mit dem z.B. die Luminosität (Intensität der Kollisionen) des LHC bestimmt wird.





● Der HERA-Beschleuniger in Hamburg

● Der LHC-Beschleuniger in der Nähe von Genf

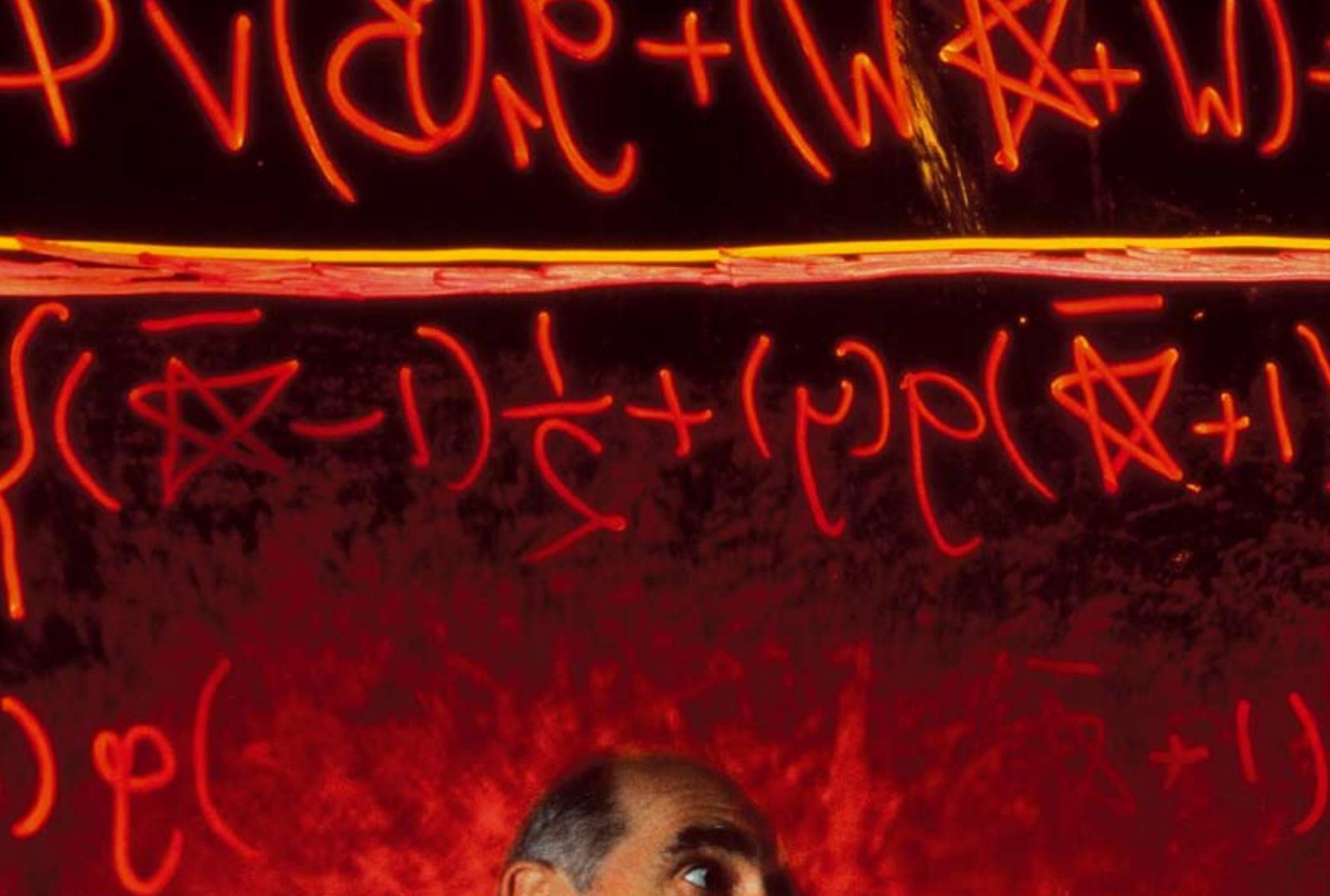
Viele dieser für den LHC grundlegend wichtigen Messungen konnten einzig und allein an HERA durchgeführt werden. Um diese Verknüpfung zu stärken und die Experimente am LHC auch im Hinblick auf die HERA-Erkenntnisse optimal vorzubereiten, haben DESY und CERN seit 2004 ihre Zusammenarbeit auf diesem Gebiet verstärkt. So konnten sie den Wissenstransfer zwischen den Forschern bei HERA und beim LHC fördern und eine aktive, langfristige Verbindung zwischen beiden Gemeinschaften schaffen, die den überlappenden Physikinteressen bei HERA und LHC Rechnung trägt. Schon jetzt sind etliche HERA-Wissenschaftler zusammen mit Studenten und Doktoranden an den LHC-Experimenten ATLAS und CMS beteiligt. Dank der kontinuierlichen Überführung der HERA-Forschungsarbeit in die Forschung am LHC wird dieser Aspekt der Teilchenphysik bei DESY auch in Zukunft über den Abschluss der HERA-Datenauswertung im nächsten Jahrzehnt hinaus weitergeführt.

Karl Hubert Mess ●

Karl Hubert Mess und seine Gruppe waren von 1981 bis 1994 für einiges zuständig, was HERA am Laufen hielt. Er hat jetzt einen in mancher Hinsicht ähnlichen Job für den LHC am CERN und kann dort anwenden, was er bei HERA gelernt hat.

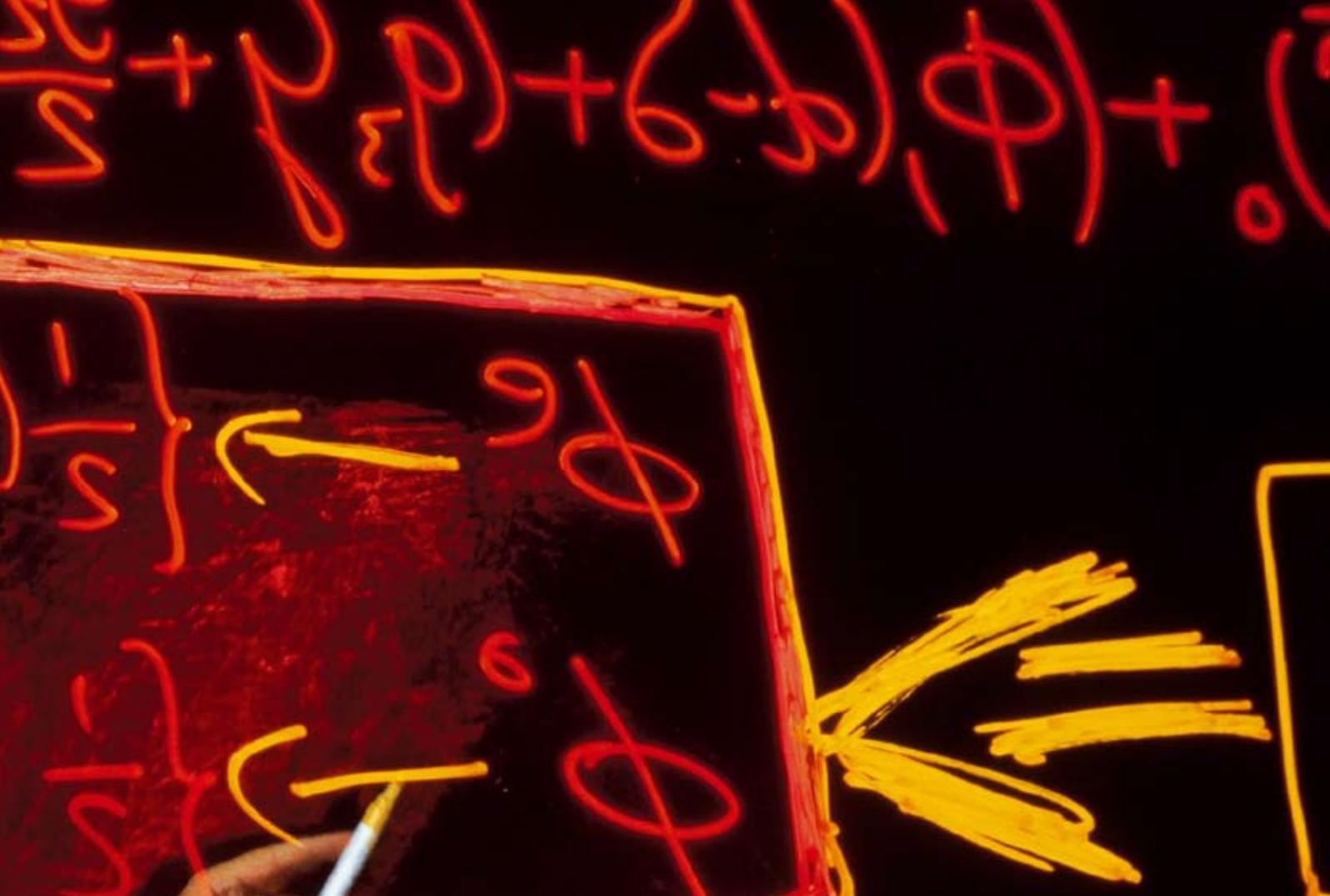
Das Wichtigste ist die Erinnerung an eine großartige Zeit mit vielen Herausforderungen, Möglichkeiten und Schwierigkeiten zusammen mit großartigen Kollegen in herausragender Zusammenarbeit. Das ist in meiner ganzen Karriere in dieser Kombination einzigartig gewesen. Der Höhepunkt nach vielen Vorarbeiten war die abschnittsweise Inbetriebnahme von HERA, die, gut koordiniert (also nicht von mir), dennoch die ganze Gruppe in Atem gehalten hat. Meine wichtigste Erkenntnis, die ich bei HERA so positiv erfahren durfte, ist aber, dass man mit wenigen guten Leuten Berge versetzen kann, wenn man für sie Bewegungs- und Entwicklungsfreiraum freikämpft und sie mit Ideen, kritischen Fragen, Ausbildung, kurzum mit „Feedback“ unterstützt. Menschen sind nun mal das Wichtigste bei einem Projekt. Das gilt auch für die spannende Zeit, die nun für mich am LHC begonnen hat.





WEIT BLICK.

HERA – Physik mit Zukunft



Zwar ist die aktive Datennahme an den HERA-Experimenten seit Sommer 2007 beendet, doch die Auswertung der aufgezeichneten Datenmengen ist weiterhin in vollem Gang – sie wird bis weit ins nächste Jahrzehnt hinein reichen. Es bleibt also spannend, denn was die HERA-Physiker nun vervollkommen, ist eine umfassende, experimentelle Beschreibung des Protons, wie es sie in dieser Präzision und Vielseitigkeit noch nie gab.

In den vergangenen Jahren konnten die Physiker mit HERA eine Fülle verschiedener und zum Teil unerwarteter Aspekte des Protons und der darin wirkenden Kräfte aufdecken. Mit der Analyse der bis Sommer 2007 aufgezeichneten Datenmengen werden sie diese Einzelaspekte zu einem großen Ganzen zusammenfügen, einem globalen Bild, welches das Proton detailliert beschreibt. Aufgrund der Einzigartigkeit von HERA wird dieses Bild lange Zeit Bestand haben – und somit über Jahre und womöglich Jahrzehnte hinweg den aktuellen Wissensstand zur Dynamik der starken Wechselwirkung definieren.

Was HERAs Blick ins Proton enthüllt, sind grundlegende Erkenntnisse über die fundamentalen Bausteine unserer Welt und die zwischen ihnen waltenden Kräfte. Mit ihren Ergebnis-

sen haben die HERA-Physiker den Theoretikern jetzt den Ball wieder zugespielt – nun sind sie am Zug, ihre Modellrechnungen zu verfeinern oder zu verändern, um die von HERA gewonnenen Erkenntnisse zu erklären und in die Teilchentheorie einzufügen.

Die HERA-Ergebnisse haben die Theorie von Anbeginn enorm stimuliert, und insbesondere im Bereich der Quantenchromodynamik ist daraus eine sehr intensive, fruchtbare Zusammenarbeit zwischen Theorie und Experimenten entstanden. Das von den HERA-Experimenten ermittelte Bild des Protons und der Naturkräfte stellt damit die grundlegende Basis nicht nur für zahlreiche zukünftige Teilchenphysikexperimente, sondern auch für eine Vielzahl von aktuellen Entwicklungen der theoretischen Teilchenphysik dar. ●

Wir danken allen, die an der Entstehung dieser Broschüre mitgewirkt haben, für ihre tatkräftige Unterstützung, insbesondere Allen Caldwell (Max-Planck-Institut für Physik, München), Eckhard Elsen (DESY) und Hans-Ulrich Martyn (Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen).

IMPRESSUM.

Herausgeber

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft
Notkestraße 85, D-22607 Hamburg

Tel.: 040 8998-0, Fax: 040 8998-3282
desyinfo@desy.de, www.desy.de

Autorin

Ilka Flegel, Textlabor, Jena

Realisation und Redaktion

Ute Wilhelmsen
Ilka Flegel, Textlabor, Jena

Design

Jung von Matt/brand identity GmbH, Hamburg

Layout

Britta Liebaug

Grafiken

DESY
H1-Kollaboration
HERMES-Kollaboration
ZEUS-Kollaboration

Fotos

CERN
DESY
Ilka Flegel, Jena
Peter Ginter, Lohmar
David Parker / Science Photo Library, London
Manfred Schulze-Alex, Hamburg
Heike Thum-Schmielau, Hamburg

AUTO BILD, Hamburg,
mit freundlicher Genehmigung (Seite 26)

Druck

Heigener Europrint GmbH, Hamburg

Redaktionsschluss

Juni 2007

Nachdruck, auch auszugsweise, unter Nennung der Quelle
gerne gestattet.



Deutsches Elektronen-Synchrotron Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

Die Helmholtz-Gemeinschaft leistet Beiträge zur Lösung großer und drängender Fragen von Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft durch wissenschaftliche Spitzenleistungen in sechs Forschungsbereichen: Energie, Erde und Umwelt, Gesundheit, Schlüsseltechnologien, Struktur der Materie, Verkehr und Weltraum.

Die Helmholtz-Gemeinschaft ist mit 25.700 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in 15 Forschungszentren und einem Jahresbudget von rund 2,3 Milliarden Euro die größte Wissenschaftsorganisation Deutschlands. Ihre Arbeit steht in der Tradition des großen Naturforschers Hermann von Helmholtz (1821-1894).

www.helmholtz.de