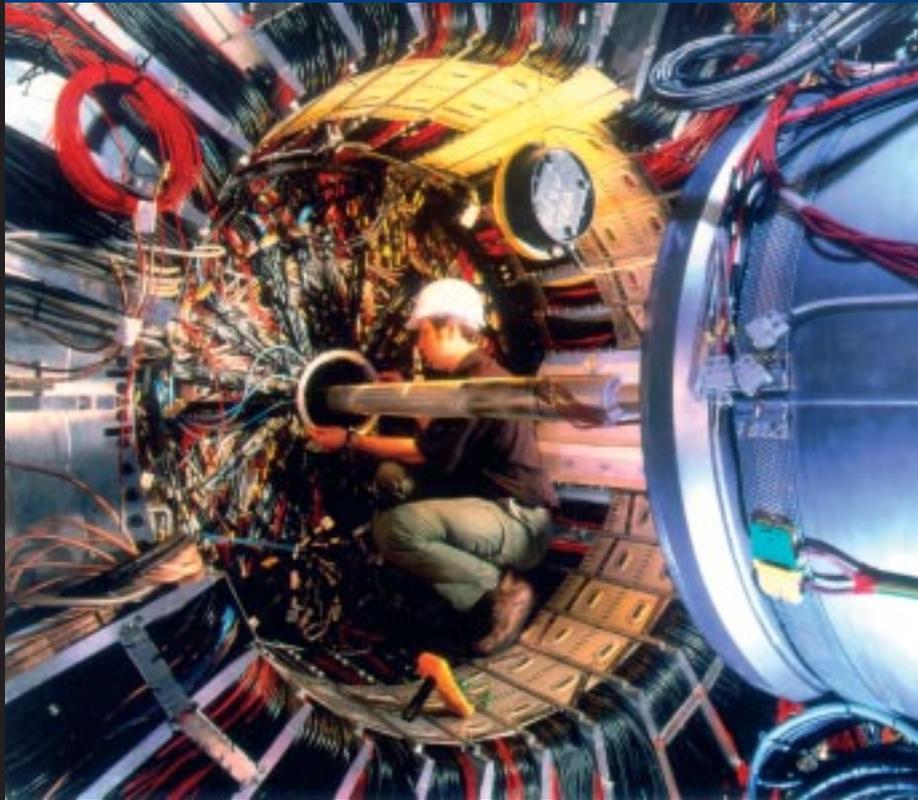




DAS SUPERMIKROSKOP

# HERA



Blick ins Innerste der Materie





# DAS SUPERMIKROSKOP HERA

Vor zehn Jahren ging beim Forschungszentrum DESY das größte deutsche Forschungsinstrument in Betrieb, der Teilchenbeschleuniger HERA. Seit zehn Jahren lässt HERA im Hamburger Untergrund Elektronen und Protonen aufeinander prallen; seit zehn Jahren locken die einzigartigen Forschungsmöglichkeiten an HERA jedes Jahr über tausend Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus aller Welt in die Hansestadt. Hier finden die Forscher einmalige Bedingungen, um zu ergründen, „was die Welt im Innersten zusammenhält“.

Denn HERA ist die einzige Beschleunigeranlage weltweit, in der die beiden Bausteine des Wasserstoffatoms, Elektronen und Protonen, mit beinahe Lichtgeschwindigkeit aufeinander prallen. Die Elektronen dringen dabei ins Proton ein und tasten dessen Inneres regelrecht ab. Damit ist HERA ein „Super-Elektronenmikroskop“, mit dem wir den inneren Aufbau des Protons entschlüsseln können. Dank HERA verstehen wir, wie das Proton aufgebaut ist – und damit die Materie, wir selber und das ganze Universum. Die Materiebausteine werden ihrerseits durch Kräfte zusammengehalten, die wir ebenfalls mit HERA untersuchen können.

Die in den ersten zehn Betriebsjahren der Beschleunigeranlage gesammelten Ergebnisse haben bereits entscheidend zur Erweiterung unseres Weltbilds beigetragen. Von Herbst 2000 bis Sommer 2001 wurde der Beschleuniger umgebaut mit dem Ziel, die Leistung noch einmal um

das Vierfache zu erhöhen. Genauso wie man in einem herkömmlichen Mikroskop Überraschendes sieht, wenn man eine stärkere Lichtquelle einbaut, so erwarten wir, neue Dinge zu sehen, wenn wir in den nächsten Jahren mit HERA noch weiter in physikalisches Neuland vorstoßen.

Doch wie funktioniert so ein „Supermikroskop“ tatsächlich? Da steht eine 6,3 Kilometer lange unterirdische Hightechanlage, in der winzige, für das menschliche Auge unsichtbare Teilchen aufeinander prallen. Wie können die Physiker diese Teilchen und ihre Zusammenstöße sichtbar machen? Wie können sie daraus Aussagen über Aufbau und Zusammenhalt unseres Universums treffen? Und was genau konnten sie mit HERA in zehn Jahren herausfinden?

Ziel dieser Broschüre ist es, solche Fragen zu beantworten – und Ihnen damit einen Blick hinter die Kulissen von HERA zu gewähren: in die tägliche Arbeit der Teilchenphysiker, die Motivation der Menschen, die an dem Super-Elektronenmikroskop arbeiten, und in die wissenschaftlichen Erfolge, die HERA in den letzten zehn Jahren verzeichnen konnte.

Viel Vergnügen beim Lesen!

Prof. Dr. Albrecht Wagner  
Vorsitzender des DESY-Direktoriums

Hamburg, im September 2002



# I N H

**4**  
DAS  
FORSCHUNGS-  
ZENTRUM DESY



**6** TEILCHEN-  
RENNBAHN IM  
HAMBURGER  
UNTERGRUND

DER LANGE WEG  
ZU HERA



**9**

**12**  
DAS „HERA-MODELL“  
DER INTERNATIONALEN  
ZUSAMMENARBEIT



**14**  
EIN TUNNEL  
UNTER  
HAMBURG

HERAUSFORDERUNG  
SUPRALEITUNG



**17**

TECHNOLOGISCHE  
ENTWICKLUNG



**20**



**24**

HERA AM START

HERA IM BETRIEB



**28**

**32**  
HERAs  
SCHARFE AUGEN  
H1 – ZEUS – HERMES – HERA-B



POLARISIERTE  
ELEKTRONEN

**40**



UMBAU FÜR MEHR  
LEISTUNG



**42**

WOZU GRUNDLAGEN-  
FORSCHUNG MIT TEILCHEN-  
BESCHLEUNIGERN?

VON PAUL SÖDING



**46**

**48**  
DESY UND  
HERA ALS  
WIRTSCHAFTS-  
FAKTOREN



EINE KURZE GESCHICHTE  
DER STREUVERSUCHE



**51**

# A L T

DAS STANDARD-MODELL  
DER TEILCHENPHYSIK



54

58

WIE GROSS SIND  
DIE QUARKS ?



56

EIN WELTBILD  
MIT LÜCKEN



MIT HERA AUF DEM WEG  
ZUR VEREINHEITLICHUNG  
DER NATURKRÄFTE



61

DAS PROTON  
UNTER DEM  
HERA-MIKROSKOP

64



GEFÄNGNISHAFT  
IM PROTON

67



AUF DER SUCHE  
NACH NEUEN  
TEILCHEN UND  
KRÄFTEN



75



72

DIE WELT MIT  
ANDEREN AUGEN:  
WENN DAS PROTON RUHT

DIFFRAKTION –  
AKTENZEICHEN EPX  
UNGELOST

70



DIE SUCHE NACH EXTRA-  
DIMENSIONEN

78



81

HERA-B  
AUF DER SPUR DES  
CHARMONIUMS



HERMES UND DAS  
SPINRÄTSEL

83



86

BLICK IN DEN  
ATOMKERN



90

ANZIEHUNGSPUNKT  
FÜR 1000 JUNGE  
MENSCHEN



88

IDEEN  
FÜR DIE  
ZUKUNFT



# Das Forschungs- zentrum DESY



Das Forschungszentrum DESY wurde am 18. Dezember 1959 als Stiftung bürgerlichen Rechts in Hamburg gegründet. Es ist ein mit öffentlichen Mitteln finanziertes Forschungszentrum, dessen Etat zu 90 Prozent vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und zu 10 Prozent von der Stadt Hamburg bzw. – für den zweiten Standort von DESY in Zeuthen bei Berlin – vom Land Brandenburg getragen wird. Die jährlichen Zuwendungen belaufen sich auf 145 Mio. € bei 1390 Mitarbeitern für DESY Hamburg, der Etat von DESY Zeuthen beträgt 15 Mio. € bei 170 Mitarbeitern. DESY ist Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren.





## DESYs Auftrag:

Der Auftrag des Forschungszentrums DESY ist die naturwissenschaftliche Grundlagenforschung mit den Schwerpunkten:

- Entwicklung, Bau und Betrieb von Beschleunigeranlagen
- Untersuchung der fundamentalen Eigenschaften der Materie und Kräfte (Teilchenphysik zurzeit an HERA)
- Nutzung der Synchrotronstrahlung in Oberflächenphysik, Materialwissenschaften, Chemie, Molekularbiologie, Geophysik und Medizin (zurzeit im HASYLAB)

Damit zeichnet sich DESY durch ein breites interdisziplinäres Forschungsspektrum aus.

Ursprünglich begann das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY in der Helmholtz-Gemeinschaft seine Karriere als Teilchenphysik-Einrichtung für die bundesdeutschen Hochschulen; inzwischen hat es sich zu einem Forschungszentrum von internationalem Zuschnitt und Rang entwickelt, das seine Anlagen Forschungsinstituten aus Deutsch-

land und der Welt zur Verfügung stellt. Über 1200 Physikerinnen und Physiker aus 25 Ländern arbeiten an den vier HERA-Experimenten. Pro Jahr kommen 2200 weitere Gäste aus 33 Ländern zu DESY, um im Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB Experimente in verschiedenen Bereichen der Physik, Chemie, Molekularbiologie, Materialforschung

oder Medizin durchzuführen. Denn DESY bietet mit HERA nicht nur erstklassige Forschungsmöglichkeiten in der Teilchenphysik, auch die von den Speicherringen DORIS und PETRA erzeugte Synchrotronstrahlung hat sich seit Mitte der 1960er Jahre zu einem überaus gefragten Forschungswerkzeug entwickelt.



# Teilchenrennb Hamburger Un

**Sie gelten als nüchtern, analytisch, mathematisch und pragmatisch – Physiker in ihrer Formelwelt. Darum steht „HERA“ auch nicht für die Göttin auf dem griechischen Olymp, die zänkische und leidenschaftlich eifersüchtige Gemahlin des ZEUS, sondern für Hadron-Elektron-Ring-Anlage, ein Tunnel mit zwei Teilchenbeschleunigern im Hamburger Untergrund.**

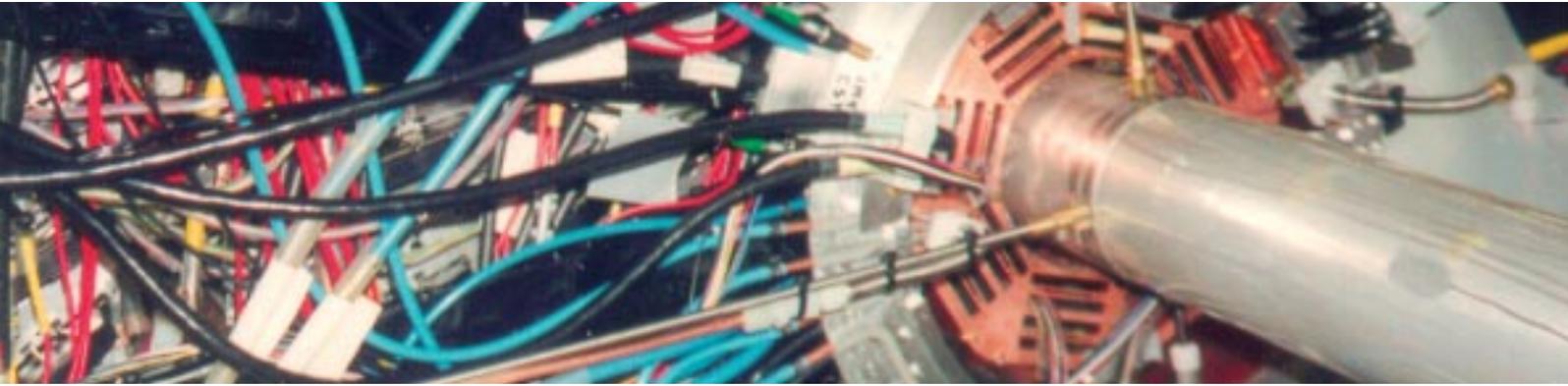
Die Welt der kleinsten Teilchen, die HERA erkundet, ist unserem Alltag ebenso fern wie die fabelhafte Götterwelt der Griechen. Doch sie hat einen höchst realen Bezug: HERA untersucht Quarks und Gluonen im Inneren des Protons; Protonen und Neutronen bilden Atomkerne; Atomkerne und Elektronen bilden Atome; Atome bilden Materie, Mäuse und Menschen.

HERA ist der größte Teilchenbeschleuniger beim Forschungszentrum DESY, ein über sechs Kilometer langes „Super-Elektronenmikroskop“. Ganze Schwärme von Elektronen fliegen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit durch einen Kreisbeschleuniger. Im gleichen Tunnel kreisen in einem zweiten Beschleuniger in gegenläufi-

ger Richtung die Protonen. An zwei Zonen im Ring werden die Teilchenstrahlen aufeinander gelenkt. Zehn Millionen Mal in der Sekunde prallen hier die hochbeschleunigten Teilchen mit so viel Energie aufeinander, dass furiose Reaktionen im Mikrokosmos ablaufen. Stößt ein punktförmiges Elektron auf das ungleich schwerere Proton, fungiert es als winzige „Sonde“, die das komplexe Wechselspiel von Quarks und Gluonen im Inneren des Protons abtastet.

Seit 1992 verfolgen Teilchenphysiker diese Kollisionen in Hamburgs Unterwelt. Dazu haben sie ganz besondere „Hochleistungskameras“ installiert: Detektoren, so groß wie ein dreistöckiges Haus, halb so schwer wie der Eiffelturm und angefüllt mit Hunderttausenden von elektronischen Bauteilen. Diese sind in der Lage, zehn Millionen Bilder von Teilchenkollisionen pro Sekunde zu registrieren. Die Auswertung der HERA-Experimente beschäftigt internationale Forscherteams mit jeweils mehreren hundert Physikern, Technikern, Ingenieuren und Studenten.

Am HERA-Ring gibt es vier große unterirdische Hallen – in jeder Himmelsrichtung eine. Sieben Stock-



# ahn im tergrund

werke tief unter der Erde stehen hier die Detektoren: H1 im Norden und ZEUS im Süden untersuchen die hochenergetischen Zusammenstöße von Elektronen und Protonen. HERMES im Osten erforscht mit Hilfe der beschleunigten Elektronen den Eigendrehimpuls des Protons, und im Westen der Anlage nutzt das Forscherteam von HERA-B den Protonenstrahl des Beschleunigers.

Das HERA-„Mikroskop“ ermöglicht den weltweit schärfsten Blick ins Proton – bis hinunter zu Strukturen, die noch einmal 2000-mal kleiner sind als das Proton selbst, das sind 0,000 000 000 000 000 5 Meter. Auf dieser unvorstellbar kleinen Skala können auch die Naturkräfte untersucht werden, die zwischen den Teilchen wirken. Und das ermöglicht den Forschern ungeahnte Perspektiven in Raum und Zeit: So zeigten die HERA-Experimente H1 und ZEUS die Vereinigung von zwei der vier elementaren Naturkräfte zu einer einzigen Kraft und eröffneten damit den Blick zurück in die Entstehungsgeschichte des Universums. Denn kurz nach dem Urknall beherrschte den Theorien zufolge eine einzige „Urkraft“ das kosmische Geschehen.

„Die bisherigen Ergebnisse von HERA haben entscheidende und neue Erkenntnisse zum Verständnis der Kräfte und Strukturen der Teilchen gebracht“, resümierte daher auch Robert Klanner, Forschungsdirektor von DESY, anlässlich des großen Umbaus, den HERA von September 2000 bis Juni 2001 erlebte. Das Ziel der aufwendigen Umrüstungen war es, die Anzahl der Kollisionen von Elektronen und Protonen um das Vierfache zu erhöhen, um den Expe-

perimenten Zugang zu sehr seltenen Prozessen zu verschaffen – und damit HERAs Blick für unerwartete Effekte jenseits der gängigen Teilchentheorie zu schärfen.

Im Jahr 2002 begann für HERA die zweite Forschungsrunde – Anlass für eine Rückschau auf die Ergebnisse aus zehn erfolgreichen Jahren und einen Ausblick auf die Erfolg versprechende Zukunft von Deutschlands größtem Forschungsinstrument.



DEUTSCHES ELEKTRONEN-SYNCHROTRON **DESY**

DESY 77/38  
June 1977

(A)

Physics with Large Electron-Proton Colliding Rings

by

C. H. Llewellyn-Smith  
*University of Oxford*

B. H. Wiik  
*Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg*

**DESY-Bibliothek**  
6. JULI 1977

NOTKESTRASSE 85 - 2 Hamburg 52

Der „rote DESY-Bericht“, in dem Christopher H. Llewellyn-Smith, späterer Generaldirektor des CERN, und Bjørn H. Wiik 1977 erstmals ihre Ideen zu einem großen Elektron-Proton-Beschleuniger festhielten.



# DER LANGE WEG ZU HERA

**Als der norwegische Physiker Bjørn H. Wiik 1971 nach sechs Jahren in den USA wieder nach Deutschland zurückkehrte, hatte er eine bahnbrechende Idee im Gepäck. Er wollte ein überdimensionales Elektronenmikroskop für Protonen bauen: eine Anlage, die den Physikern die innersten Geheimnisse des Protons und der Grundkräfte der Natur offen legen würde. Dazu sollten Elektronen und die fast 2000-mal schwereren Protonen in zwei getrennten Beschleuniger-Ringen gespeichert und bei höchsten Energien frontal zum Zusammenstoß gebracht werden – ein völlig neuartiges Konzept.**

So etwas hatte bisher noch keiner versucht. Entweder ließ man bei den Teilchenphysik-Experimenten zwei Strahlen gleich schwerer Teilchen in einem einzigen Beschleuniger im gleichen Vakuumrohr aufeinander prallen, oder man lenkte einen einzelnen Teilchenstrahl auf ein ruhendes Ziel. Bewegen sich beide Teilchensorten aufeinander zu, so ist die Energie des Stoßes viel größer, als wenn sich nur einer der Kollisionspartner bewegt. Je höher die Energie beim Zusammenstoß der Teilchen

**Die Tunnelbohrmaschine „HERAKLES“**

ist, desto tiefer können die Physiker in die Materie hineinblicken; desto kleiner sind die Abstände, die sie dabei untersuchen, und desto feiner die Details, die sie erkennen können. Damals wusste jedoch niemand, ob es tatsächlich möglich sein würde, zwei derart unterschiedliche Teilchensorten wie Elektronen und Protonen in zwei getrennten Ringen zu beschleunigen, um sie dann im Flug zusammenstoßen zu lassen ...

Die Idee, Teilchen als Sonden zu verwenden, um die Struktur größerer Gebilde zu untersuchen, hat eine lange Tradition. „Streuversuch“ heißt dieses Prinzip. Anfang des 20. Jahrhunderts entdeckte Ernest Rutherford auf diese Art und Weise den Atomkern. „Ich hatte den Eindruck, mit

das von seinen Assistenten Hans W. Geiger und Ernest Marsden durchgeführte Experiment kommentiert haben. Die Gewehr-Kugeln sind natürlich symbolisch gemeint. Rutherford lenkte Alphateilchen auf eine hauchdünne Goldfolie und beobachtete, in welche Richtungen die Teilchen abgelenkt wurden. Die Überraschung, dass einige Teilchen zurückprallten, konnte nur eines bedeuten: Im Inneren der Atome musste sich etwas Kleines, Hartes befinden – der Atomkern.

Die Methode der Streuversuche entwickelte sich zum erfolgreichen Handwerkszeug. Insbesondere die elementaren, punktförmigen Elektronen erwiesen sich als ideale „Sonden“, um die Struktur komplexerer Gebilde auszuloten. Vierzig Jahre nach Rutherfords Entdeckung beschloss Robert Hofstadter an der Universität Stanford in den USA die Kerne von Wasserstoffatomen, also Protonen, mit einem Elektronenstrahl – und stellte fest, dass die Protonen keinesfalls „Punkte“ sind, sondern einen messbaren Durchmesser besitzen. Diese „Verschmierung“ lieferte den Beweis, dass das Proton eine innere Struktur besitzen muss. Genaueres konnte Hofstadter 1954 allerdings nicht herausfinden, dafür reichte die Energie seiner „Sonden“ nicht aus. 1967 beobachteten die Physiker am DESY-Synchrotron in Elektron-Proton-Streuversuchen ungewöhnliche Reaktionen, die weitere Anzeichen



**DESY und seine Beschleuniger: der unterirdische HERA-Ring mit den vier Experimentierhallen und der PETRA-Ring, der das DESY-Gelände umschließt.**



für eine Substruktur des Protons lieferten. Im selben Jahr war die Beschleunigertechnik schließlich weit genug fortgeschritten, um den Forschern am Beschleunigungszentrum SLAC in Stanford eindeutige Aussagen zu ermöglichen. Jerome I. Friedman, Henry W. Kendall und Richard E. Taylor ließen einen Elektronenstrahl mit der höchsten verfügbaren Energie auf flüssigen Wasserstoff prallen – und konnten zum ersten Mal die Existenz harter Streuzentren innerhalb der Protonen beweisen. Sie hatten die Quarks gefunden, die umstrittenen, von Murray Gell-Mann und George

Zweig postulierten Bausteine der Protonen und Neutronen, die bei den meisten Physikern damals als rein mathematische Spielereien verpöht waren. 1990 trug diese Entdeckung den drei Physikern – wie schon Hofstadter vor ihnen – den Nobelpreis für Physik ein.

Doch wie lässt sich diese Erfolgsgeschichte fortsetzen? Wie erreicht man den Sprung in der Kollisionsenergie, der nötig ist, um die winzigen Quarks und die weiteren Unterstrukturen des Protons sichtbar zu machen? Hier setzte Bjørn H. Wiik's Idee an, Elektronen und Protonen getrennt zu beschleunigen und frontal zusammenprallen zu lassen. Doch bis zu ihrer Realisierung sollte noch einige Zeit ins Land gehen. Die Physik mit Elektronen und ihren Antiteilchen, den Positronen – DESY's Spezialgebiet –, lieferte damals eine Fülle von spannenden Ergebnissen, so dass das Proton-Elektron-Konzept schnell wieder ins Hintertreffen geriet. So stand das „P“ von PETRA, der 1973 ausgearbeiteten „Proton-Elektron-Tandem-Ring-Anlage“, schon 1974 wieder für „Positronen“. Als sich jedoch Ende der 1970er Jahre abzeichnete, dass das Europäische Laboratorium für Teilchenphysik CERN in Genf mit dem großen Speicherring LEP nun auch auf die Elektron-Positron-Physik umsteigen würde, entschied man sich bei DESY, in Zukunft auf das neuartige Prinzip des „Super-Elektronenmikroskops“ zu setzen. 1980 folgte die erste Projektstudie, 1981 war der Vorschlag ausgearbeitet und positiv begutachtet. Am 6. April 1984 unterzeichneten der Bundesminister für Forschung und Technologie Heinz Riesenhuber

und der Hamburger Wissenschaftssenator Hansjörg Sinn bei DESY in Hamburg das Abkommen zum Bau. Die „Hadron-Elektron-Ring-Anlage“ HERA war geboren, die weltweit einzige Speicherringanlage, in der zwei unterschiedlich schwere Teilchenarten zur Kollision gebracht werden.



**Der „Vater“ von HERA: der spätere DESY-Direktor Bjørn H. Wiik im Beschleunigerkontrollraum.**



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



**6. April 1984**

## **HERAs Lebenslauf**

- Anfang der 1970er Jahre: erste Ideen für ein „Super-Elektronenmikroskop“ für Protonen
- Ende der 1970er Jahre: erste technische Vorarbeiten zum Bau supraleitender Ablenkmagnete bei DESY
- März 1980: erste Projektstudie
- Februar 1981: positive Begutachtung durch den Gutachterausschuss des damaligen Bundesforschungsministeriums BMFT, hohe internationale Beteiligung als Voraussetzung gefordert
- Juli 1981: detaillierter Projektvorschlag
- 22. Februar 1983: BMFT schafft finanzielle Voraussetzungen für den Bau von HERA
- 6. April 1984: Unterzeichnung der Vereinbarung zum Bau von HERA
- 15. April 1984: erster Spatenstich
- 8. Mai 1985: Schildvortriebsmaschine beginnt mit Tunnelbohrung
- 6. März 1987: Aufbau des Elektronenrings beginnt
- 19. August 1987: Schildvortriebsmaschine erreicht wieder ihren Ausgangspunkt
- 20. August 1988: Erster Elektronenstrahl wird gespeichert
- 1. März 1989: Aufbau des Protonenrings beginnt
- 8. November 1990: Fertigstellung von HERA
- 15. April 1991: Erster Protonenstrahl wird gespeichert
- 19. Oktober 1991: erste Elektron-Proton-Kollisionen
- 1. Oktober 1992: HERA nimmt mit den Experimenten H1 und ZEUS den Forschungsbetrieb auf
- 4. Mai 1994: erste longitudinale Polarisation des Elektronenstrahls
- 1995: Inbetriebnahme des dritten HERA-Experiments HERMES
- 1999: Inbetriebnahme des vierten HERA-Experiments HERA-B
- September 2000 bis Sommer 2001: Umbau zur Steigerung der Luminosität (HERA-II)
- 2001-2002: Inbetriebnahme und Optimierung von HERA-II

**19. Oktober 1991**



# Das „HERA-Modell“ der internationalen Zusammenarbeit

**HERA sollte das bis dahin größte wissenschaftliche Projekt in Deutschland werden. Doch lässt sich ein solches Unterfangen im nationalen Alleingang bewältigen? Bei DESYs letztem Speicherring PETRA hatte die Bundesrepublik den Bau des Beschleunigers übernommen, die Experimente dagegen waren von den daran beteiligten Instituten – deutschen und ausländischen gleichermaßen – finanziert worden.**

Der Gutachterausschuss, der Anfang der 1980er Jahre im Auftrag des damaligen Bundesforschungsministeriums BMFT das HERA-Projekt unter die Lupe nahm, sah die Lage hier jedoch anders: „Da mit dem Bau von HERA neben CERN ein zweites international konkurrenzfähiges Laboratorium in Europa langfristig betrieben wird – und das ist durchaus die Empfehlung des Ausschusses –, ist es nur folgerichtig, wenn DESY nicht nur international genutzt wird, sondern auch Laboratorien anderer Staaten sich am Bau von HERA beteiligen. In seiner Empfehlung geht der Gutachterausschuss davon aus, eine solche Beteiligung – in welcher Form auch immer (Sachmittel, Bauteile, Personal) – zu erreichen und damit sowohl personell als auch finanziell die von der Bundesrepublik aufzubringenden Mittel wesentlich zu reduzieren.“

Internationale Zusammenarbeit in dieser Form war etwas völlig Neues

– und es war anfangs gar nicht klar, ob eine solche Zusage aus dem Ausland für ein im Grunde doch deutsches Beschleunigerprojekt überhaupt möglich war. Nun galt es für die DESYaner – allen voran den Heidelberger Physikprofessor Volker Soergel, der am 1. Januar 1981 den Vorsitz des DESY-Direktoriums übernommen hatte –, die ausländischen Partner vom wissenschaftlichen Potenzial und technologischen Interesse von HERA zu überzeugen – und von der Notwendigkeit, sich für die Realisierung des Projekts zu engagieren.



**DESY-Direktor Volker Soergel (links) begrüßt den italienischen Ministerpräsidenten Giulio Andreotti (rechts) bei DESY; dahinter Antonio Zichichi, zu der Zeit Präsident des INFN.**

„Wir haben jedoch nie HERA-Experimentierzeit verkauft, um Geld zu bekommen“, betonte Bjørn H. Wiik, der „Vater“ der HERA-Idee und Projektleiter für den Bau des Protonenrings. „Die Leute wussten, wenn sie nichts beitragen, dann existiert das

ganze Projekt vielleicht nicht. Dass es uns gelungen ist, derart hohe ausländische Beteiligungen einzuwerben, ist ein Beweis für die Qualität des Projekts.“ Die Rechnung ging auf. Ohne dass Staatsverträge abgeschlossen werden mussten oder Behörden eingegriffen hätten, steuerten namhafte ausländische Partner Sachlieferungen und Dienstleistungen bei – und profitierten ihrerseits dadurch, dass sie Erfahrung und Wissen insbesondere auf dem Gebiet der erforderlichen Technologien sammelten.

Auch von DESY-Seite aus unternahm man außergewöhnliche Anstrengungen, das Projekt im vorgesehenen Zeit- und Kostenrahmen fertig zu stellen. Der Baubeginn von HERA fiel in eine von Bundestag und Bundesforschungsministerium verfügte Phase der Personaleinsparung bei allen 13 Großforschungseinrichtungen des Bundes. DESY machte da keine Ausnahme, ungeachtet der gerade in Angriff genommenen neuen Aufgabe. Deshalb entschied man bei DESY, den Elektronenring von HERA so rasch wie möglich unter der Leitung von Gustav-Adolf Voss durch die in Bau und Betrieb von Elektronenbeschleunigern erfahrene Mannschaft bauen zu lassen. Der neue Protonenring wurde dagegen von Mitarbeitern aus dem Bereich der Teilchenphysik-Experimente übernommen – von Physikern und Technikern, die sich unter der Leitung von Bjørn H. Wiik mit großer Be-

**Weltweite Mitarbeit bei HERA:  
die international besetzte Crew  
der Magnetmesshalle.**



geisterung ans Werk machten, von denen die überwiegende Mehrzahl bisher allerdings noch nie einen Beschleuniger gebaut hatte. Unterstützung bekamen sie durch zahlreiche ausländische Physiker, Techniker und Ingenieure, die in Hamburg für eine begrenzte Zeit mitarbeiteten. Den technologisch höchst anspruchsvollen Protonenbeschleuniger mit dieser bunt zusammengewürfelten Mannschaft zu entwickeln und pünktlich fertig zu stellen, zählt zu Wiiks großen Leistungen.

So wurde der Bau von HERA zum internationalen Großereignis: Insgesamt elf Länder trugen ihren Teil dazu bei.

Institute aus Frankreich, Italien, Israel, Kanada, den Niederlanden und den USA lieferten auf eigene Rechnung wesentliche Teile der Anlage oder führten wichtige Tests durch. Großbritannien, Polen, die CSFR, die Schweiz, die Volksrepublik China und deutsche Institute aus der DDR und der Bundesrepublik entsandten Fachkräfte zur Mitarbeit.

Zeitweise machte das mit projektgebundenen Zeitverträgen angestellte Personal aus dem Ausland fast die Hälfte der HERA-Mitarbeiter aus. „Das

mag eine außergewöhnliche Art und Weise sein, Beschleuniger zu bauen“, meinte Wiik dazu. „Aber es ist gut gegangen, und ich glaube, es war

auch für die Leute positiv. Sie haben viel gelernt und zum Schluss gute Stellen gefunden. So war HERA in gewissem Sinne auch ein soziologisches Experiment.“

Das Interesse an HERA war sogar so groß, dass der Bundesminister für Forschung und Technologie schon bald in eine gewisse Verlegenheit geriet. Das *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare* INFN in Rom erklärte seine Bereitschaft, alle 422 supraleitenden Ablenkdiplane des Protonenrings kostenlos als Beitrag Italiens zu liefern.



**Etwa 360 Physiker von 51 Instituten aus 12 Ländern arbeiten an ZEUS, einem der vier Experimente, die derzeit am HERA-Ring laufen.**

Dadurch ließ sich zwar viel Geld sparen, allerdings wäre auch keiner deutschen Firma die Gelegenheit gegeben worden, sich Know-how für

große supraleitende Magnete zu erarbeiten. Dementsprechend beschied der Forschungsminister DESY, nur die Hälfte des italienischen Geschenks anzunehmen und die zweite Hälfte der Dipole mit eigenen Mitteln in Deutschland fertigen zu lassen.

Nicht weniger als 45 Institute und 320 Firmen (berücksichtigt wurden nur Firmen mit einem Auftragsvolumen von mehr als 25 500 €) beteiligten sich am Bau der Anlage. Insgesamt wurde HERA zu über 20 Prozent aus dem Ausland finanziert.

Bei den Experimenten kann man angesichts eines ausländischen Kostenanteils von mehr als 50 Prozent schon kaum mehr von einer internationalen Beteiligung sprechen. Sie stellen im vollen Wortsinn internationale Unternehmungen dar – Tendenz steigend: Waren es im Jahr 1992 noch 800 Forscher aus 16 Ländern, so beteiligen sich heute etwa 1200 Wissenschaftler aus 25 Nationen an den vier HERA-Experimenten. Damit trägt HERA wesentlich zur Vernetzung und Zusammenarbeit in der Wissenschaft bei – über alle nationalen Grenzen hinweg. Das „HERA-Modell“ der internationalen Zusammen-

arbeit gilt inzwischen als Modell für die Durchführung großer, internationaler Forschungsprojekte.



**Die vier unterirdischen HERA-Hallen wurden in offener Bauweise erstellt.**

**HERA ist weltweit die einzige Beschleunigeranlage dieser Größe, die mitten in einer Großstadt betrieben wird. Ein 6,3 Kilometer langer unterirdischer Tunnel, vier 25 Meter tiefe Experimentierhallen sowie zwei Verbindungstunnel zu den bestehenden Beschleunigeranlagen auf dem DESY-Gelände – drei Jahre und drei Monate brauchte die „Arbeitsgemeinschaft HERA“, um das ungewöhnliche Bauvorhaben zu bewältigen. Sechseinhalb Jahre nach dem ersten Spatenstich lud DESY im November 1990 zur symbolischen Inbetriebnahme: Die Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA war im vorgesehenen Zeit- und Kostenrahmen fertig gestellt worden.**

Beginnen hat alles neben der Bahrenfelder Trabrennbahn, auf einem Sandplatz hinter den Ställen der Rennpferde. Heute erkennt man dort nur noch ein von Bäumen umgebenes Betriebsgebäude. Darunter verbirgt sich ein acht Stockwerke tiefer, von unterirdischen Büroräumen umgebener Schacht, der sich unten zu einer stattlichen Halle ausweitet: 25 mal 43 Meter misst die „HERA-Halle Süd“, in der heute der Teilchendetektor ZEUS aufgebaut ist. Vier dieser unterirdischen Hallen galt es rund um den Tunnel auszuschachten – ein gewaltiges Unterfangen, denn die Hallen wurden nach Absenkung des Grundwassers in offener Bauweise erstellt. Der Tunnel selbst wurde dagegen gleich unterirdisch gebohrt. Von der Halle Süd ausgehend, fraß sich die eigens für diesen Zweck konstruierte Schildvortriebsmaschine HERAKLES in 10 bis 25 Meter Tiefe

durch den Hamburger Untergrund: sechs Meter im Durchmesser, etwa genauso lang, ein riesiger Stahlbohrer, wie man ihn sonst für den Bau von Eisenbahn- und U-Bahn-Tunneln verwendet.

Am Kopf der Bohrmaschine kratzt ein großes Schneidrad Erdreich und Steine ab und vermischt sie mit Tonschlamm, der den vorderen Teil der Maschine unter Druck füllt. Dieses Gemisch wird durch den schon gebohrten Teil des Tunnels an die Erdoberfläche gepumpt, wo Sand und Steine wieder entfernt werden. Diese Art der Schildvortriebsmaschine hat den Vorteil, dass der Druck vor dem Schild liegt, wo sich Menschen nur ausnahmsweise aufhalten müssen. Ansonsten konnten die Tunnelbauer ohne Druckkammer arbeiten, obwohl die Tunnelröhre zur Hälfte im Grundwasser verläuft. Direkt hinter der Bohrmaschine wurde der Tunnel mit vorgefertigten, mit dicken Gummidichtungen versehenen Betonsegmenten – so genannten Tübbings – ausgekleidet, die fest aneinander gepresst wurden, so dass das Grundwasser auch hier keine Chance hatte. Das Ganze ging nicht ohne dumpfes Gerumpel vonstatten, ansonsten hätten die Anwohner jedoch keine Beeinträchtigungen zu beklagen. Lediglich eine klemmende Tür musste korrigiert werden. Ohne Gefahr für Haus und Hof bahnte sich HERAKLES unter Wohngebieten, Gewerbeflächen, Straßen und Grünanlagen seinen Weg. 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



**Ein Tunnel  
HAMBURG**

**In die Röhre geguckt: der HERA-Tunnel im Bau; im Hintergrund die Schildvortriebsmaschine HERAKLES.**



# tunnel fer BURG

## Das Schneidrad des „Tunnelbohrers“ HERAKLES

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.

Kaum hatte HERAKLES den ersten Tunnelabschnitt zwischen den HERA-Hallen Süd und West fertig gebohrt, rückten die Installationstrupps an. Kabelpritschen, Strom- und Wasserleitungen, Licht und Lüftung – zunächst galt es, die kahle Tunnelröhre mit der notwendigen Infrastruktur zu versehen. „In dem Protokoll eines ersten Vorgesprächs zur Terminfestlegung der HERA-Montage hieß es, die Ausführung werde mir übertragen“, erinnert sich Hannelore Grabe-Çelik, die zu der Zeit in der Gruppe „Experimente- und Beschleunigeraufbau“ tätig war. „Zum Glück habe ich damals nicht gewusst, was dieser einfache Satz bedeutet!“ Gitterroste (24 800 Stück), Ankerschienen (10 000 Stück), kilometerweise Kabel und Rohre, Verteilerkästen, Telefone, Lautsprecher, Not-Aus-Anlagen und Magnethalterungen galt es zu montieren, Stromschienen zu verschweißen, Magnete, Module und Beschleunigungsresonatoren an Ort und Stelle zu transportieren und anzuschließen, Hohlleiter zu montieren, Abschirmsteine zu platzieren. Mit ihren Mannen folgte Frau Grabe-Çelik HERAKLES auf dem Fuß. Lange bevor die Bohrarbeiten fertig waren, standen schon die ersten Magnete für den Elektronenbeschleuniger bereit. Als HERAKLES im August 1987 an seinen Ausgangspunkt zurückkehrte, war beinahe die





**Die Schildvortriebsmaschine HERAKLES wird in die HERA-Halle Süd hinuntergelassen.**

Hälfte des Elektronenrings fertig gestellt. Ein Jahr später konnte er in Betrieb genommen werden.

Dann begann der nächste schwierige Teil – der Aufbau des Protonenbeschleunigers, der mit seinen neuen supraleitenden Magneten und der aufwendigen Helium-Kühlung oberhalb des Elektronenrings installiert werden musste. Insgesamt etwa 650 supraleitende Magnete kamen von den Herstellerfirmen, blieben im Durchschnitt 100 Stunden in der Testhalle bei DESY und wurden schließlich im Tunnel aufgestellt. Am 19. September 1990 stand der letzte Protonenmagnet an Ort und Stelle, am 8. November feierte man die Fertigstellung und Inbetriebnahme des Speicherrings. In der Nacht vom 14. zum 15. April 1991 gelang es, im HERA-Ring zum ersten Mal Proto-



**DESY-Direktor Volker Soergel (vo. li.) mit Bundesforschungsminister Heinz Riesenhuber (vo. re.) bei der Tunnelbegehung.**

nen zu speichern. Am Nachmittag des 19. Oktobers 1991 – einem Samstag – war es schließlich so weit: HERA lieferte die ersten Elektron-Proton-Zusammenstöße.

# Herausforderung Supraleitung



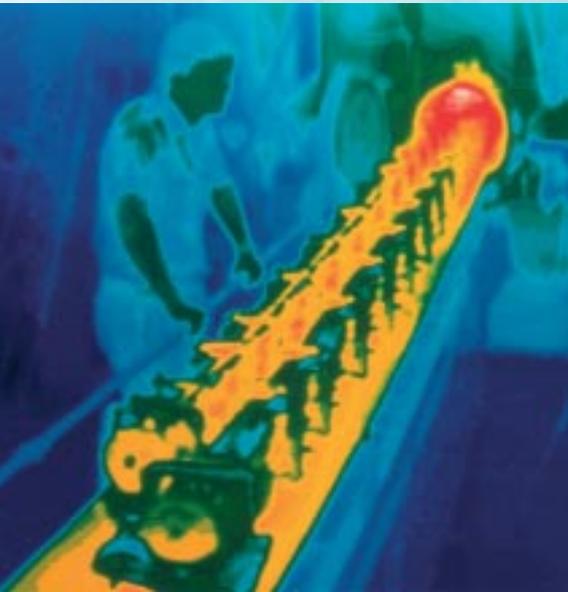
Im Kontrollraum der HERA-Kälteanlage

Die Entscheidung für die Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA war für DESY in vielerlei Hinsicht ein Aufbruch zu neuen Ufern. Nicht nur, dass man sich bisher vor allem auf die Physik mit Elektronen und deren Antiteilchen, den Positronen, konzentriert hatte und mit dem Bau von Protonenbeschleunigern somit keinerlei Erfahrung besaß. Zwei so unterschiedliche Teilchensorten wie Elektronen und die 2000-mal schwereren Protonen im Flug frontal aufeinander zu schießen, hatte bisher noch niemand versucht.

Da Teilchen und Antiteilchen sich in ihren Eigenschaften im Wesentlichen nur durch die entgegengesetzte Ladung unterscheiden, lassen sie sich hervorragend gleichzeitig in einem einzigen Ringbeschleuniger speichern und zum Zusammenstoß bringen. Bei Elektronen



Tiefemperatur im großen Stil: die 2500 m<sup>2</sup> große Kältehalle von HERA aus der Fish-Eye-Perspektive.



### Infrarotaufnahme einer Vakuummutter für den HERA-Elektronenring.

und Protonen müssen dagegen zwei getrennte, völlig unterschiedliche Beschleuniger her, die dann in einer ausgeklügelten Strahlführung an den Kollisionpunkten der Teilchen zusammengeführt werden.

Mit Elektronenbeschleunigern arbeitete man bei DESY schon lange. Obwohl auch hier wesentliche technische Neuentwicklungen anstanden, sollte der Elektronenring von HERA daher nicht das größte Problem darstellen. Anders sah es bei den schweren Protonen aus. Damit diese bei den hohen Energien von HERA im Beschleunigerring tatsächlich die Kurve kriegen, sind sehr starke Magnetfelder nötig, etwa dreimal höhere Felder, als herkömmliche Elektromagnete mit Eisenpolschuhen sie erzeugen können. Solche Felder lassen sich nur sinnvoll mit Hilfe der Supraleitung erreichen – also der Eigenschaft bestimmter Materialien, Strom bei sehr tiefen Temperaturen verlustfrei zu leiten.

Durch supraleitende Drähte können sehr hohe elektrische Ströme fließen, ohne dass sie warm werden, etwa 10 000-mal höhere Ströme als durch einen Kupferdraht des gleichen Querschnitts. Deshalb lassen sich mit supraleitenden Spulen sehr hohe Magnetfelder erzeugen. Hier musste DESY sich weit in technisches Neuland vorwagen, denn als HERA geplant wurde, gab es noch keinen supraleitenden Großbeschleuniger, und die Magnete für den im Bau befindlichen Proton-Antiproton-Speicherring Tevatron beim Forschungszentrum Fermilab in Chicago litten unter vielen Kinderkrankheiten.

Es galt also nicht nur, für die Protonen von der Teilchenquelle über die Vorbeschleuniger bis hin zum supraleitenden HERA-Ring ein komplett neues Beschleunigersystem aufzubauen – die erforderliche Technologie musste überhaupt erst entwickelt werden. Hier konnten die Beschleunigerbauer bei DESY an die Pionierarbeit ihrer amerikanischen Kollegen anknüpfen: Die HERA-Magnete entstanden aus einer konsequenten Weiterentwicklung der Magnete für das Tevatron. Mit diesen Entwicklungsarbeiten übernahm DESY selbst wieder eine Vorreiterrolle – in zweierlei Hinsicht. Zum einen erfolgte die Entwicklung und Produktion der supraleitenden Magnete erstmalig in enger Zusammenarbeit mit Industriefirmen und staatlichen Instituten mehrerer Länder, was insbesondere für die europäische Industrie eine einmalige Chance darstellte. Denn die Unternehmen bekamen erstmals die Gelegenheit, großtechnische Erfahrungen auf den Gebieten der Supra-

leitung und der Tieftemperatur-Technik zu sammeln. Für HERA wurden zum ersten Mal alle Magnete in vollem Umfang von der Industrie gebaut. Zum anderen erwies sich das Konzept dieser Magnete als so überzeugend, dass es sich inzwischen weltweit durchgesetzt hat. Auch die Magnete für den nächsten großen Protonenbeschleuniger, den LHC in Genf, beruhen auf dem Prinzip der HERA-Magnete.

Ein HERA-Magnet ist auf den ersten Blick kaum als solcher zu erkennen. Er ist neun Meter lang, wiegt zehn Tonnen und sieht im Wesentlichen aus wie ein dickes gelbes Rohr. Die Form des Magnetfelds wird nicht mehr durch das sonst übliche Eisenjoch bestimmt, sondern durch die supraleitenden Spulen, die das Vakuumrohr, in dem der Teilchenstrahl verläuft, unmittelbar umgeben. Bei supraleitenden Magneten ist der Aufwand für die Kühlung der Spulen ganz erheblich: Die Betriebstemperatur der HERA-Magnete liegt bei minus 269 Grad Celsius, das sind





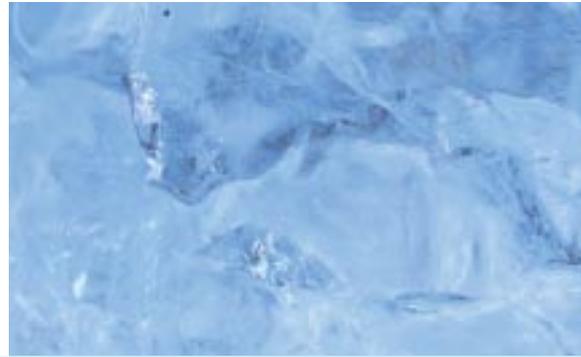
**Ein ausgeklügeltes Ventilsystem verteilt das flüssige Helium an die supraleitenden Magnete des HERA-Rings.**

nur vier Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt. Die Magnete werden deshalb ständig mit flüssigem Helium gekühlt, und die supraleitenden Spulen stecken – umgeben von Isoliervakuum mit Wärmeschutzschilden und ausgerüstet mit Sicherheitssystemen für den Fall, dass die Supraleitung zusammenbricht – in einem Kryostaten, der den Magneten

ihre äußere Form gibt. Um die Magnetspulen über die 6,3 Kilometer des HERA-Beschleunigers in ihrem kalten – und damit supraleitenden – Zustand zu halten, wurde bei DESY 1986 die damals größte Kälteanlage Europas gebaut, in der Heliumgas verflüssigt und anschließend über ein ausgeklügeltes Verteilersystem in den HERA-Ring geleitet wird.



**Blick in den „Kopf“ eines supraleitenden Magneten mit seinen technisch höchst anspruchsvollen Anschlüssen und Verbindungen.**



## Der größte „Kühlschrank“ Europas

2500 Quadratmeter groß ist die Halle, in der HERAs zentrale Kälteanlage aufgebaut ist. Seit 1987 ist diese bis dato größte Kälteanlage in Europa ununterbrochen in Betrieb und kühlt die supraleitenden Magnete im HERA-Ring zuverlässig mit flüssigem Helium. Sie besteht aus insgesamt drei „Straßen“ mit Kompressoren, Kältemaschinen und Gasreinigungsanlagen, von denen für den laufenden Betrieb allerdings nur zwei erforderlich sind. Beim Ausfall einer Kältestraße übernimmt die dritte Straße die Kühlung.

Im Prinzip arbeitet die Anlage wie ein Kühlschrank oder das Kälteaggregat einer Klimaanlage – nur mit Helium als Kältemittel. Das Gas wird zunächst verdichtet, gereinigt und anschließend in Wärmetauschern und Turbinen expandiert, gekühlt und verflüssigt. Über zwei speziell isolierte Transferleitungen gelangt das flüssige Helium schließlich in die nördliche und die südliche Hälfte des HERA-Rings.

Im warmen Zustand wird das Helium in 18 Tanks an der Seite der Halle gespeichert. Zehn von ihnen sind im normalen Betriebszustand allerdings nicht gefüllt, sie dienen als Sammelbehälter für den Fall, dass die Supraleitung im Beschleunigerring zusammenbrechen und das kalte Helium schlagartig verdampfen sollte, sowie in Stillstandsperioden der Anlage. Insgesamt benötigt HERA 15 Tonnen Helium, das entspricht etwa einer Welttagesproduktion.





**Im HERA-Tunnel: die supraleitenden Resonatoren des Elektronenrings.**



**28 000 Filamente enthalten die supraleitenden Kabel, aus denen die Spulen der Protonenmagnete gewickelt sind.**

# TECHNOLOGIE ENTWICKELUNG

**Der supraleitende Protonenring zählt sicherlich zu den schwierigsten Aufgaben, welche die HERA-Bauer zu bewältigen hatten. Denn supraleitende Beschleunigermagnete besitzen eine ganze Reihe von Eigenschaften, die sie von konventionellen normalleitenden Magneten unterscheiden und größte Sorgfalt bei der Konstruktion und Herstellung erfordern. Hier ist es nicht mehr möglich, präzise bearbeitete Eisenpolschuhe zu benutzen, um die Form des Magnetfelds vorzugeben. Diese wird vielmehr von den supraleitenden Spulen bestimmt, die mit extrem hoher Genauigkeit gewickelt werden müssen, damit die Feldfehler innerhalb der vorgegebenen Toleranzen bleiben.**

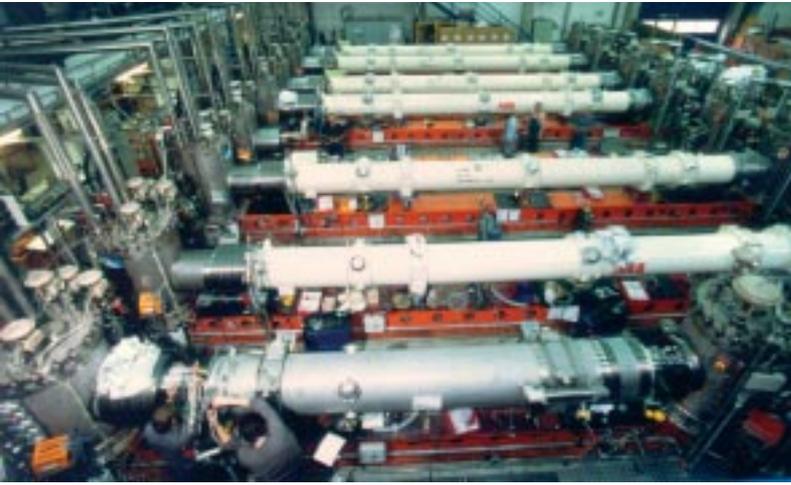
**D**ie Spulen selbst bestehen aus haarfeinen Niob-Titan-Filamenten von nur 15 Mikrometern Durchmesser, jeweils 1200 Stück in einem 0,8 Millimeter starken Kupferdraht – eine besondere Herausforderung in der Herstellung. 24 dieser Drähte werden zu einem flachen Kabel verdreht, aus denen man schließlich die Spulen wickelt. Nur zwei hundertstel Millimeter darf die Lage der Stromleiter in der Spule dabei abweichen, um die Fehler des Magnetfelds innerhalb der vorgeschriebenen

0,01 Prozent zu halten. Hinzu kommt, dass in den supraleitenden Spulen bei den hohen elektrischen Strömen gewaltige magnetische Kräfte wirken, welche die beiden Spulenhälften im Betrieb mit einer Kraft von über 100 Tonnen pro Meter auseinander drücken. Die Spulen werden deshalb von vorgespannten Aluminium-Stützringen umklammert, die die hohen Kräfte aufnehmen und gleichzeitig die mechanische Präzision gewährleisten.

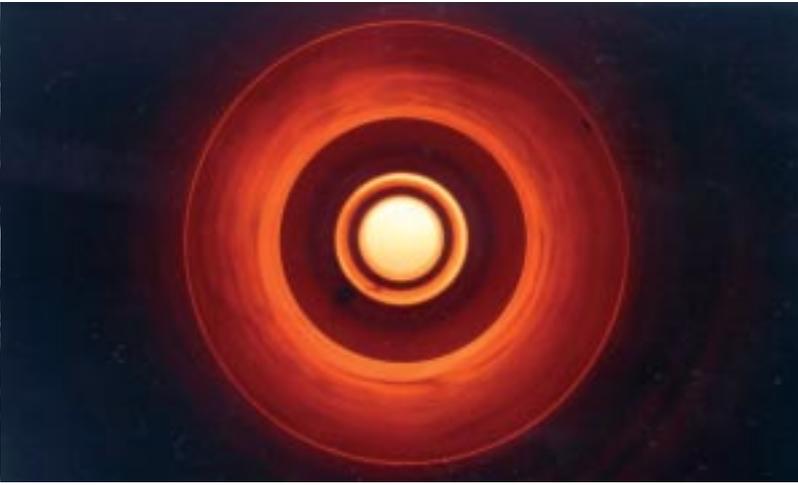
Dementsprechend aufwendig und schwierig gestaltete sich die Abnahmeprüfung der fertigen Magnete. Über zwei Jahre lang arbeiteten daran 70 Leute rund um die Uhr, an sieben Tagen die Woche in drei Schichten. Im Durchschnitt war jeder Magnet etwa 100 Stunden auf dem Teststand. Wären die Fehler erst



**Stabile Stützklammern verhindern, dass das hohe Magnetfeld die Spulenhälften der supraleitenden Dipole auseinander drückt.**

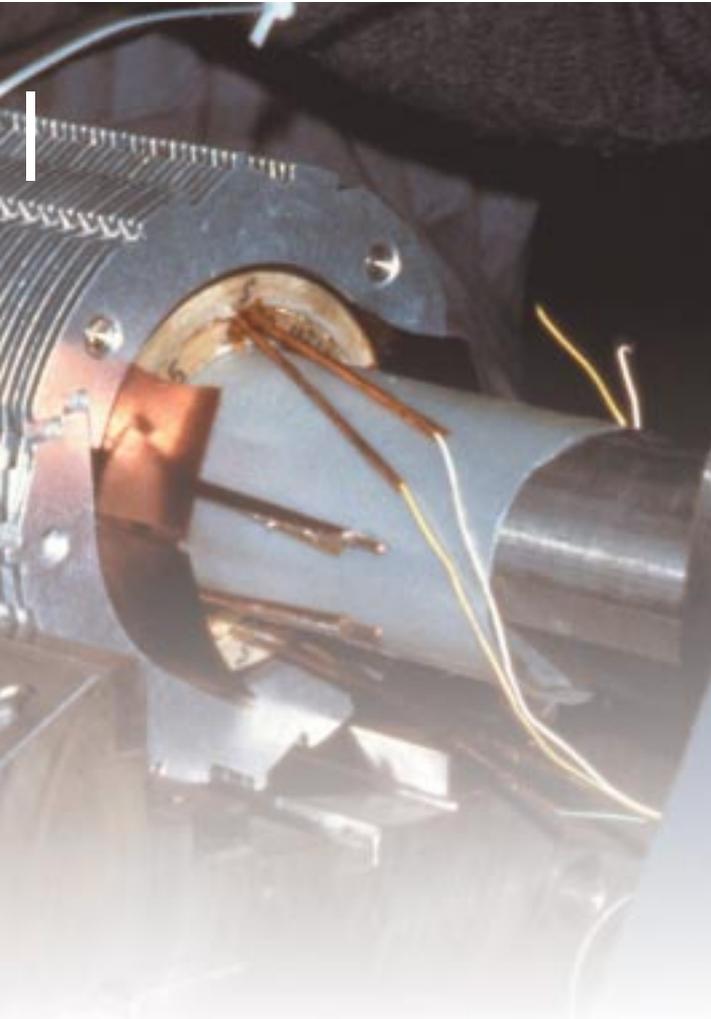


Abnahmekontrolle der supraleitenden Protonenmagnete in der eigens eingerichteten Magnetmesshalle.



Blick ins Innere eines supraleitenden Resonators.

# LOGISCHE LUNGEN



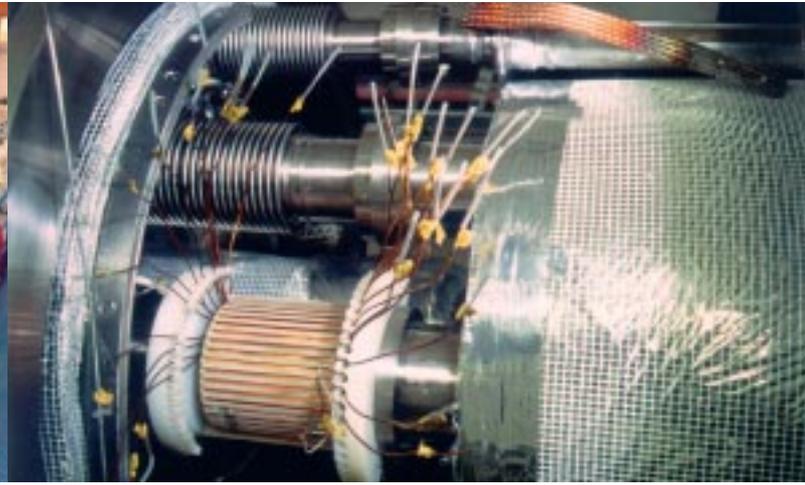
im Tunnel bemerkt worden, so hätte das HERA-Team den Beschleuniger womöglich niemals zum Laufen gebracht ... Obwohl all die einzelnen Komponenten der Magnete und die Magnete selbst bei den unterschiedlichsten Industriefirmen weltweit gefertigt worden waren, erfüllten die HERA-Magnete die Erwartungen hervorragend. Von den insgesamt 422 supraleitenden Dipolen und 224 Quadrupolen wurden nur acht zunächst als unbrauchbar zurückgewiesen und repariert – weit aus weniger, als nach den amerikanischen Erfahrungen auf diesem Gebiet zu erwarten war. Die industrielle Serienfertigung der HERA-Magnete war ein voller Erfolg. Alle Magnete übertreffen deutlich die vor-

gesehene Feldstärke von 4,7 Tesla. Seit 1998 beschleunigt HERA die Protonen nicht mehr auf die ursprünglich vorgesehenen 820 Giga-elektronenvolt (GeV), sondern sogar auf 920 GeV. Dazu müssen die Magnete über die ursprünglich vorgesehene Feldstärke hinaus auf 5,3 Tesla hochgefahren werden. Die Umstellung gelang problemlos, ohne dass in einem der Magnete aufgrund der hohen elektrischen Ströme die Supraleitung zusammengebrochen wäre.

Für den Elektronenspeicherring von HERA konnte DESY auf die Erfahrungen mit dem Elektron-Positron-Speicherring PETRA zurückgreifen, der jetzt als Vorbeschleuniger für HERA dient. Doch auch hier führte man wesentliche technische Neuerungen ein, zum Beispiel die Modulbauweise der Magnete. Ein Dipol-, ein Quadrupol- und ein Sextupolmagnet bilden jeweils eine mechanische Einheit, die bereits vor der Aufstellung im Tunnel zusammengebaut wurde. Dies erleichterte den Aufbau und die Justierung des Elektronenrings ganz beträchtlich. Die Vakuumkammern des Strahlrohrs, in dem die Teilchen ihren Rundkurs durchfliegen, wurden erstmals nicht aus Aluminium, sondern aus Kupfer hergestellt, das eine bessere Wärmeableitung und eine



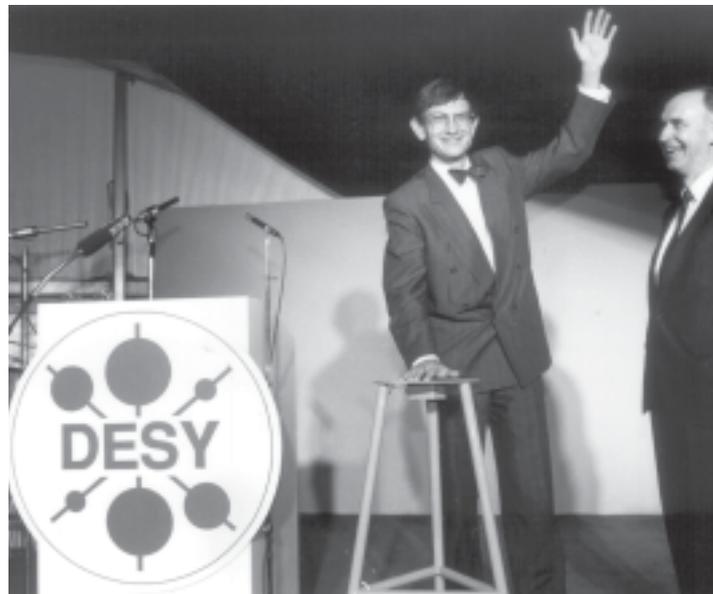
**Test der supraleitenden Protonenmagnete für HERA.**



**Erforderte größte Sorgfalt: die Verbindung zwischen zwei Protonenmagneten.**

bessere Strahlungsabschirmung bietet. Die Mehrzahl der Beschleunigungsstrecken im Elektronenring sind normaleitende „Resonatoren“, in denen eine elektromagnetische Welle von 500 Megahertz die Teilchen in Fahrt bringt. Auch hier griff man auf die Supraleitung zurück, um die Elektronen mit vertretbarem Aufwand an elektrischer Leistung auf die Nennenergie von 30 GeV bringen zu können. Die in Hamburg unter der Federführung von DESY entwickelten supraleitenden Beschleunigungsresonatoren aus Niob erreichten eine maximale Feldstärke von 5 Megavolt pro Meter (MV/m), während herkömmliche Kupferresonatoren zu der Zeit maximal etwa 1 MV/m lieferten. HERAs Elektronenbeschleuniger enthält inzwischen 16 dieser Niobresonatoren.

Zwei Beschleunigerringe von 6,3 Kilometern Länge – das sind insge-



**8. November 1990: Per Knopfdruck gibt Bundesforschungsminister Heinz Riesenhuber das Signal zur Inbetriebnahme von HERA (rechts im Bild DESY-Direktor Volker Soergel).**

samt 12,6 Kilometer Strahlrohr, die es auf einen Druck von  $10^8$  bis  $10^{13}$  Millibar zu evakuieren gilt. Dann wird es in den Beschleunigerrohren von HERA so luftleer wie auf dem Mond: Dieser Druck entspricht weniger als einem Billiardstel des Luftdrucks an der Erdoberfläche. Dazu musste HERA nicht nur mit einem umfangreichen System von Vakuumpumpen ausgerüstet

werden, sondern auch mit einem ausgeklügelten Vakuumkontrollsystem, um vor allem die Dichtigkeit der vielen Schweißnähte überwachen zu können. Einen Beschleuniger von solchen Ausmaßen zu betreiben, bedeutet, Tausende von Komponenten zu steuern und zu beherrschen, Daten über kilometerlange Kabel zu übertragen und in einem zentralen Kontrollraum zu verarbeiten. Die Komplexität einer solchen Anlage ist kaum mehr vorstellbar – und

doch funktioniert sie. Am 8. November 1990 feierte man die Inbetriebnahme und, wie Hamburgs Wissenschaftssenator Ingo von Münch hervorhob, eine finanzielle „Punktlandung“. Denn trotz der enormen technischen Herausforderungen war HERA innerhalb des vorgegebenen Termin- und Kostenrahmens fertig gestellt worden.

## Die supraleitenden HERA-Magnete

Die supraleitenden Magnete für den Protonenring von HERA erinnern nicht mehr an herkömmliche Magnetkonstruktionen, da das Eisenjoch zur Bündelung der Feldlinien nur noch eine untergeordnete Rolle spielt. Stattdessen steht der Aufwand für die Heliumkühlung im Vordergrund, die die supraleitenden Spulen der Magnete auf ihrer Betriebstemperatur von minus 269 Grad Celsius hält. Bei den hohen elektrischen Strömen, mit denen die HERA-Magnete betrieben werden, wirken in den Spulen gewaltige Kräfte: Im Betrieb stoßen sich die Spulenhälften mit einer Kraft ab, die dem Gewicht eines Schwertransporters entspricht. Die Spulen werden deshalb durch stabile Stützklammern zusammengehalten.

Die HERA-Magnete sind eine konsequente Weiterentwicklung der supraleitenden Magnete für den Tevatron-Beschleuniger, der 1987 am Fermilab bei Chicago in Betrieb ging. Die Tevatron-Magnete sind vom so genannten Warmeisentyp, d.h., ihr Eisenjoch liegt außerhalb der mit flüssigem Helium gekühlten supraleitenden Spulen. Der Vorteil dieser Konstruktion liegt darin, dass hier nur die Spulen selbst abgekühlt werden müssen, das Eisen jedoch nicht. Befindet sich das Eisenjoch dagegen in unmittelbarer Nähe der Spulen und mit diesen auf Heliumtemperatur, so spricht man von einem Magneten vom Kalteisentyp.

Die HERA-Magnete sind als Kalteisenkonstruktion so konzipiert, dass sie die Vorteile beider Typen in sich vereinen. Zwar ist der Kühlaufwand höher als beim Tevatron, doch die HERA-Magnete erreichen eine höhere Feldstärke. Auch die Betriebssicherheit ist bei den HERA-Magneten größer, da die Dioden, die beim Zusammenbruch des Magnetfelds den in den Spulen fließenden Strom ableiten, mit in den kalten Bereich eingebaut werden konnten und somit einen besseren Schutz bieten. Das Grundkonzept der HERA-Magnete erwies sich als so erfolgreich, dass es sich inzwischen allgemein durchgesetzt hat.

## Wirbelströme und „Flusskriechen“

Das Feld von supraleitenden Magneten im Griff zu halten, ist nicht immer ganz einfach. So entstehen beim Hoch- oder Herunterfahren des Felds in supraleitenden Spulen Wirbelströme, die wie jeder elektrische Strom von magnetischen Feldern begleitet sind. In normalleitenden Spulen führt das nicht zu Problemen, da solche Wirbelströme durch den elektrischen Widerstand der Spulen schnell abklingen. Anders jedoch in supraleitenden Kabeln, in denen die Wirbelströme beständig weiterexistieren. Die resultierenden Störfelder verformen das Hauptfeld – zwar nur geringfügig, bei einer so empfindlichen Anlage wie HERA jedoch mit unter Umständen unangenehmen Konsequenzen. Deshalb ist jeder der 646 supraleitenden Magnete von HERA mit einer unmittelbar auf das Strahlrohr geklebten Korrekturspule ausgestattet, die es erlaubt, die Störfelder erfolgreich auszugleichen.

Das Schwierige ist nur: Die Wirbelstromfelder bleiben nicht konstant. Während einer mehrstündigen Betriebsphase des Beschleunigers „wandern“ die Magnetfelder im Protonenring, sie ändern ihre Stärke. Diese Veränderung wird durch eine Besonderheit der Supraleiter ausgelöst, das „Flusskriechen“. Die Geschwindigkeit, mit der dieses Flusskriechen stattfindet, unterscheidet sich erheblich, je nachdem, aus welcher Produktion die supraleitenden Spulen stammen. Deshalb wurden für HERA zwei zusätzliche Magnete – je einer aus der deutschen und der italienischen Produktion – als Referenzmagnete mit den Magneten des Protonenrings in Serie geschaltet. Ihre Felder werden während des Betriebs ständig durch hoch empfindliche Sonden gemessen, so dass den Veränderungen im gesamten Ring sofort durch entsprechendes Ansteuern der Korrekturspulen entgegengewirkt werden kann. Auch dieses für HERA entwickelte System hat Schule gemacht: Bei CERN in Genf hat man das Prinzip für den im Bau befindlichen LHC-Beschleuniger übernommen.



# HERA am Start

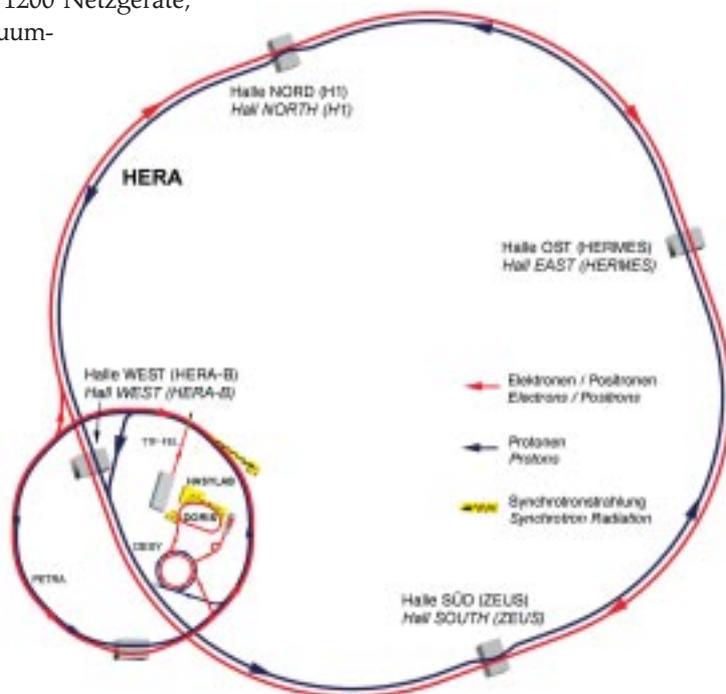
**Der zentrale Beschleunigerkontrollraum bei DESY steht der Brücke von Raumschiff Enterprise in nichts nach. Ein Bildschirm reiht sich an den anderen, bunte Diagramme wechseln ab mit Tabellen und Zahlenkolonnen, Schaltknöpfen, Tastaturen und „Trackballs“, so weit das Auge reicht. Hier pulsiert das Herz von HERA: Nicht nur die beiden Beschleunigerringe von HERA, auch die insgesamt sieben Vorbeschleuniger werden von hier aus gesteuert. Denn bevor die Teilchen in die eigentlichen HERA-Ringe eingeschossen werden, durchlaufen sie ein ganzes „Anlassersystem“ von kleineren Beschleunigern, die den Teilchenstrahl in die richtige Form und auf die richtige Energie bringen.**

In den beiden großen, jeweils 6,3 Kilometer langen Beschleunigerringen von HERA erreichen die Teilchen dann ihre Endenergie. Anschließend werden sie „gespeichert“: Sie durchfliegen über Stunden hinweg mit beinahe Lichtgeschwindigkeit ihren Rundkurs. An den von den haushohen Detektoren H1 und ZEUS umschlossenen Wechselwirkungspunkten treffen sich die beiden Teilchenstrahlen frontal, dabei prallen einige Elektronen und Protonen mit voller Wucht aufeinander. Die aus

der Kollision entstehenden Teilchen stieben in alle Richtungen auseinander und werden schließlich von den Nachweisgeräten registriert.

Was sich hier auf dem Papier so einfach beschreiben lässt, grenzt in Wirklichkeit an ein technisches Wunder. Zweimal 6,3 Kilometer Beschleuniger – das sind über 800 Ablenkermagnete, 1340 Fokussiermagnete, 1200 Netzgeräte, 1500 Vakuum-

pumpen, die alle über kilometerlange Kabel angesteuert werden. Ist der Betrieb erst einmal Routine, so wissen die Physiker im Kontrollraum genau, welchen Wert die einzelnen Magnetfelder haben müssen, welche Netzgeräte welche Eigenheiten haben und wie man einen verloren gegangenen Teilchenstrahl wieder auf die rechte Bahn bringt.



**Das System von Vorbeschleunigern und Speicherringen bei DESY.**

Ist die Anlage jedoch neu – und, wie im Fall von HERA, noch dazu eine technologische Neuentwicklung –, so gilt es, die passenden Einstellungen erst einmal geduldig herauszufinden. Ein Teilchenstrahl ist kein zusammenhängendes Gebilde. Er besteht vielmehr aus einzelnen „Paketen“, auch „Bunche“ genannt, die Milliarden von Elektronen oder Protonen enthalten.

Der Verantwortliche im Kontrollraum muss also dafür sorgen, dass die Bunche zusammengehalten werden, dass er sie genau auf der vorgeschriebenen Bahn um die Kurve lenkt, dass die Teilchen nicht durch Zusammenstöße mit Restgas im Vakuumrohr gestört werden, dass Elektronen- und Protonenstrahl in den Wechselwirkungspunkten auf Bruchteile von Millimetern genau aufeinander zufliegen und dass die einzelnen Elektronen- und Protonenpakete auch tatsächlich gleichzeitig dort eintreffen! Wenn man dann noch bedenkt, dass die Teilchenstrahlen an den Kollisionspunkten nur Bruchteile von Millimetern Durchmesser besitzen, also so fein sind wie ein menschliches Haar, so erscheint diese Aufgabe praktisch unlösbar.

„Bei HERA sorgt nichts in der Welt dafür, dass sich die Teilchen auch wirklich treffen“, stellt Bernhard Holzer fest, einer der beiden Koordinatoren, die für den Betrieb von HERA verantwortlich sind. „Wir beschleunigen hier zwei völlig unterschiedliche Teilchensorten in komplett getrennten Ringen. An zwei Stellen werden die Teilchen über ausgeklügelte Magnetsysteme zusammengeführt. Anders sieht es bei Anlagen aus, in denen Teilchen und Antiteilchen

beschleunigt werden. Da diese sich nur in ihrer elektrischen Ladung unterscheiden, können sie in einem einzelnen Strahlrohr umlaufen, sie spüren die gleichen Kräfte und treffen automatisch im gleichen Moment am gleichen Ort ein. Wir dagegen mussten die Maschine erst mühsam auf ihre Aufgabe trimmen.“

Um die beiden Teilchenstrahlen überhaupt beherrschen zu können, füllt die HERA-Crew den Beschleuniger in zwei Schritten: Zuerst wird der Protonenstrahl in den Ring eingeschossen, beschleunigt und optimiert. Sind alle Protonenmagnete eingestellt, alle Strahlparameter auf ihrem Sollwert, werden die Protonen vorübergehend „geparkt“: Der Strahl läuft dann einige Millimeter oberhalb der Umlaufbahn, die er im Kollisionsbetrieb hat, durch den Ring. Dies lässt der HERA-Mannschaft Zeit, in einem zweiten Schritt den Elektronenring zu füllen. Dieser Vorgang bleibt jedoch nicht ohne Auswirkungen auf den Protonenstrahl, denn dieser fliegt vor und hinter den Kollisionspunkten ebenfalls durch die Elektronenmagnete – jene Magnete, die den Elektronenstrahl bündeln und ihn gleichzeitig auf die Bahn des Protonenstrahls lenken. Dabei wirken die Felder der Elektronenmagnete auch auf die Protonen, und diese Störungen reichen aus, um den Protonenstrahl binnen kürzester Zeit aus der Bahn zu werfen. Während die Elektronen in HERA eingeschossen und beschleunigt werden, müssen die Magnetfelder des Protonenrings also ständig korrigiert werden, um die Störungen zu kompensieren. Sind beide Teilchenstrahlen optimiert, wird der Protonen-



### HERA-Bau

- Bauzeit: 6 1/2 Jahre, von Mai 1984 bis November 1990
- Gesamtkosten: 700 Millionen €
- Internationale Beteiligung am Bau: 11 Länder
- Tunnelumfang: 6336 m
- Innendurchmesser: 5,2 m
- Tiefe unter der Erde: 10-25 m
- Dicke der Tunnelwände: 30 cm

### HERA-Ring

- Teilchenpakete (Bunche) im Elektronenring: 189
- Teilchenpakete im Protonenring: 180
- Protonen pro Bunch: 100 Milliarden
- Elektronen pro Bunch: 50 Milliarden
- Ein Teilchenpaket durchfliegt den HERA-Ring etwa 47 000-mal in der Sekunde
- Alle 96 milliardstel Sekunden treffen zwei Teilchenpakete aufeinander
- Elektronenring: 84 normal-, 16 supraleitende Beschleunigungsstrecken (Resonatoren), 416 Dipolmagnete (0,16 Tesla), ca. 600 Quadrupole und Sextupole
- Protonenring: 4 normalleitende Resonatoren, 416 supraleitende Dipolmagnete (4,7 Tesla), ca. 600 Quadrupole und Sextupole

### Technische Daten

- Energie der Elektronen: 27,5 Milliarden Elektronenvolt (GeV)
- Energie der Protonen: 920 GeV
- Kollisionsenergie: 320 GeV
- Luminosität: geplant:  $1,5 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$   
erreicht 2000:  $2,0 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$   
geplant ab 2002:  $7,5 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Strahlgröße am Kollisionspunkt: 2000: horizontal: 200  $\mu\text{m}$ , vertikal: 50  $\mu\text{m}$   
ab 2002: horizontal: 120  $\mu\text{m}$ , vertikal: 30  $\mu\text{m}$

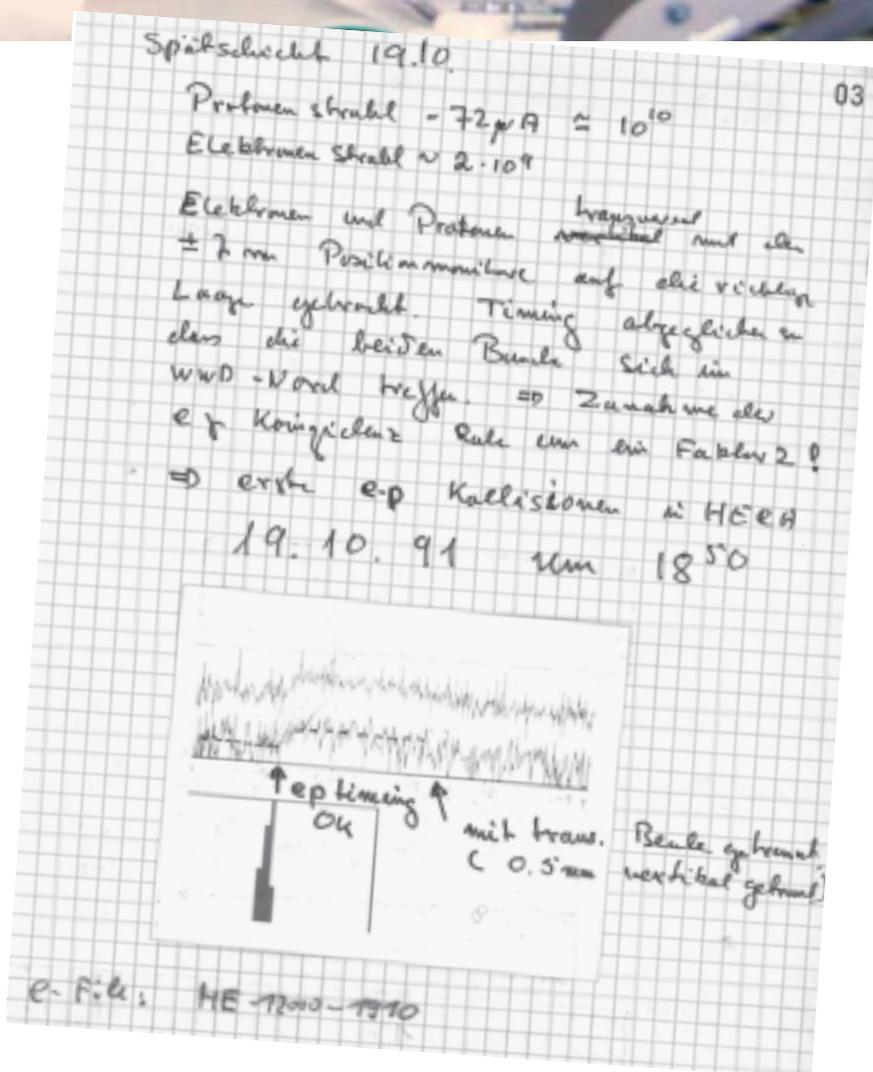


Spätschicht im Beschleunigerkontrollraum am 19. Oktober 1991, Björn H. Wiik stellt letzte Berechnungen an.



strahl auf Kollisionskurs heruntergefahren und der Betrieb „ingerastet“. „Dieses Problem war lange ein Spezialfall von HERA, und wir haben Jahre gebraucht, das Verfahren zu optimieren. Heute ist es Routinesache“, erläutert Holzer. „Inzwischen hat unser Vorgehen Schule gemacht: An neueren Beschleunigern in Japan und den USA, die ebenfalls getrennte Ringe besitzen, hat man dieses Optimierungsverfahren übernommen.“

Bei der ersten Inbetriebnahme einer solch komplexen Anlage kommt so eines zum anderen. Oft vergehen Wochen und Monate des Tüftelns, des Herumprobierens, der Rückschläge und Fortschritte, bevor dann alles stimmt: jedes Magnetfeld genau sitzt, jede Vakuumpumpe durchhält, jedes Netzgerät die richtige Spannung liefert. Am 17. August 1988 war der Elektronenstrahl von HERA zum ersten Mal „durch“. Im Herbst 1990 wurde der letzte Protonenmagnet eingebaut, in der Nacht vom 14. zum 15. April 1991 speicherte die HERA-Mannschaft den ersten Protonenstrahl. Am 19. Oktober 1991 hieß es dann „HERA läuft!“: Zum ersten Mal stießen in den beiden Wechselwirkungszonen Elektronen und Protonen frontal zusammen.



HERA läuft! Ins Logbuch trägt Wiik ein: „Erste e-p-Kollisionen in HERA, 19.10.1991 um 18.50 Uhr“.

# Der Weg der Teilchen durch die Beschleunigerkette

**T**atort DESY, Beschleunigerkontrollraum. Nach der jährlichen Winterunterbrechung soll HERA wieder anlaufen. Vor Wochen schon wurden die Netzgeräte, die den Beschleuniger mit Spannung versorgen, eingeschaltet und getestet. Sie laufen am besten im Dauerbetrieb, weshalb man sie in der Zwischenzeit gar nicht mehr ausgeschaltet hat. Im Kontrollraum bereiten die „Operateure“ – die Physiker, Techniker und Ingenieure, die für die Funktion des Beschleunigers zuständig sind – die „Füllung“ von HERA mit Elektronen und Protonen vor. Beide Teilchenstrahlen werden nicht etwa in HERA von Null auf Lichtgeschwindigkeit gebracht. Die Beschleunigung geschieht vielmehr Schritt für Schritt, in einem komplexen Geflecht von Vorbeschleunigern, in dem nahezu alle Beschleuniger vertreten sind, die im Laufe der 40-jährigen DESY-Geschichte gebaut wurden.

Die Operateure beginnen mit den Protonen, denn diese lassen sich aufgrund ihrer hohen Energie weniger beeindrucken, wenn später der Elektronenstrahl hinzukommt. Zunächst durchlaufen die Teilchen den Linearbeschleuniger LINAC III, der sie auf eine Energie von 50 Millionen Elektronenvolt bringt. Daraufhin schießt man sie in das Synchrotron DESY III ein und transferiert sie dann mit 8 Milliarden Elektronenvolt (d.h. 8 Gigaelektronenvolt, GeV) in den PETRA-Ring, in dem sie auf 40 GeV hochgefahren werden. Zehn der 60 Teilchenpakete

aus PETRA sollen nun in HERA eingebracht werden, um den Protonenring zu optimieren. So einfach geht das jedoch nicht, denn die supraleitenden Magnete des HERA-Protonenrings sind schwer zu beherrschen: Sie brauchen eine Sonderbehandlung, bevor sie auf 0,5 Promille genau das gewünschte Magnetfeld liefern. 20 Minuten lang werden die supraleitenden Magnete deshalb noch ohne Teilchenstrahl „massiert“, d.h. durch einen bestimmten Prozedurenkreislauf gefahren – dann erst können die Operateure sicher sein, dass der Protonenstrahl bei seiner „Injektion“ in HERA auch wirklich die richtigen Magnetfelder vorfindet.

Nun werden die zehn Protonenpakete in HERA eingeschossen. Mit ihnen optimieren die Operateure den Beschleuniger, prüfen die Parameter des Strahls und minimieren – auch mit Hilfe der Experimente – die Strahlverluste. Dann erst wird der HERA-Protonenring komplett gefüllt – mit drei PETRA-Füllungen à 60 Teilchenpakete – und der Strahl auf seine Endenergie von 920 GeV beschleunigt. Bei maximaler Energie stellen die Operateure den Protonenstrahl beiseite; er wird wenige Millimeter nach oben gefahren, wo er ungestört weiter umlaufen kann, während die Elektronen in HERA eingebracht werden.

Auch der Elektronenstrahl durchläuft verschiedene Vorbeschleuniger – vom LINAC II über das Synchrotron DESY II zu PETRA II –, bevor er schließlich in Form von 189 Teilchenpaketen in HERAs Elektronen-

ring eingefädelt wird. Läuft alles glatt, dauert das nur Minuten, denn die normalerweise leitenden Magnete des Elektronenrings brauchen keine Spezialbehandlung.

In einem letzten Schritt müssen die Operateure den zeitlichen Durchlauf der Teilchen synchronisieren – es nützt schließlich wenig, wenn ein Protonenpaket am Wechselwirkungspunkt eintrifft, während sich die Elektronen ganz woanders befinden. Dazu wird der Protonenstrahl auf die Innenkurve gelenkt – er fängt an, die Elektronenpakete „einzuholen“. Laufen die Pakete synchron, wird der Protonenstrahl zurück auf die Sollbahn gebracht, der Betrieb „rastet ein“: An den Wechselwirkungspunkten kollidieren die Teilchen. Zunächst sind es nur wenige. Bis alle vier Experimente ideale Bedingungen vorfinden, vergeht noch etwa eine Viertelstunde des Optimierens. Die Strahlen werden nochmals verkleinert, der Betrieb auf die Bedürfnisse eines jeden Experiments abgestimmt. Hier sind Fingerspitzengefühl und Erfahrung des Operateurs gefragt und eine gute Koordination zwischen den Beschleunigerexperten und den Vertretern der Experimente. Denn HERA ist keine Maschine, die auf Knopfdruck funktioniert – man muss sie kennen und wissen, wie man das Beste aus ihr herausholt. Dementsprechend dauert es etwa zwei Jahre, bis ein Neuling alle Prozeduren beherrscht und den Beschleuniger im Griff hat.



# HERA IM BETRIEB

Die ersten Teilchenkollisionen in einem Speicherring haben etwas von den ersten Worten eines kleinen Kindes: Die Eltern jubeln, die Verwandten applaudieren entzückt – bis das junge Nachwuchstalente ganze Sätze zu ausgefeilten Texten zusammenfügen kann, geht jedoch noch einige Zeit ins Land. Ähnlich ist es bei den großen Beschleunigern. Mit den ersten Teilchenzusammenstößen ist der Grundstein gelegt. Jetzt steht fest, dass die Maschine tatsächlich funktioniert. Doch dann folgt die Zeit des Lernens, des Einarbeitens. Bis eine technisch derart anspruchsvolle Anlage wie HERA mit ihren zwei getrennten Beschleunigerringen auf Knopfdruck so funktioniert, dass die Experimente optimale Bedingungen für ihre Untersuchungen vorfinden, vergehen einige Jahre.

einzelnen Experimente abgestimmt werden, die mit den Teilchenstrahlen arbeiten. Ist eine Anlage mit gleichartigen Experimenten ausgerüstet, wie es zum Beispiel beim *Large Electron-Positron Collider* LEP beim Forschungszentrum CERN in Genf der Fall war, so sind die Randbedingungen der Experimente im Wesentlichen gleich. HERA ist jedoch der einzige Beschleuniger weltweit, an dem zwei Kollisionsexperimente und zwei Strahl-Target-Experimente gleichzeitig betrieben werden. Letztere nutzen jeweils nur einen der beiden Teilchenstrahlen, der auf ein ruhendes Ziel (englisch: *target*) gelenkt wird. Die Randbedingungen der Experimente unterscheiden sich damit ganz wesentlich voneinander. „Alle vier Experimente in den laufenden Betrieb zu integrieren, hat eine Menge Nerven gekostet“, erzählt Bernhard Holzer, der 1991 als Nachwuchswissenschaftler zu HERA kam und heute den Betrieb der Anlage koordiniert. „Es war ein Üben und Lernen auf beiden

Seiten, denn auch die Experimentatoren brauchen Zeit, bis dort ideale Bedingungen herrschen. So etwas funktioniert nur, wenn sich die Experimentiergruppen und die HERA-Crew genau absprechen. Das ist nicht immer leicht; es macht allerdings auch großen Spaß, den Problemen gemeinsam auf den Grund zu gehen.“

Als HERMES eingebaut wurde, war der Untergrund an störenden Reaktionen zunächst so hoch, dass keines der drei zu der Zeit installierten Experimente vernünftige Messungen durchführen konnte. Damals setzten sich die Experten aus der HERA-Gruppe mit den Koordinatoren von HERMES zusammen, um den Ursachen der Störungen auf den Grund zu gehen. Gemeinsam benutzten sie den HERMES-Detektor dazu, Art, Energie und Richtung der störenden Ereignisse zu bestimmen – nach wenigen Wochen war das Problem gelöst. Als das vierte Experiment HERA-B in den Betrieb integriert werden sollte, lagen die Dinge ähn-



lich. Um der Teilchen Herr zu werden, die nach dem Zusammenstoß mit den Target-Drähten von HERA-B durch den Beschleuniger vagabundierten und in den anderen drei Detektoren störende Signale auslösten, rief man schließlich eine „Taskforce“ auf den Plan: Täglich trafen sich die Experten der vier Experimente mit der HERA-Mannschaft, um zusammen zu ergründen, wer was verändert hatte und welche Auswirkungen diese Veränderungen auf Detektoren und Beschleuniger gehabt hatten. Auch hier führte das konsequente gemeinsame Vorgehen zum Erfolg – was der „Taskforce“ auch über DESY-Kreise hinaus zu einiger Berühmtheit verhalf.

Seit 1992 ist HERA in Betrieb. In dieser Zeit konnte die Beschleunigercrew die Leistung und Effizienz des Speicherrings jedes Jahr weiter steigern. In einigen Parametern – wie der so genannten Luminosität, der „Treffrate“ der Elektronen und Protonen – übertrifft HERA sogar



die ursprünglich vorgesehenen Werte. „Zunächst haben wir sehr vorsichtig angefangen“, erinnert sich Holzer, „mit kleinen Intensitäten und damit auch kleiner Luminosität. Schließlich mussten wir erst lernen, mit der hohen Protonenenergie von 820 Gigaelektronenvolt umzugehen.“ Schrittweise verringerte die Mannschaft den Querschnitt der Teilchenstrahlen und füllte den Ring mit immer mehr Teilchenpaketen.

Während der jährlichen Winterunterbrechungen wurde HERA kontinuierlich verbessert. So erwies es sich zum Beispiel lange Zeit als Problem, den Elektronenspeicherring auch wirklich mit Elektronen und nicht nur mit ihren Antiteilchen, den Positronen, zu betreiben: Die Lebensdauer



**Fünf Kilometer Vakuumkammer mussten ausgebaut werden, um HERA für den Betrieb mit Elektronen umzurüsten. Die gelbe „HERA-Tram“ transportiert die schweren Beschleunigerkomponenten an Ort und Stelle.**

des gespeicherten Elektronenstrahls war unerwartet gering. Ursprünglich sorgten so genannte Ionen-Zerstäuberpumpen für das Vakuum im Elektronenstrahlrohr. Diese Pumpen können jedoch positiv geladene Staubpartikel produzieren, die wahrscheinlich von den negativ geladenen Elektronen eingefangen wurden und so den Teilchenstrahl störten. Um dieses Problem zu umgehen, wurde HERA 1994 auf den Betrieb mit Positronen, den Antiteilchen der Elektronen, umgestellt, wodurch sich die Lebensdauer des Strahls etwa auf das Doppelte erhöhen ließ. Um HERA „elektronenverträglicher“ zu machen, ersetzte man während der Winterpause 1997/98 sämtliche Vakuumpumpen des Elektronenspeicherrings durch Absorptionspumpen, die ohne Hochspannung auskommen und damit keine störenden Staubteilchen in das Vakuumrohr hineinbringen. Insgesamt fünf Kilometer Vakuumkammern mussten

dazu aus-, um- und wieder eingebaut werden. Doch nun fliegen auch die Elektronen ausreichend lange durch den Ring.

Schrittweise verbesserte das HERA-Team auch die Zuverlässigkeit und Benutzerfreundlichkeit der Anlage. So wurde das umständlich zu handhabende Kontrollsystem von HERA bis 1998 komplett auf PCs umgestellt. Das neue System nimmt dem Verantwortlichen im Kontrollraum viele Handgriffe ab und vereinfacht ganz wesentlich den Betrieb mit vier Experimenten. Zum Beispiel können die Beschleunigerelemente im Norden und Süden des HERA-Rings – dort, wo sich die beiden Kollisionsexperimente HI und ZEUS befinden – jetzt gleichzeitig eingestellt werden, was mit dem alten System nicht möglich war. Durch den Einbau weiterer Komponenten ist der HERA-Betrieb auch insgesamt stabiler geworden. Der Aufwand zahlte sich aus: 1997 übertraf die über eine Messperiode

integrierte Luminosität – ein Maß für die „Trefferate“ der Teilchen, also die Anzahl der Teilchenkollisionen, die der Beschleuniger liefert – erstmals den vorgesehenen Designwert. 1999 erreichte HERA im Elektronenbetrieb die gleiche Trefferate wie 1997 mit Positronen, obwohl man zwischenzeitlich die Energie der Protonen von 820 auf 920 Gigaelektronenvolt erhöht hatte – eine Umstellung, die trotz größerer Belastung der Komponenten der Anlage problemlos gelang. Nach einem hervorragenden Betriebsjahr 2000, in dem HERA so viele Teilchenkollisionen lieferte wie in keinem Jahr zuvor, standen von September 2000 bis Sommer 2001 umfassende Umbauten zur Steigerung der Luminosität an. Das Ziel: HERAs Leistung um das Vierfache zu erhöhen und die Experimente HI und ZEUS mit polarisierten Elektronen zu versorgen.



## Alles unter Kontrolle

**H**ERA selbst, das sind an sich schon zweimal 6,3 Kilometer geballtes Hightech. Hinzu kommen sieben Vorbeschleuniger von ebenfalls mehreren Kilometern Länge – insgesamt ein riesiger Komplex von technischen Anlagen, die mit einer Genauigkeit von besser als einer milliardstel Sekunde synchron laufen müssen, sollen die Teilchen zur rechten Zeit am richtigen Ort eintreffen. In Bruchteilen von Sekunden müssen hier technische Komponenten abgefragt, kontrolliert und eingestellt werden, die sich manchmal Kilometer weit weg befinden, dort aber größtenteils unabhängig voneinander betrieben werden.

„Mit einem zentralen Rechner und vielen langen Kabeln lässt sich die Kontrolle einer Anlage dieser Größe nicht mehr bewerkstelligen“, erläutert Reinhard Bacher, Leiter der Gruppe „Software und Technik zur Kontrolle von Beschleunigern“. „Stattdessen setzt man bei HERA auf ein dezentrales, weitgehend PC-gestütztes System, das sich in drei Ebenen gliedert.“ Direkt am Beschleuniger übernimmt eine Reihe von Einzelrechnern die Kontrolle von lokalen Systemen: FECs werden sie genannt, *Front End Computer*, die in unmittelbarer Nähe „ihrer“ Kompo-

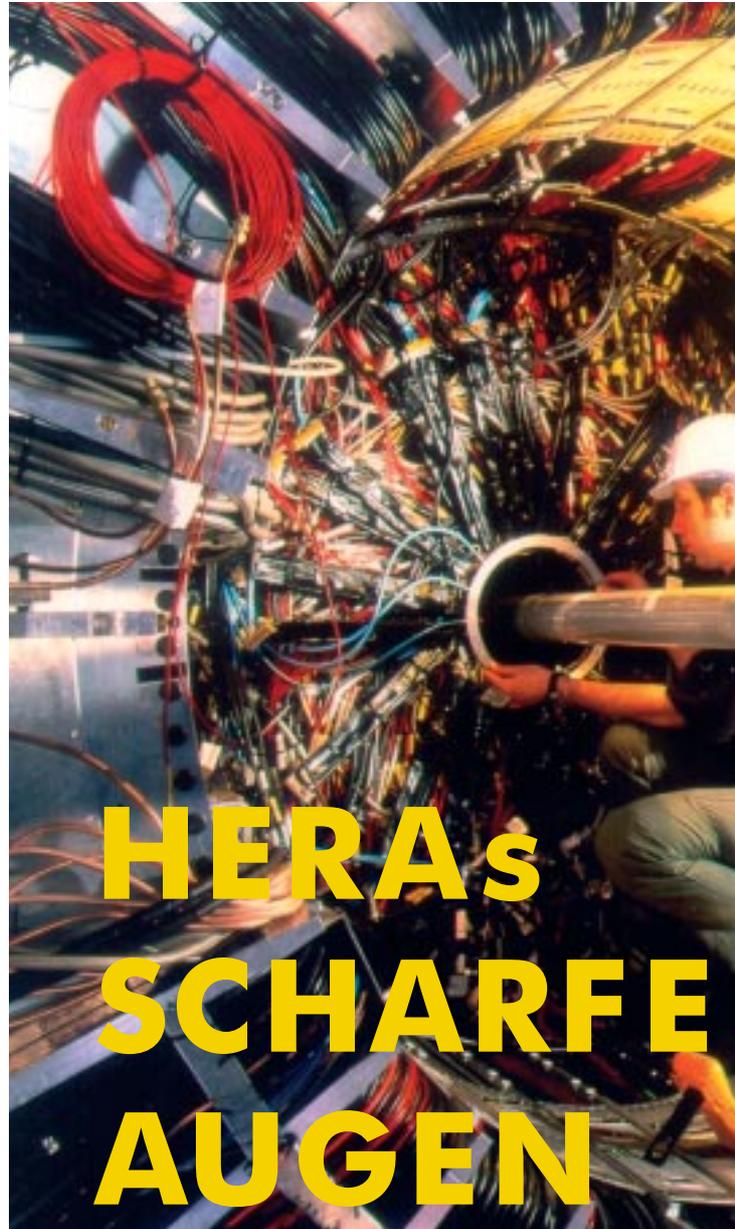
nente stehen und sich selbstständig um deren korrektes Funktionieren kümmern – also Netzgeräte ansteuern oder Messinstrumente auslesen. Über das Beschleuniger-Intranet vermitteln die FECs ihre Informationen an die übrigen Rechner des Kontrollsystems. Auf den Rechnern der mittleren Ebene laufen allgemeine, übergreifende Prozesse, hier werden z.B. Alarmmeldungen gesammelt und Daten archiviert. Die Rechner der letzten Ebene schließlich bilden die Schnittstelle zum Menschen – hier werden die verschiedenen Prozesse dargestellt, Einstellungen verändert, die technischen Subsysteme kontrolliert und die Daten analysiert.

Das Kontrollsystem von HERA ist damit modular und lokal intelligent aufgebaut. „Fällt einer der Rechner aus, so bricht nicht gleich das komplette System zusammen, wie es bei einem Zentralrechner passieren kann“, erklärt Reinhard Bacher. „Auch lässt das dezentrale System den Physikern und Ingenieuren die größtmögliche Freiheit, die Komponenten des Beschleunigers optimal anzusteuern – hier kann jeder genau jene Hard- und Softwareelemente auswählen, die für die zu erledigende Aufgabe am besten geeignet sind.“ Während auf den

Rechnern der unteren Ebene deshalb alle gängigen Betriebssysteme zu finden sind, laufen die Computer auf der Darstellungsebene unter Windows. Schließlich lohnt es sich nicht, ständig neu zu erfinden, was der Massenmarkt billiger und in großer Vielfalt anbietet; hier zahlt es sich aus, von den Produkten und den Standards des kommerziellen Softwaremarkts zu profitieren.

Das Kontrollsystem von HERA ist das größte PC-gestützte Beschleunigerkontrollsystem weltweit. Es kann von jedem Büro bei DESY aus erreicht und bedient werden, im Prinzip sogar von jedem beliebigen Ort der Welt. „Eine große Herausforderung besteht bei einem solchen System allerdings darin, die reibungslose ‚Kommunikation‘ zwischen den verschiedensten Prozessen auf unterschiedlichen Rechnern mit unterschiedlichen Betriebssystemen zu garantieren“, hebt Bacher hervor. Speziell zu diesem Zweck haben die DESY-Wissenschaftler in den vergangenen zehn Jahren die Kommunikationssoftware „TINE“ entwickelt, die es erlaubt, alle bei HERA benutzten Softwaresysteme miteinander reden zu lassen – einen Service, der in seiner Leistung allen kommerziellen Produkten bisher weit überlegen ist.

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. 1992 gingen die ersten zwei Experimente 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 macht sich HERA-B seit 1998 den Protonenstrahl des Speicherrings zunutze, um die physikalischen Geheimnisse schwerer Quarks zu lüften.



# HERA's SCHARFE AUGEN



Die in den unterirdischen HERA-Hallen aufgebauten Detektoren wirken wie riesige Hochleistungskameras: Sie sind groß wie ein dreistöckiges Haus, halb so schwer wie der Eiffelturm und angefüllt mit Hunderttausenden von elektronischen Bauteilen. Um möglichst jedes der in alle Richtungen davonfliegenden Teilchen einfangen zu können, umgeben die Einzelkomponenten der Kollisionsexperimente H1 und ZEUS den Wechselwirkungspunkt, an dem die Elektronen und Protonen zusammenstoßen, wie die Schalen einer Zwiebel. Bei den Strahl-Target-Experimenten HERMES und HERA-B sind die einzelnen Nachweisgeräte dagegen in Schichten hintereinander angeordnet. Denn hier prallt nur ein Teilchenstrahl auf ein

**14 000 goldbeschichtete Drähte: die Driftkammer des H1-Experiments, in der die Spuren der hindurchfliegenden Teilchen vermessen werden.**

ruhendes Ziel (englisch: *target*), so dass die während des Zusammenstoßes produzierten Teilchen in einem engen Kegel in Flugrichtung des einfallenden Strahls weiterfliegen.

In ihrem Zusammenspiel dienen die Komponenten des Detektors dazu, neutrale Teilchen von elektrisch geladenen und schwere von leichten Teilchen zu unterscheiden und je nach der Stärke ihrer Wechselwirkung mit dem nachweisenden Material des Detektors zu klassifizieren. Jede Detektorkomponente hat dabei ihre eigene Funktion: Einige zählen die hindurchfliegenden Teilchen, andere messen deren Spuren, halten einige Teilchen sogar ganz auf und geben die Energie der eingefangenen Teilchen an. Auch der Zeitpunkt der Ankunft der Teilchen wird mit großer Präzision registriert – schließlich müssen die gemessenen Signale dem richtigen Elektron-Proton-Zusammen-



## H1 und ZEUS – Elektronen sondieren das Proton

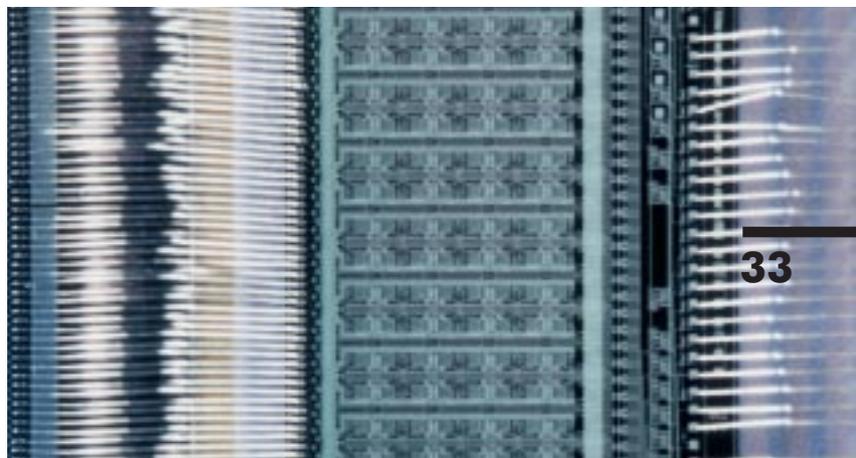
Bei den Kollisionsexperimenten H1 und ZEUS prallen die in HERA kreisenden Elektronen genau im Mittelpunkt der Detektoren frontal auf die ihnen entgegengeschwindigkeitsfliegenden Protonen. Bei diesem Zusammenstoß wirkt das punktförmige Elektron wie eine winzige Sonde, die das Innere des Protons abtastet: Es dringt in das Proton ein, trifft dort auf einen von dessen Bausteinen – ein Quark – und „spricht“ mit diesem über den Austausch eines Kraftteilchens. Das Quark wird dabei aus dem Proton herausgeschlagen; es bildet sich ein ganzes Bündel neuer Teilchen, die mit dem Elektron und den Proton-Bruchstücken in alle Richtungen auseinanderfliegen. Aus den Spuren, welche die Teilchen in den Detektoren

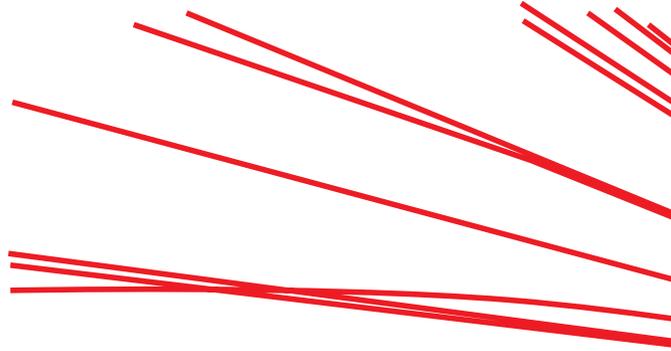
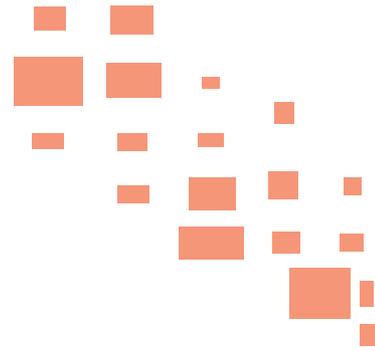
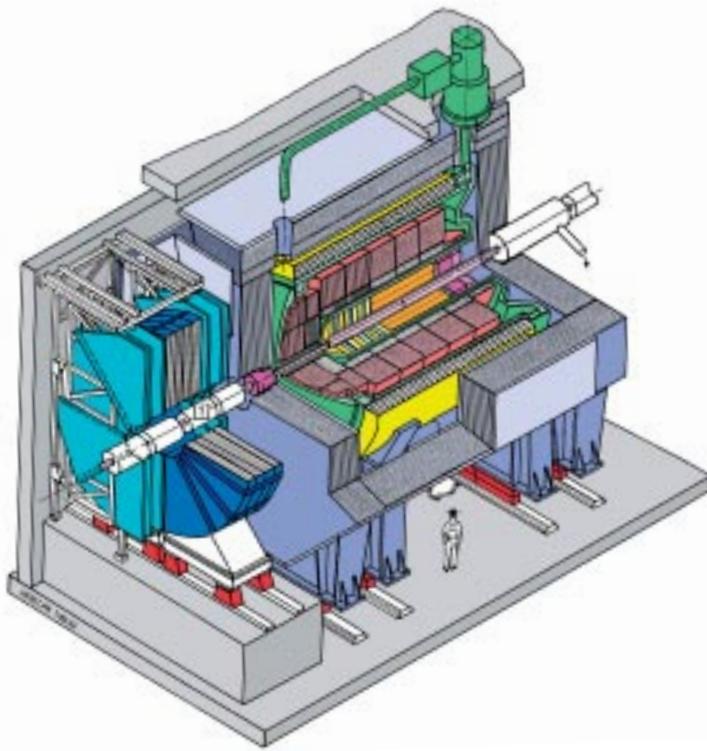
hinterlassen, lassen sich schließlich Rückschlüsse darauf ziehen, was denn nun im Inneren des Protons wirklich passiert. Hierbei geht es nicht etwa nur um die einzelnen Bestandteile des Protons, sondern auch um die Grundkräfte der Natur, die zwischen den Teilchen wirken. Bei HERA fungiert das Proton als „Mikrolabor“, an dem sich die unterschiedlichsten Fragestellungen der heutigen Teilchenphysik gezielt untersuchen lassen. Die dafür verfügbare Energie ist etwa zehnmal größer als bei früheren, ähnlichen Experimenten. HERA wirkt also wie ein „Super-Elektronenmikroskop“, das den weltweit schärfsten Blick ins Proton ermöglicht: Zehnmals genauer als bisher können H1 und ZEUS die Details des Protons unter die Lupe nehmen. Bis hinunter zu Strukturen, die noch einmal 2000-mal kleiner sind als das Proton selbst – das sind 0,000 000 000 000 000 5 Meter.

**Dünn wie ein Viertel des Durchmessers eines menschlichen Haars: die Anschlussdrähte eines Silizium-Streifendetektors für die HERA-Experimente.**

stoß zugeordnet werden. Über Tausende von Kabeln und Lichtleitern werden die Informationen an die weiterverarbeitende Elektronik geleitet.

Pro Sekunde erfassen die riesigen Apparaturen so zehn Millionen Bilder von Teilchenkollisionen – den so genannten Ereignissen. Unmittelbar nach der Aufnahme wählt die Elektronik nach den Vorgaben der Physiker aus den zehn Millionen Bildern eigenständig die viel versprechendsten Kandidaten aus – Sekunde für Sekunde etwa zehn Ereignisse. In einem normalen Betriebsjahr von HERA entstehen so allein bei den Experimenten H1 und ZEUS über 100 Millionen Bilder von Teilchenkollisionen. Diese werden anschließend von den großen internationalen Forscherteams, die die Detektoren betreiben, auf verschiedene physikalische Fragestellungen hin analysiert und ausgewertet.





## Stichwort: Detektor

Als Detektoren bezeichnet man allgemein Nachweisgeräte für Teilchen oder Strahlung. In der Teilchenphysik versteht man darunter auch ein ganzes Experiment, eine oft voluminöse Apparatur aus vielen Einzeldetektoren, mit der die Endprodukte von teilchenphysikalischen Reaktionen nachgewiesen, identifiziert und vermessen werden.

Die HERA-Experimente mit kollidierenden Teilchenstrahlen, H1 und ZEUS, setzen Universaldetektoren ein, die möglichst viele der stattfindenden Reaktionen erfassen und möglichst alle Reaktionsprodukte nachweisen können. Dementsprechend ist der Wechselwirkungsort, an dem die Teilchenstrahlen zusammenstoßen, fast lückenlos von Schichten hochempfindlicher Nachweisgeräte umgeben.

In der innersten Lage werden der Wechselwirkungsort der Strahlteilchen und der Zerfallsort kurzlebiger Teilchen in Nachweisgeräten aus Halbleiterplättchen mit hoher Genauigkeit bestimmt. So genannte Driftkammern vermessen die Spuren, die elektrisch geladene Teilchen hinterlassen. Ein Magnetfeld krümmt ihre Bahnen, so dass sich ihr Impuls bestimmen lässt.

Die nächste Lage bilden so genannte Kalorimeter, mit denen die Energie von einzelnen Teilchen oder ganzen

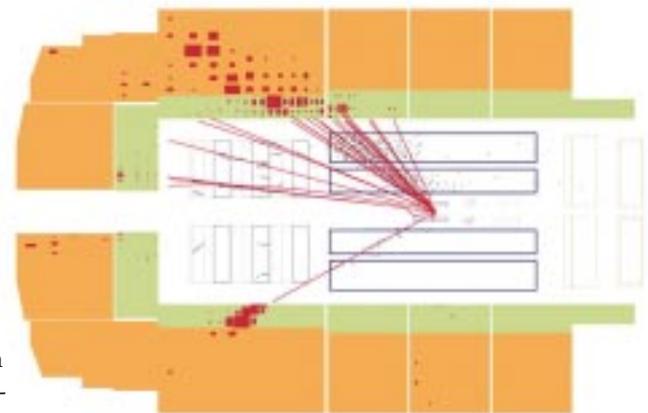
Teilchenbündeln („Jets“) gemessen wird. Typischerweise vermisst der innere, elektromagnetische Teil des Kalorimeters „Teilchenschauer“, die von Elektronen oder Lichtteilchen (Photonen) in Materialien mit hoher Atomzahl wie etwa Blei erzeugt und in verschiedenen Zählern registriert werden. Die äußere Kalorimeterschicht weist die verbleibenden Hadronen nach, d.h. Teilchen, die über die starke Kraft mit dem Material des Kalorimeters reagieren. Diese erzeugen in Platten aus sehr dichtem Material durch Kernreaktionen Lawinen aus elektrisch geladenen Sekundärteilchen, die ebenfalls in Zählern zwischen den Platten nachgewiesen werden.

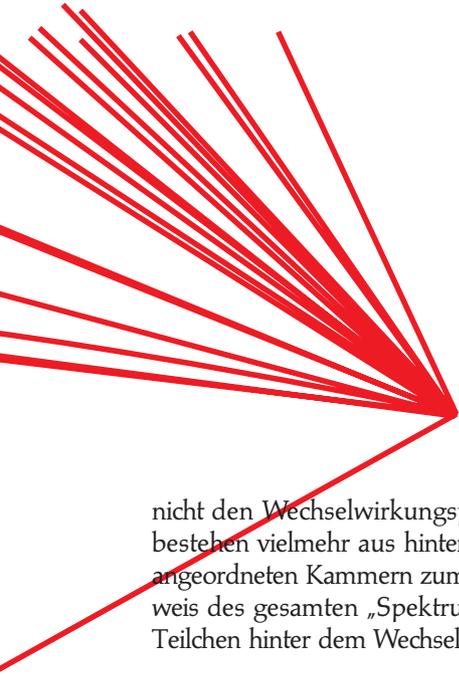
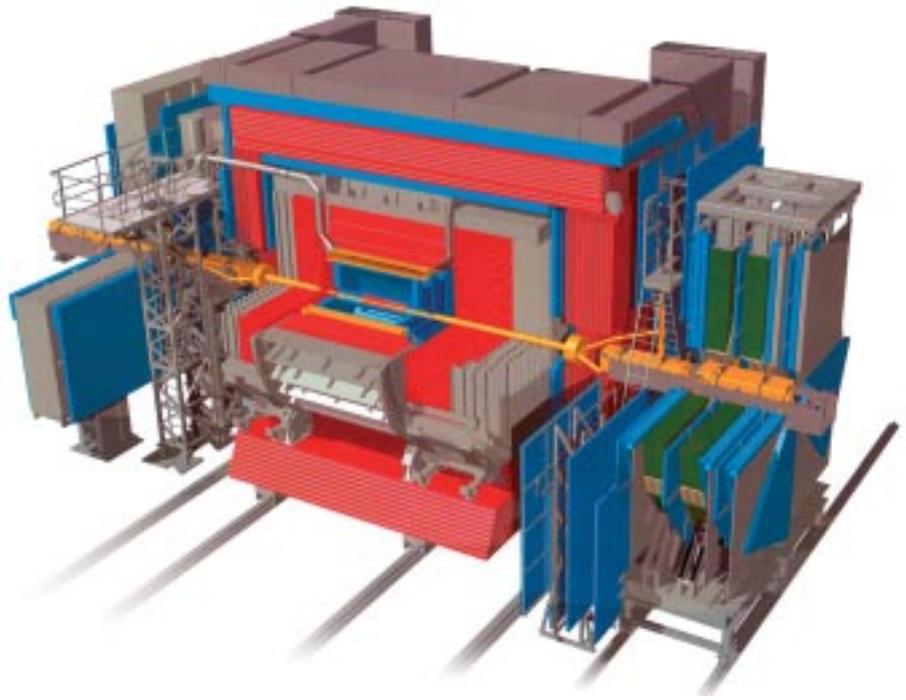
Myonen, die schweren Partner der Elektronen, sind häufig ein Hinweis auf interessante Reaktionen. Sie durchdringen dicke Materieschichten, ohne absorbiert zu werden, was sie von anderen Teilchen unterscheidet. Da man zur Rückführung des Magnetfelds in die Spule ohnehin ein Eisenjoch braucht, nutzt man dieses oft gleichzeitig als Absorber und weist mit großflächigen Nachweisgeräten zwischen

den Eisenplatten die Spuren der hindurchfliegenden Myonen nach.

Einige Teilchen hinterlassen im Detektor keine Spuren, so z.B. die Neutrinos. Umschließt der Detektor den Wechselwirkungspunkt jedoch lückenlos, so ist es möglich, aus der Energie- und Impulsbilanz indirekt auf die Existenz solcher Teilchen zu schließen.

Bei den Experimenten, die nur einen Teilchenstrahl auf ein ruhendes Ziel oder Target richten (HERMES und HERA-B), laufen die meisten Reaktionsprodukte kegelförmig in Flugrichtung des eintreffenden Strahls weiter. Deshalb umschließen die Detektoren – die „Spektrometer“ – in diesem Fall





nicht den Wechselwirkungspunkt; sie bestehen vielmehr aus hintereinander angeordneten Kammern zum Nachweis des gesamten „Spektrums“ an Teilchen hinter dem Wechselwirkungs-

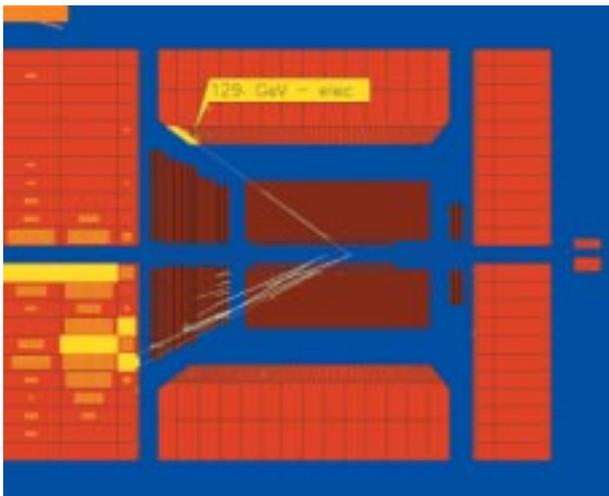
signalen gelangen deshalb zunächst in eine elektronische Verzögerungsleitung, die „Pipeline“, während eine schnelle Elektronik herausfindet, ob sich darin Hinweise auf interessante Reaktionen finden lassen. Diese Analyse wird innerhalb weniger tausendstel Sekunden in mehreren Stufen mit immer schärferen Auswahlkriterien durchgeführt, bis gegebenenfalls die Entscheidung zur endgültigen Speicherung einer bestimmten Reaktion fällt. So sortiert die Elektronik aus 10 Millionen „Anwärtern“ pro Sekunde die etwa zehn viel versprechendsten Ereignisse heraus.

Die akzeptierten Reaktionen werden im zentralen

Rechenzentrum von DESY in komprimierter Form gespeichert. Die anschließende Analyse führt man zum großen Teil extern bei den an den Experimenten beteiligten Instituten durch. In mehreren Durchgängen werden die Ereignisse je nach Fragestellung selektiert, bis schließlich die Reaktionen des physikalischen Prozesses, der untersucht werden soll, herausgefiltert sind.

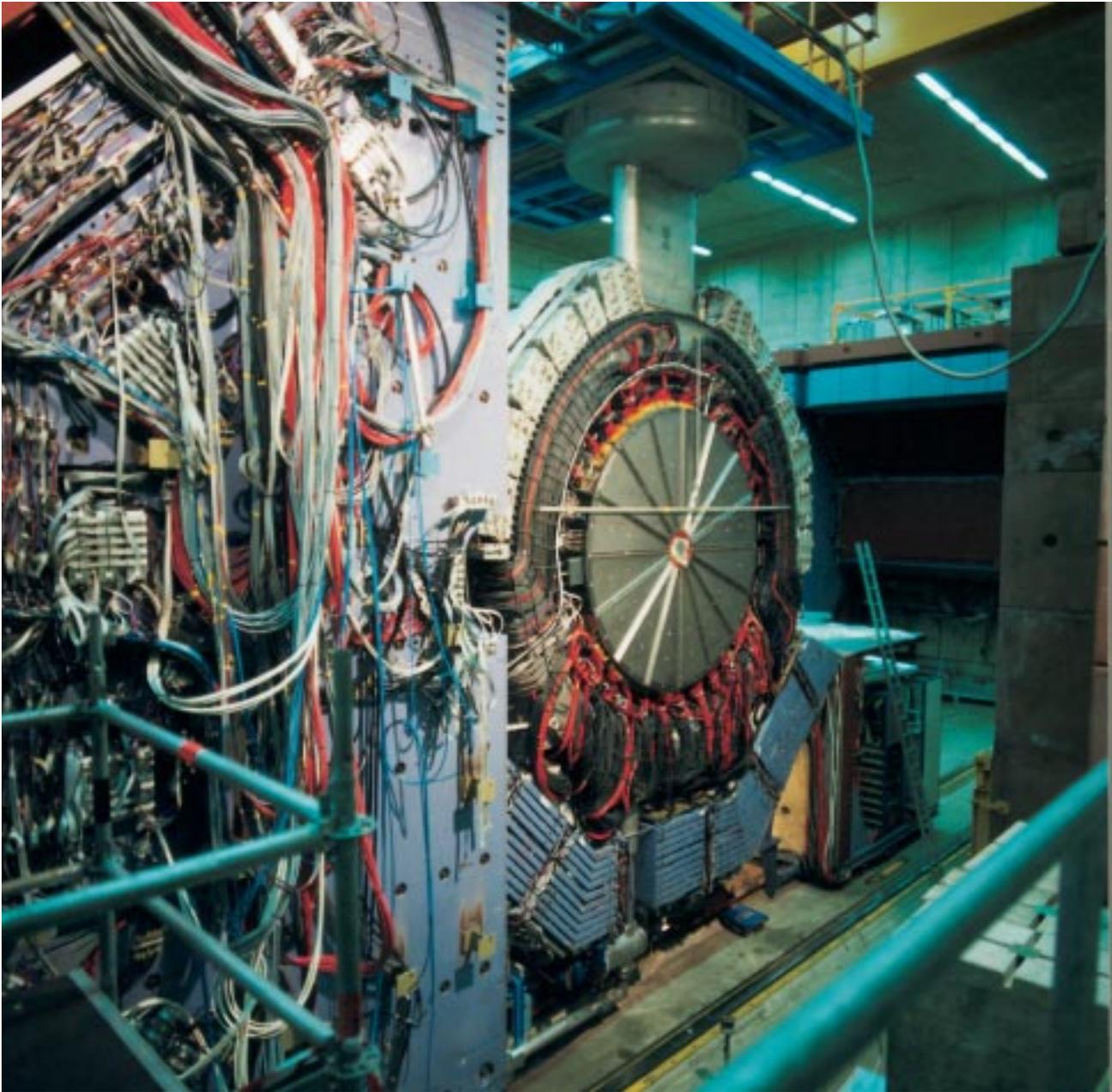
## H1 und ZEUS: Zwei Detektoren sehen mehr!

Die Experimente der Teilchenphysik sind so komplex und aufwendig, dass sie sich nur in internationaler Zusammenarbeit realisieren lassen. Die Detektoren werden deshalb von großen, international zusammengesetzten Teams geplant, gebaut und betrieben. Bei H1 umfasst die Gruppe etwa 330 Physiker, Techniker und Ingenieure von 37 Instituten aus 12 Ländern, bei ZEUS sind es an die 360 Mitglieder von 51 Instituten aus 12 Nationen. Die Experimente unterscheiden sich in ihrem Aufbau und in ihrer Vorgehensweise, sie bearbeiten allerdings ähnliche Forschungsfragen. Dies hat seinen Sinn und liegt an HERAs Einzigartigkeit: Nirgends sonst auf der Welt werden Elektronen und Protonen bei so hohen Energien aufeinander gelenkt. Mit zwei Experimenten lässt sich die Ausbeute an seltenen Prozessen in diesem wissenschaftlichen Neuland verdoppeln. Darüber hinaus ist man gut beraten, Messungen von zwei unabhängigen Forscherteams durchführen und bestätigen zu lassen und so die Ergebnisse zu erhärten. In diesem Sinne ergänzen sich H1 und ZEUS und kontrollieren sich gleichzeitig.



punkt. Die Detektorkomponenten funktionieren nach den gleichen Prinzipien wie die der Experimente mit kollidierenden Teilchenstrahlen.

Um interessante Reaktionen von bereits bekannten Prozessen zu trennen und von unerwünschten Störprozessen zu unterscheiden, müssen die Signale der Detektoren innerhalb von Sekundenbruchteilen auf ihre Eigenschaften hin untersucht werden. Die Zähler-



**Im Bau: der H1-Detektor in der HERA-Halle Nord ...**

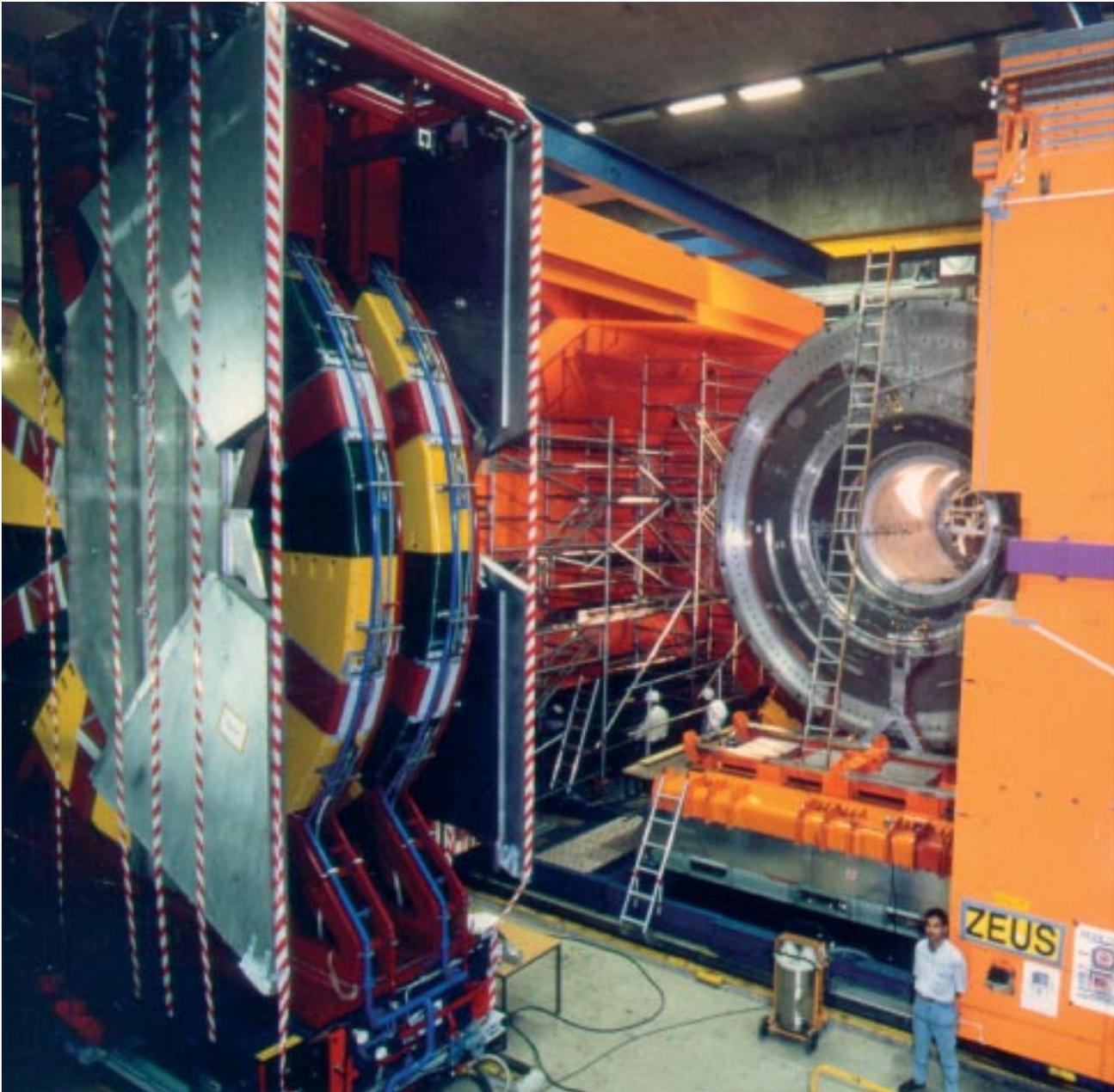
**H**I und ZEUS untersuchen mit unterschiedlichen Nachweis-techniken ähnliche Forschungsfragen. „Wir bestimmen die gleichen physikalischen Größen, leiten sie aber aus unterschiedlichen Messgrößen ab“, erklärt Eckhard Elsen, Sprecher der H1-Gruppe. Der Unterschied liegt vor allem in den „Kalorimetern“, jenen Detektorkomponenten, die die erzeugten Teilchen abbremsen und ihre Energie messen. Das Kalorimeter von H1 besteht aus Blei- und Stahlplatten, deren Zwischenräume mit flüssigem Argon gefüllt sind. Damit lassen sich Teilchen, die über die elektromagnetische Kraft wechselwirken – also insbesondere das gestreute Elektron –, besonders gut messen.

„Hinzu kommt, dass unser Kalorimeter sehr fein in etwa 45 000 Segmente aufgeteilt ist“, erläutert Elsen. „Damit können wir die Struktur der Teilchenschauer genau auflösen und sogar auf die Flugrichtung der Teilchen schließen. Es stehen uns also mehrere Methoden zur Verfügung, um auf den Verlauf des Reaktionsprozesses zu schließen.“ Bei H1 umfasst die große supraleitende Spule, deren Magnetfeld die Flugbahnen der Teilchen krümmt, auch das Kalorimeter. „Die Teilchen müssen also kein weiteres, ‚inaktives‘ Material durchqueren, bevor sie auf das Kalorimeter treffen“, erklärt Elsen. Dadurch wird verhindert, dass die Teilchen im Material der Spule Energie verlieren

– was Korrekturen der Energiemes-  
sung nach sich ziehen würde.

## H1 – Universaldetektor in der HERA-Halle Nord

seit 1992 in Betrieb  
12 m x 10 m x 15 m; 2800 Tonnen;  
von innen nach außen:  
Silizium-Mikrovertex-Detektor,  
Drahtkammersystem,  
Flüssig-Argon-Kalorimeter,  
supraleitende Spule,  
Myonkammern im instrumentierten  
Rückflusseisen,  
Myon-Spektrometer,  
Luminositätsmonitor,  
Proton-Detektor in Vorwärtsrichtung



... und der ZEUS-Detektor in der HERA-Halle Süd.

Während der Schwerpunkt bei H1 auf der Vermessung der Elektronen liegt, konzentrieren wir uns bei ZEUS auf die Teilchen, die über die starke Kraft wechselwirken, die Hadronen“, erklärt Wolfram Zeuner vom ZEUS-Experiment. Diese bilden sich aus den beim Zusammenstoß aus dem Proton herausgeschlagenen Quarks; sie verlassen den Kollisionspunkt als enge Teilchenbündel, so genannte Jets. Das Kalorimeter von ZEUS besteht aus abwechselnden Lagen von abgereichertem Uran und Szintillatorplatten, in denen die hindurchfliegenden Teilchen Lichtblitze auslösen. Das Besondere daran: In dem Kalorimeter erzeugen Elektronen die glei-

chen Signale wie Hadronen. „Im Gegensatz zu H1 müssen wir also nicht erst bestimmen, was das für ein Teilchen war, das wir gestoppt haben, bevor wir seine Energie ausrechnen können“, meint Zeuner. „Wir können die Energie des jeweiligen Teilchens quasi direkt ablesen.“ Darüber hinaus ist die Energieauflösung für Hadronenjets bei ZEUS besonders gut, weshalb die ZEUS-Physiker die Messgrößen dieser Jets in der Analyse stärker bewerten. „Um sicherzugehen, dass wir keine Fehler machen, überprüfen wir die Ergebnisse auch immer mit der Methode des anderen Experiments. Die genauesten Werte erhalten wir allerdings mit unserer eigenen Vorgehensweise“, so Zeuner.

## ZEUS – Universaldetektor in der HERA-Halle Süd

seit 1992 in Betrieb  
 12 m x 11 m x 15 m; 3600 Tonnen;  
 von innen nach außen:  
 Silizium-Mikrovertex-Detektor,  
 Drahtkammersystem,  
 supraleitende Spule,  
 Uran-Szintillator-Kalorimeter,  
 Strahlrohrkalorimeter,  
 Myonkammern,  
 instrumentiertes Rückflusseisen,  
 Myon-Spektrometer,  
 Luminositätsmonitor,  
 Proton-Detektor in Vorwärtsrichtung



## HERMES und der Spin der Nukleonen

In der HERA-Halle Ost steht das Experiment HERMES, das die Physiker auf die Spur des „Spins“ der Nukleonen führen soll. Wie die-

### Spin:

der innere Drehimpuls der Teilchen. Anschaulich kann man sich den Spin der Teilchen am ehesten wie die Drehbewegung eines Kreisels vorstellen – das Bild hat jedoch seine Grenzen, da Teilchen wie Elektronen, Quarks und Gluonen nach heutigem Verständnis punktförmig sind und sich deshalb nicht wirklich um ihre Achse drehen können. Das mit dem Spin verbundene magnetische Moment bewirkt, dass sich die Teilchen in einem Magnetfeld wie kleine Magnete verhalten und sich entsprechend ausrichten.

ser Spin der Nukleonen – also von Proton und Neutron – genau zustande kommt, ist bisher ungeklärt: Zunächst schien es, als ließen sich fast alle Eigenschaften der Nukleonen (wie Ladung, Spin und magnetisches Moment) mit den drei Hauptbestandteilen der Nukleonen – den so genannten Valenzquarks – erklären. Seit Ende der 1980er Jahre hat sich jedoch herausgestellt, dass die Valenzquarks zusammengenommen nur etwa ein Drittel des Gesamtspins liefern. Doch wo kommen die restlichen zwei Drittel her? „Heutzutage geht man davon aus, dass nicht nur die drei Valenzquarks zum Spin des Nukleons beitragen, sondern auch die anderen Teilchen, aus denen sich das Nukleon zusammensetzt: kurzlebige Quarks und

Antiquarks, die aus dem Nichts auftauchen und wieder verschwinden, sowie die zwischen den Quarks ausgetauschten Gluonen“, erläutert Manuella Vinciter, ehemalige Koordinatorin der Physikanalyse bei HERMES. „Außerdem erzeugen die Bewegungen all dieser Teilchen im Inneren des Nukleons zusätzlich einen Bahndrehimpuls, der ebenfalls mit berücksichtigt werden muss.“ Die Zusammensetzung der fehlenden zwei Drittel vom Spin ist jedoch weiterhin offen; die Bestimmung der Einzelbeiträge stößt derzeit noch an experimentelle und theoretische Grenzen.

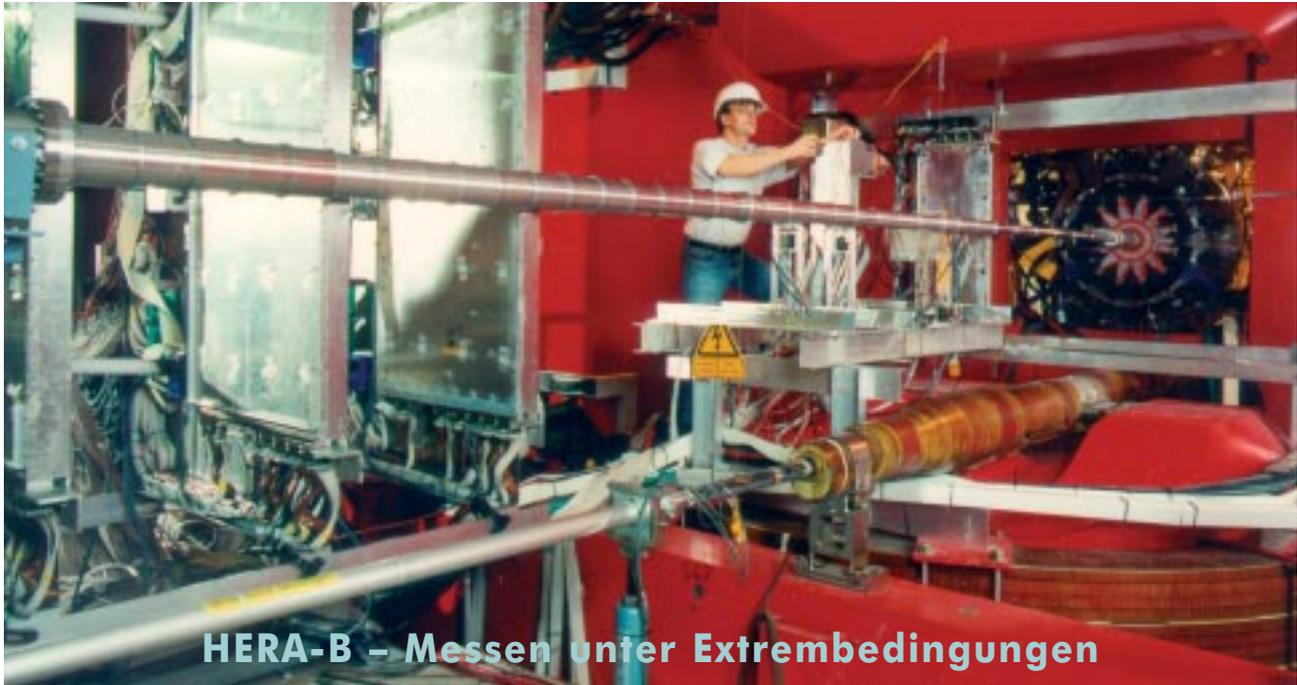
Bei HERMES wird der hochenergetische Elektronenstrahl von HERA auf eine mit Gas gefüllte Zelle gelenkt, in der die Elektronen mit den Nukleonen in den Atomkernen des Gases zusammenstoßen. Das Besondere daran: Sowohl die Elektronen von HERA als auch die Gasatome sind ausgerichtet, d.h., ihr Spin zeigt in eine bevorzugte Richtung. Im Fachjargon spricht man von „polarisierten“ Teilchen. „Die Art und Häufigkeit der Teilchenzusammenstöße hängt von dieser Polarisation ab“, so Vinciter. „Vergleicht man die Teilchenreaktionen, die bei verschiedenen Polarisationsrichtungen der Gasatome auftreten, so lassen sich die unterschiedlichen Beiträge zum Spin der Nukleonen bestimmen.“

Im Gegensatz zu älteren Experimenten, die den Spinanteil der Quarks lediglich als Ganzes ermitteln konnten, verwendet HERMES neue Technologien, die es ermöglichen, die ver-

schiedenen Beiträge zum Nukleonen-spin einzeln aufzuschlüsseln. Hierzu zählt zum einen das gasförmige Target, auf das der polarisierte Elektronenstrahl von HERA trifft. Im Gegensatz zu den sonst üblichen festen Targets enthält das Gastarget von HERMES keine störenden Fremdatome, so dass sehr hohe Polarisationsgrade erreicht werden können. Hinzu kommt, dass der HERMES-Detektor im Gegensatz zu anderen Experimenten nicht nur das im Zusammenstoß gestreute Elektron, sondern auch die dabei erzeugten Teilchen nachweisen und identifizieren kann. So lässt sich die Spinverteilung des Nukleons in die Einzelbeiträge der verschiedenen Sorten von Quarks zerlegen. Auch der Spin der Gluonen bleibt HERMES nicht verborgen: Weltweit konnte HERMES zum ersten Mal einen direkten Hinweis auf den Beitrag der „Klebeiteilchen“ zwischen den Quarks zum Spin des Nukleons liefern.

### HERMES – Spektrometer in der HERA-Halle Ost

seit 1995 in Betrieb  
Nutzung des longitudinal polarisierten Elektronenstrahls von HERA  
3,50 m x 8 m x 5 m; 400 Tonnen;  
polarisiertes Gastarget,  
Spektrometer-Magnet,  
Cherenkov-Zähler (seit 1998 als Ring Imaging Cherenkov (RICH)-Detektor),  
planare Driftkammern,  
Übergangsstrahlungsdetektor,  
Bleiglas-Kalorimeter



## HERA-B – Messen unter Extrembedingungen

Das jüngste Mitglied in der Reihe der HERA-Experimente ist HERA-B im Westen der Speicherringanlage. Der 20 m lange Detektor umgibt das Protonenstrahlrohr von HERA wie ein riesiger Trichter, der den gesamten in der Halle West zur Verfügung stehenden Experimentierbereich ausfüllt. HERA-B benutzt nur den Protonenstrahl von HERA, der auf ein Target aus feinen Drähten prallt. Dabei ent-

### Target (engl.: Zielscheibe):

ein Objekt, an dem durch Beschuss mit Teilchen Reaktionen ausgelöst werden, die danach beobachtet werden.

steht eine Kaskade von Teilchen, die im Detektor registriert werden – darunter in ganz seltenen Fällen auch Paare von Teilchen aus schweren Quarks, die so genannten B-Mesonen, die dem Experiment seinen Namen gaben. „HERA-B wurde speziell zur Untersuchung von bestimmten Zerfällen dieser B-Mesonen gebaut“, erklärt Bernhard Schmidt, DESY-Gruppenleiter bei HERA-B. Diese Prozesse treten allerdings noch viel seltener auf als die Teilchen selbst: „Unter 100 Milliarden Ereignissen findet sich nur eine der gesuchten Reaktionen. Der Detektor muss also eine gewaltige Flut von Teilchenspuren verarbeiten, ehe ab und zu ein solcher Prozess auftritt“, so Schmidt. Die Datenflut, die HERA-B dabei pro Sekunde zu bewältigen hat, entspricht dem gesamten Informationsfluss im Netz

der Deutschen Telekom! „Dieser hohe Teilchenfluss stellt äußerste technische Anforderungen an die Strahlungsbeständigkeit der Detektorkomponenten und an das elektronische Datennahmesystem“, betont Schmidt.

Für solch extreme Messbedingungen gab es Mitte der 1990er Jahre, als das Experiment genehmigt wurde, keine erprobten Nachweismethoden – für das HERA-B-Team galt es also, völlig neue Technologien zu entwickeln, um aus der riesigen Datenmenge die gesuchten Prozesse herauszufiltern. Dazu musste die internationale Forschergruppe sowohl Teilchendetektoren mit einer bisher unerreichten Strahlenresistenz als auch elektronische Verfahren der schnellen Datenverarbeitung konzipieren und realisieren. In beiden Bereichen hat die HERA-B-Gruppe Pionierarbeit für zukünftige Experimente geleistet, bei denen ähnlich harte Bedingungen herrschen werden: so z.B. die am *Large Hadron Collider* LHC, dem im Bau befindlichen Beschleuniger beim Forschungszentrum CERN in Genf.

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 besagten B-Mesonen studieren. Von Anfang an war jedoch klar, dass das Experiment ausgesprochen schwierig ist, insbesondere, was die zu entwickelnden Detektoren anging. Bei der Entwicklung traten unerwartete Schwierigkeiten auf, die zu Ver-

zögerungen führten. Gleichzeitig wurden in Japan und in den USA spezielle Elektron-Positron-Speicherringe mit jeweils einem Experiment gebaut, die 2001 bereits erste Ergebnisse zum Rätsel um Materie und Antimaterie vorstellen konnten. Damit stellte sich für die internationale HERA-B-Gruppe Ende 2000 die Frage, in welcher Form das Experiment fortgeführt werden sollte. Seit 2001 verfolgt das HERA-B-Team nun ein geändertes Physikprogramm, das die vorhandenen Kapazitäten des Detektors möglichst gut ausnutzt. Auf dem Programm stehen Fragen rund um die „starke Kraft“ – eine der vier Naturkräfte –, so z.B., wie Teilchen aus *charm*-Quarks im Inneren von Atomkernen produziert werden und wie sie mit dieser Kernmaterie wechselwirken.

### HERA-B – Spektrometer in der HERA-Halle West

seit 1999 in Betrieb  
Nutzung des Protonenstrahls von HERA  
8 m x 20 m x 9 m; 1000 Tonnen;  
internes Drahttarget,  
Silizium-Vertexdetektor,  
Spurenkammern,  
Ring Imaging Cherenkov (RICH)-Detektor,  
Kalorimeter,  
Myonkammern

# Polarisierte Elektronen

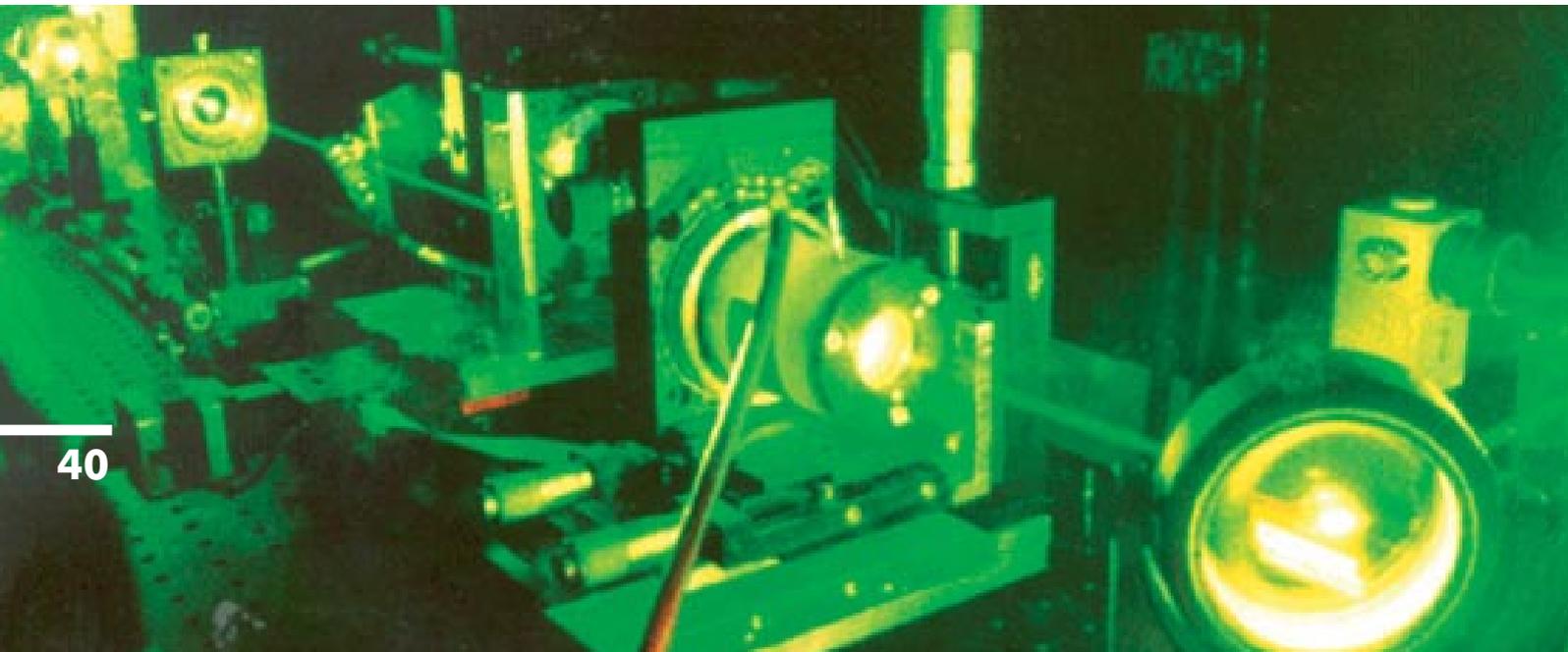
**Ein besonderes technisches Bonbon des HERA-Speicherrings ist die „Polarisation“ des Elektronen- bzw. Positronenstrahls, auf der das HERMES-Experiment beruht. Anschaulich kann man sich die Teilchen des Mikrokosmos wie winzige Kreisel vorstellen – wenn auch der Vergleich hinkt, denn die punktförmigen Elementarteilchen können sich nicht wirklich um ihre Achse drehen. Im Fachjargon spricht man vom „Spin“ der Teilchen. Auch so komplexe, aus kleineren Bausteinen zusammengesetzte Gebilde wie die Nukleonen – die Protonen und Neutronen – besitzen einen Spin. Wie dieser genau zustande kommt, ist bisher nicht geklärt.**

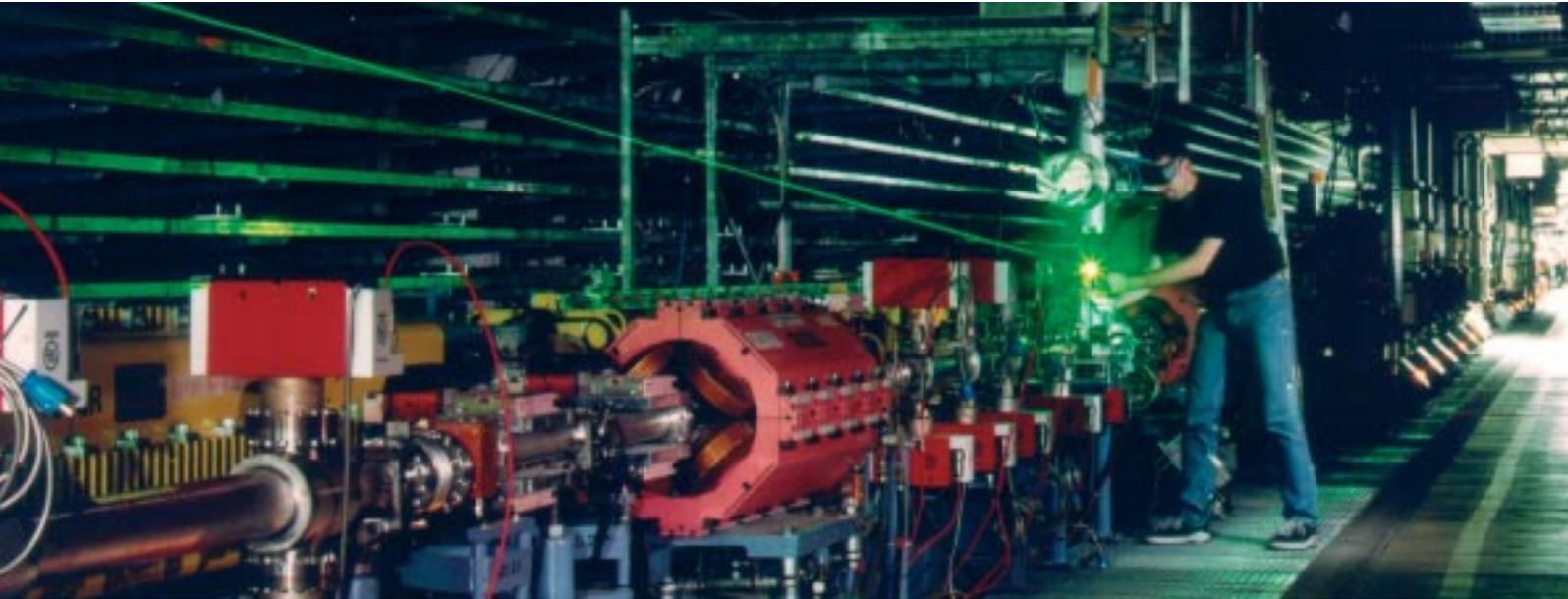
**M**öchte man dieses Spinrätsel ergründen, so genügt es nicht, einfach Teilchen auf Teilchen prallen zu lassen: Bei HERMES müssen die Kollisionspartner – die Elektronen aus dem HERA-

Speicherring und die Atome des Gas-targets – polarisiert sein, d.h., ihre Spins müssen in eine bevorzugte Richtung zeigen. „Bevor das HERMES-Experiment überhaupt genehmigt werden konnte, galt es also nachzuweisen, dass der Elektronenstrahl von HERA tatsächlich polarisiert werden kann – und zwar longitudinal, also parallel zur Flugrichtung der Elektronen“, erklärt Marc Beckmann, Nachwuchswissenschaftler bei HERMES.

Mitte der 1960er Jahre erkannten die beiden russischen Physiker Arsenii A. Sokolov und Igor M. Ternov, dass sich die Elektronen in einem Speicherring im Prinzip automatisch in eine bevorzugte Richtung ausrichten, nämlich antiparallel zu den Magnetfeldern, die sie auf ihrer Kreisbahn halten, und damit senkrecht zur Flugrichtung der Teilchen. Dieser Effekt konnte auch bei HERA kurz nach der Inbetriebnahme beobachtet werden. „Für das HERMES-Experiment benötigen man allerdings Elektronen,

deren Spins parallel zur Flugrichtung ausgerichtet sind“, so Beckmann. „Es galt also, die Spins der Elektronen vor der HERA-Halle Ost, in der das Experiment aufgebaut werden sollte, aus der vertikalen Richtung in Flugrichtung der Elektronen umzuklappen – und sie kurz hinter dem Detektor wieder zurück in ihre Ausgangsposition zu bringen.“ Dazu entwickelte der DESY-Physiker Klaus Steffen zusammen mit Jean Buon aus dem französischen Orsay einen 60 Meter langen „Spinrotator“: ein System aus acht hintereinander geschalteten Ablenkmagneten, die den Elektronenstrahl auf eine Art „Korkenzieherbahn“ lenken. Dabei vollführt der Spin der Teilchen eine komplizierte Torkelbewegung, um schließlich am Ausgang des Spinrotators in die gewünschte Richtung zu zeigen. Hinter dem Experiment steht eine spiegelbildliche Anordnung, welche die Spins wieder zurück in die Senkrechte klappt.





**Im Betrieb von HERA wird der grüne Laserstrahl 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.**

Die transversale Polarisation des Elektronenstrahls stellt sich über den Sokolov-Ternov-Mechanismus in HERA zwar im Prinzip von selbst ein, der Effekt ist allerdings winzig klein: Erst nach über einer halben Stunde – das entspricht ca. 85 Millionen Umläufen der Teilchen, in denen sie über 500 Millionen Kilometer zurücklegen – ist der Elektronenstrahl etwa zu 50 % polarisiert, zeigen also dreimal mehr Spins nach oben als nach unten. Zudem reagieren die Teilchenspins äußerst empfindlich auf jede Störung im Speicherring. Die störenden Effekte nehmen mit zunehmender Energie des Teilchenstrahls zu; sie sind äußerst schwer zu bestimmen, weshalb es sehr schwierig ist, das Verhalten der Spins zu berechnen.

Dass sich ein longitudinal polarisierter Elektronenstrahl bei den hohen Energien des HERA-Speicherrings tatsächlich realisieren lässt, bewies die HERA-Crew im Mai 1994: Während der Unterbrechung des HERA-Betriebs im Winter 1993/94 waren die ausgeklügelten Magnetsysteme der Spinrotatoren vor und hinter der HERA-Halle Ost eingebaut worden. Am 3. Mai 1994 optimierte die HERA-Crew die transversale Polarisation ohne Spinrotatoren auf 65 %. Am nächsten Morgen fuhr man die Rotatoren in Position, und am frühen Nachmittag knallten im Kontrollraum die Korken: Auf Antrieb hatte man eine longitudinale Polarisation von 55 % erreicht – einen sehr hohen Wert und überhaupt das erste Mal, dass ein in einem Speicherring umlaufender,

hochenergetischer Elektronenstrahl longitudinal polarisiert werden konnte. Bei jedem Umlauf der Teilchen klappten die Rotatoren die Spins aus der Senkrechten in die Horizontale und wieder zurück – 47 000-mal in der Sekunde. Damit war der Weg frei für das Experiment HERMES, das seitdem von HERA zuverlässig mit polarisierten Elektronen versorgt wird. Die Polarisation des Teilchenstrahls erreicht dabei routinemäßig 60 %, Spitzenwerte liegen bei 70 %. Während des großen Umbaus von HERA von September 2000 bis Juni 2001 wurden im Norden und Süden der Anlage weitere Spinrotatoren eingebaut, so dass in Zukunft auch die Kollisionsexperimente H1 und ZEUS den Spin der Elektronen für ihre Fragestellungen nutzen können.

## Wie wird Polarisation gemessen?

Wie hoch die Polarisation des HERA-Elektronenstrahls tatsächlich ist, ist für HERMES von größter Bedeutung: Nicht nur, dass die Güte bestimmter Messungen vom Quadrat der Polarisation abhängt, bei halb so großer Polarisation also viermal so lang gemessen werden muss. Die präzise Bestimmung des Polarisationsgrads ist für die Auswertung der HERMES-Daten unentbehrlich. Um ganz sicher zu sein, bauten die Physiker am HERA-Ring deshalb gleich zwei Systeme ein, anhand deren sie die Polarisation des Elektronenstrahls untersuchen können: ein transversales und ein longitudinales „Polarimeter“.

Das ältere der beiden Systeme steht im Westen der HERA-Anlage. Es misst die transversale Polarisation, die sich im Speicherring automatisch aufbaut. Das longitudinale Polarimeter wurde 1996 eingebaut, es untersucht die Polarisation zwischen den Spinrotatoren direkt am HERMES-Experiment. In beiden Fällen wird ein Laserstrahl über ferngesteuerte Spiegel durch ein bis zu 200 Meter langes Rohrsystem nahezu frontal auf die heranfliegenden Elektronen gelenkt. Einige der Lichtteilchen (oder Photonen) werden dabei mit voller Wucht zurückgeschleudert und schließlich in einem Nachweisgerät aufgefangen.

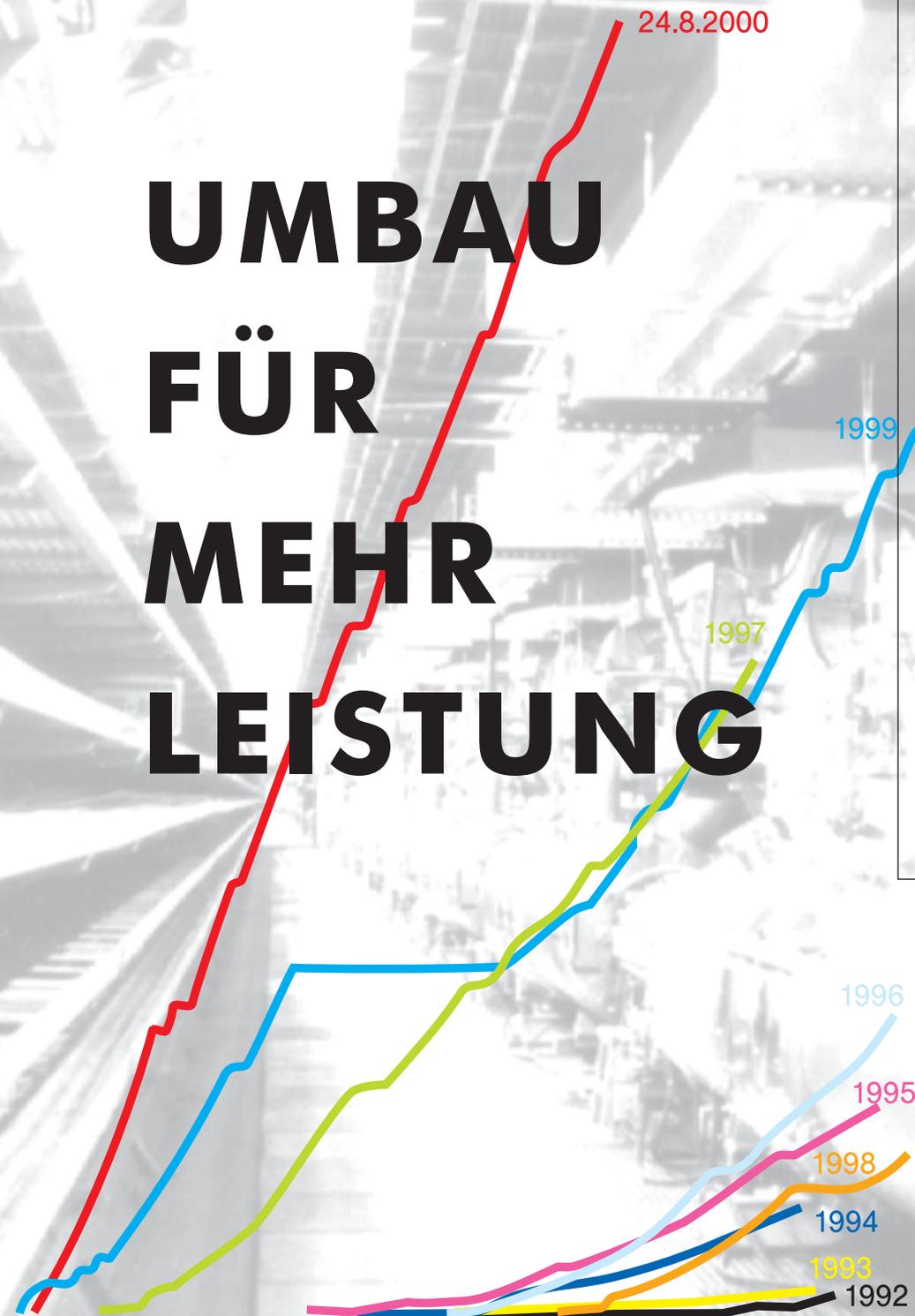
Je nach Polarisationszustand der Lichtteilchen im Laserstrahl und der Elektronen im Beschleunigerring unterscheiden sich diese Mess-Signale: Beim transversalen Polarimeter verschiebt sich das Signal nach oben oder unten, beim longitudinalen verändern sich Energie und Anzahl der zurückgestreuten Photonen. Aus dieser Differenz lässt sich direkt ablesen, zu welchem Grad die Elektronen polarisiert sind.

Ein Vorteil dieser Methode liegt in der Geschwindigkeit der Messungen. Jede Minute schicken die Polarimeter einen Messwert an den Beschleunigerkontrollraum, der Aufbau der Polarisation lässt sich also quasi „online“ verfolgen und optimieren. Während das transversale Polarimeter bislang für alle im Ring umlaufenden Teilchenpakete oder Bunche nur einen durchschnittlichen Wert angeben konnte, kann das longitudinale Polarimeter sogar die Polarisation jedes einzelnen Pakets ermitteln. Und das sorgte gleich für eine Überraschung: Denn die Polarisation der Elektronenbunche ist unterschiedlich, je nachdem, ob sie mit entsprechenden Protonenpaketen zusammenstoßen oder ob es sich um nicht kollidierende „Kontrollbunche“ handelt – ein Effekt, der bei HERA zum ersten Mal beobachtet wurde.

# UMBAU FÜR MEHR LEISTUNG

## Luminosität:

Die Luminosität ist ein Maß für die Leistungsfähigkeit eines Beschleunigers: Sie gibt die Zahl der Ereignisse einer bestimmten Reaktion an, die beim Zusammenstoß der Teilchen in jeder Sekunde stattfinden. Bei gegebener Reaktionswahrscheinlichkeit (dem „Wirkungsquerschnitt“ des untersuchten Prozesses) finden damit umso mehr Reaktionen statt, je größer die Luminosität des Beschleunigers ist. Da die Wirkungsquerschnitte der heute untersuchten Prozesse extrem klein sind, muss die Luminosität entsprechend hoch sein, um die Messzeiten in Grenzen zu halten. In der Praxis addiert man die Luminosität oft über einen bestimmten Zeitraum, z.B. eine Betriebsperiode des Beschleunigers; man spricht dann von der integrierten Luminosität, die einer gewissen Menge an erzeugten Ereignissen entspricht.



Auf das Jahr 2000 kann DESYs Beschleunigercrew stolz sein. Die steil ansteigenden Kurven der jährlich erzielten „Trefferate“ zeigen es ganz klar: Seit der Inbetriebnahme von HERA im Jahr 1992 ist die Leistung der Beschleunigeranlage unaufhaltsam gestiegen – eine Entwicklung, die in der 2000er Mess-

periode ihren krönenden Abschluss fand. Insgesamt verbrachte die HERA-Crew seit dem Beginn der Messperiode am 17. Januar 2000 nur 18 Tage mit Wartungsarbeiten und Maschinenstudien. Nahezu alle Parameter des Beschleunigers erreichten die ursprünglich vorgesehenen Designwerte, andere übertrafen sie so-

gar. Insbesondere lag die integrierte Luminosität – ein Maß für die Trefferate der Elektronen und Protonen im Speicherring, d.h. ein Maß für die Anzahl der Zusammenstöße, welche die Experimente beobachten können – in der Messperiode 2000 weit über den Werten der Jahre davor.



BAU 11



**Die tonnenschweren neuen Magnete werden mit Hilfe der „HERA-Tram“ im Tunnel transportiert und aufgestellt.**



**Ein Quadrupolmagnet wird an seine Position gebracht. Er bündelt den im Beschleuniger umlaufenden Protonenstrahl.**

Von September 2000 bis Juli 2001 wurde HERA umgebaut: Der „Lumi-Upgrade“ stand an. Ziel dieses umfassenden Umbauprogramms war es, die Luminosität des Speicherrings um das Vierfache zu erhöhen, um den Experimenten Zugang zu extrem seltenen Prozessen zu verschaffen und damit HERAs Blick für Teilchen und Kräfte jenseits der gängigen Theorie weiter zu schärfen. Damit können die HERA-Experimente auch die Struktur des Protons und die Grundkräfte der Natur bei

noch kleineren Abständen untersuchen, als es bisher möglich war.

Um die Luminosität derart zu erhöhen, mussten die Querschnitte der Elektronen- und Protonenstrahlen vor dem Zusammenstoß auf ein Drittel ihrer vorherigen Fläche verkleinert werden, d.h. von sowieso nur einem hunderstel Quadratmillimeter auf winzige drei tausendstel Quadratmillimeter. Dieser Kraftakt erforderte eine aufwendige Neugestaltung der Wechselwirkungszone, in denen die Teilchenstrahlen aufeinander gelenkt

werden – also genau jener Stellen, die ohnehin zu den technisch anspruchsvollsten der Anlage gehören. Insbesondere mussten die „Magnetlinsen“ zur Fokussierung des Elektronenstrahls, die ursprünglich 5,80 Meter von den Kollisionpunkten im Zentrum der Detektoren entfernt waren, bis auf 1,90 Meter an die Kollisionspunkte heran verlegt werden. Die Magnete befinden sich nun innerhalb der Detektoren, die dazu erheblich umgebaut werden mussten. Außerdem wurde der Elektronenring von

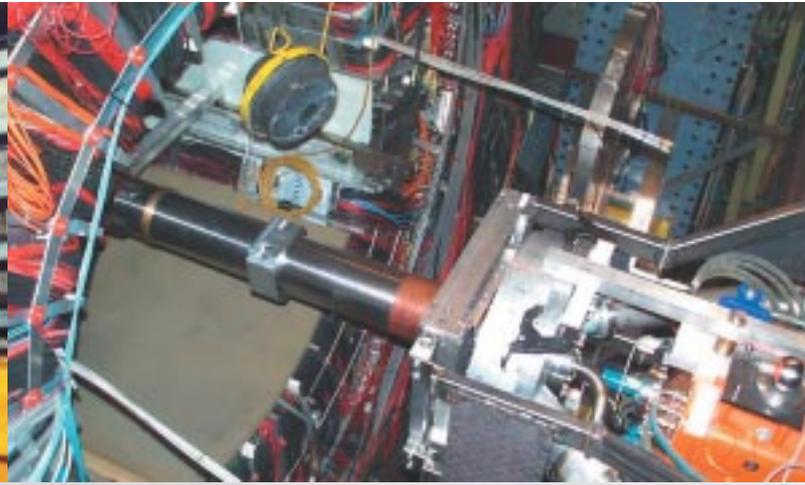
**Lagebesprechung im Tunnel: Genaue Planung und Durchführung sind für den reibungslosen Ablauf eines solchen Großprojekts unerlässlich.**

**Aufbau der Stützen für die Spinrotatoren: Wie auf einer Hebebühne kann der Beschleuniger in diesem Bereich auf und ab gefahren werden.**





**Das Aufstellen der schweren Magneten ist Präzisionsarbeit. Auf wenige zehntel Millimeter genau muss hier alles zueinander passen.**



**Die Magnete, die dem Kollisionspunkt der Teilchen am nächsten sind, müssen direkt in die Detektoren eingebaut werden.**

HERA mit zwei weiteren Systemen von Spinrotatoren ausgerüstet, so dass neben HERMES nun auch H1 und ZEUS den Spin der Elektronen für ihre Fragestellungen nutzen können.

Die Luminositäts-erhöhung von HERA stellte somit nicht nur für den HERA-Beschleuniger selbst, sondern auch für die Experimente H1 und ZEUS eine enorme technische Herausforderung dar: Die ersten Magnete, welche die Teilchenstrahlen vor der Kollision zusammenführen und hinterher wieder auseinander lenken,

wurden direkt in die Detektoren H1 und ZEUS hineingebaut. In den hohen Feldern dieser Magnete senden die leichten Elektronen Synchrotronstrahlung aus, die die Datennahme durch die Detektoren stark behindern oder gar unmöglich machen kann. Um dieses Problem zu lösen, wurde eine Reihe unkonventioneller Komponenten entworfen, die während des „Lumi-Upgrades“ in die Anlage eingebaut wurden – z.B. extrem kleine supraleitende Magnete, die in die Detektoren H1 und ZEUS integriert

wurden, sowie schlüssellochförmige Vakuumkammern. Neun Monate lang dauerten die Umbauten im Tunnel. Mitte 2001 ging HERA wieder an den Start – zur Routine wird der Betrieb mit hoher Luminosität und polarisierten Elektronen dann nach Abschluss der komplexen Inbetriebnahme- und Optimierungsphase im Laufe des Jahres 2003.

**Neu eingebaute Spinrotatoren erlauben es auch den Experimenten H1 und ZEUS, den Spin der Elektronen für ihre Untersuchungen zu nutzen.**

**Umbau abgeschlossen: 25 m vor dem Kollisionspunkt verlaufen die Vakuumkammern für die Teilchenstrahlen bereits in gemeinsamen Magneten.**





# Wozu Grundlagenfors Teilchenbeschleunige

**Oft wird die – berechnete – Frage gestellt, ob wir uns so große und teure Anlagen wie die Beschleuniger der Teilchenforschung wirklich leisten sollen. Nun ist es keineswegs so, dass Großgeräte für die Forschung eine Erscheinung unserer Tage wären. So stellte etwa die dänische Krone dem Astronomen Tycho Brahe im 16. Jahrhundert eine ganze Insel sowie nahezu unbegrenzte Ressourcen an Menschen und Kapital für ein großes astronomisches Observatorium zur Verfügung. Die Ergebnisse von Brahes präzisen Messungen der Sternpositionen öffneten in der Hand des genialen Johannes Kepler nicht nur die Tür zur modernen Astronomie und Kosmologie – reinen Erkenntniswissenschaften –, sondern auch zur Mechanik Galileo Galileis und Isaac Newtons und damit zu einer eminent praktischen Wissenschaft, ohne die es keine Autos, keine Maschinen – ja überhaupt unsere Technik nicht gäbe.**

**H**eute werden Großgeräte in vielen Bereichen der Wissenschaft benötigt. Am Beispiel der Forschungsschiffe wird die Motivation der großen Forschungsunternehmen besonders deutlich: Aufbruch zu neuen Ufern des Erforschbaren, die Faszination des Unvorhersehbaren, schließlich die Zuversicht, dass Kosten, Mühen und Risiken sich am Ende für die Gesellschaft auszahlen.

Man mag es beklagen, dass die Forschungsgeräte zunehmend größer und teurer, die Experimente lang-



wieriger und die Forschungsarbeiten mehr und mehr wie industrielle Projekte geführt werden. Der Grund hierfür ist nicht etwa die Megalomanie der Forscher, sondern das Fortschreiten der Wissenschaft, ihr Vordringen in tiefere Strukturen der Materie oder bisher unzugängliche Regionen des Kosmos, allgemein ihre Beschäftigung mit zunehmend komplexeren Fragestellungen. Dazu sind große Instrumente und Anlagen und der Einsatz anspruchsvollster Technologie vielfach zwingend – die Naturgesetze lassen uns keine andere Wahl. Dies ist besonders sinnfällig etwa in der Astronomie, die für ihren Blick in die entlegensten Regionen des Kosmos zunehmend größere Teleskope erfordert und damit immer neue überraschende Erkenntnisse über unsere Welt liefert, je weiter sie

in die Tiefe des Universums vordringt. So haben Instrumente wie das Röntgenstrahlungsteleskop ROSAT oder das Hubble-Weltraumteleskop einen wahren Erkenntnis Schub ausgelöst. In der Elementarteilchenforschung ist es ähnlich: Je tiefer wir in die innersten Schichten der Materie eindringen, desto mehr erkennen wir die Zusammenhänge im Funktionieren der Natur. Desto größer sind aber auch die Ressourcen – an Ideen, an Instrumenten und an Arbeitseinsatz –, die wir dafür benötigen. Insbesondere brauchen wir immer leistungsfähigere „Mikroskope“ – nämlich die Teilchenbeschleuniger.

Was aber „bringt“ solche Forschung? Nun, die Anstrengungen und Mittel, welche die Menschheit in die Erforschung der Natur investiert hat, haben sich letzten Endes stets bezahlt



gemacht. Tycho Brahes astronomisches Großprojekt ist dafür ein herausragendes Beispiel. Welchen Rang



# chung mit rn?

VON PAUL SÖDING

die Erkenntnisse der Teilchenforschung unter den Errungenschaften der Menschheit einmal einnehmen werden, das wissen wir noch nicht. Doch über die Teilchenbeschleuniger können wir heute schon eines sagen: Erfunden, entwickelt und gebaut, um herauszufinden, „was die Welt im Innersten zusammenhält“, dienen sie in abgewandelter Form bereits auch der Diagnose und Therapie von Krankheiten und erzeugen Synchrotronstrahlung und Neutronen für die Forschung in den verschiedensten Wissenschaftsdisziplinen, von der Physik über die Chemie, Geologie, Materialforschung, Biologie und Medizin bis hin zur Kriminologie. Ihr volles Potenzial dürfte wohl erst von künftigen Generationen ausgeschöpft werden. Auch die von den Teilchenphysikern für ihre Experimente entwickelten vielfältigen neuen Technologien haben sich auf anderen Gebieten, etwa in der Medizin, als segensreich erwiesen – ja sie haben sogar, in der Gestalt



des *World Wide Web* (WWW), eine Revolution in der weltweiten Vernetzung von Information und Wissen ausgelöst.

Wenn auch die Wissensinnovation und Wertschöpfung, die sich aus einem bestimmten Forschungsprojekt ergeben, in ihrer ganzen Breite erfahrungsgemäß nicht vorhersehbar sind, so haben die Entwicklungen neuer großer Forschungsgeräte in der Vergangenheit in aller Regel bedeutende Meilensteine im Erkenntnisfortschritt gesetzt. Größere Entwicklungen in den Naturwissenschaften und die Eröffnung und Erschließung neuer Forschungsgebiete hingen meist eng mit der Schaffung neuer, spezifischer Instrumente zusammen.

Der HERA-Beschleuniger ist so ein neuartiges Instrument. Und in der Tat kann bereits nach dem Abschluss der ersten Phase der Forschungsarbeiten festgestellt werden, dass HERA uns zu einem wesentlich tieferen Einblick in den Aufbau der Materie, hier speziell des Protons und Neutrons, verholfen hat. Immer deutlicher wird die komplexe dynamische Struktur aus Quarks, Antiquarks und Gluonen „sichtbar“, die das Innere unserer Materie bildet. Damit steigt auch die Aussicht, Struktur und Aufbau der Materie besser verstehen zu lernen – wobei „verstehen“ nicht nur bedeutet, das Funktionieren und das Zusammenspiel der kleinsten Teilchen

zu kennen, sondern auch zu durchschauen, weshalb die Natur gerade so ist, wie sie ist, und nicht anders. Auf diesem Weg wird uns HERA auch in der Zukunft weiter voranbringen. Wir dürfen gespannt darauf sein, welche Einsichten und Überraschungen uns bei dieser Entdeckungsreise in das Innerste der Materie noch bevorstehen.

Prof. Dr. Paul Söding  
Forschungsdirektor von DESY,  
1982-1991  
Leiter des Forschungsbereichs  
DESY Zeuthen, 1992-1998





# DESY und HERA als Wirtschafts

EINE STUDIE DES INSTITUTS FÜR ALLOKATION UND WETTBEWERB

**Wie der Betrieb von DESY – und insbesondere seiner Speicherringanlage HERA – die deutsche Wirtschaft beeinflusst, hat das Institut für Allokation und Wettbewerb der Universität Hamburg genauer untersucht. Im Februar 2000 veröffentlichten Wilhelm Pfähler und Christian Gabriel die Ergebnisse einer Studie zum „Wirtschaftsfaktor Grundlagenforschung: Das DESY in Hamburg“. Ziel dieser Untersuchung war es, Informationen über die regionalwirtschaftliche Bedeutung des Forschungszentrums zu sammeln, aufzubereiten und der Leitung und den Geldgebern von DESY sowie den parlamentarischen Entscheidungsträgern und der Wirtschaft zur Verfügung zu stellen. Dazu untersuchten die Autoren die Umsatz-, Einkommens-, Beschäftigungs- und fiskalischen Effekte – die so genannten Nachfrageeffekte –, die sich aus dem laufenden Betrieb von DESY im Jahr 1997 ergaben, sowie die Nachfrageeffekte, die durch den Bau von HERA in den Jahren 1984 bis 1990 verursacht wurden.**

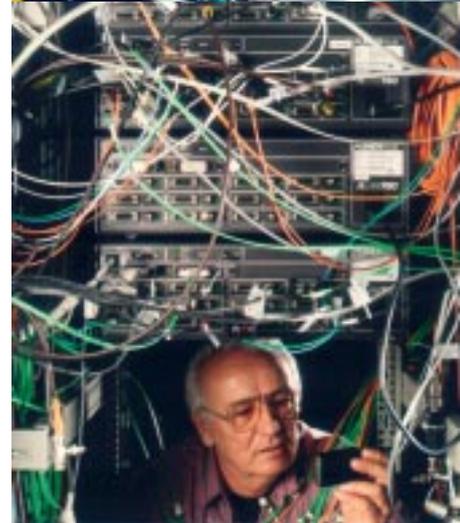
**B**ei der Analyse dieser Nachfrageeffekte werden zunächst die „direkten“ Effekte berücksichtigt, die unmittelbar durch die Ausgaben des DESY-Budgets entstehen, wie Einkommen und Beschäftigung

der DESY-Mitarbeiter und Umsätze der DESY-Lieferanten. Durch die Geschäftsverbindungen – die „Vorleistungsverflechtungen“ – der DESY-Zulieferer mit anderen Lieferanten und deren Beschäftigung von Arbeitskräften entstehen weitere, „indirekte“ Effekte. Diese direkten und indirekten Effekte sind DESY-spezifisch: Ihre Höhe und ihre Struktur werden unmittelbar durch die Höhe und Struktur der Ausgaben des Forschungszentrums sowie seiner direkten und indirekten Lieferanten bestimmt. Darüber hinaus werden die direkt und indirekt verdienten Einkommen anschließend wieder ausgegeben: Dadurch ergeben sich wiederum Umsatz-, Einkommens- und Beschäftigungseffekte, die als „induzierte“ Effekte in die Analyse eingehen. Schlussendlich ist auch der Staat dank gewachsener Steuerbemessungsgrundlagen an diesem Prozess beteiligt.

Wie die Autoren der Studie feststellen, ist DESY mit seiner Speicherringanlage HERA „ein bedeutender Wirtschaftsfaktor nicht nur für die Standortregion Hamburg, sondern auch für die benachbarten Länder Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Bremen sowie für die übrige Bundesrepublik“:

Will man die durch den laufenden DESY-Betrieb im Jahr 1997 entstandenen Gesamtausgaben bestimmen, so muss man die im Wirtschaftsplan des Forschungszentrums vorgesehenen 133,8 Mio. € an Personal- und Sachmitteln durch weitere 9,6 Mio. € ergänzen, die zusätzlich von den externen DESY-Nutzern (Gastwissenschaftlern, Doktoranden und Diplomanden) ausgegeben wurden. Diese Gesamtausgaben von 143,4 Mio. € führen bundesweit über direkte, indirekte und induzierte Effekte zu 198,6 Mio. € an Einkommen – damit werden insgesamt 4244 Arbeitsplätze gesichert, rund 70 Prozent davon (2862) außerhalb von DESY.

Was die Auswirkungen des DESY-Betriebs 1997 auf die verschiedenen Regionen betrifft, so sind von den insgesamt 4244 Arbeitsplätzen 1340 (31,6 %) in Hamburg angesiedelt, 1346 (31,7 %) in Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Bremen, die restlichen 1558 Arbeitsplätze (36,7 %) kommen der übrigen Bundesrepublik zugute. In Pro-Kopf-Größen gerechnet, ist der DESY-Standort Hamburg der größte regionale Nutznießer des laufenden DESY-Betriebs. Jeder Erwerbstätige in Hamburg verdankt dem laufenden DESY-Betrieb im Durchschnitt 93 € pro Jahr. Im übrigen



# faktoren

Nord-West-Deutschland sind es 12 €, in der übrigen Bundesrepublik 2,60 € pro erwerbstätiger Person.

Betrachtet man die wirtschaftlichen Sektoren, so profitieren die Bereiche Dienstleistungen und Handel mit Abstand am meisten vom DESY-Betrieb, da die direkt verdienten und die induzierten Einkommen zum größten Teil in den Konsum fließen. Danach folgen der Energiesektor und – etwa im gleichen Ausmaß – die Sektoren Chemie, Fahrzeug- und Maschinenbau sowie Elektrotechnik. Sie profitieren vor allem von den Sachausgaben des Forschungszentrums und den Vorleistungsverflechtungen der DESY-Lieferanten.

Ähnliche Betrachtungen lassen sich für den Bau und die Ausstattung von HERA in den Jahren 1984 bis 1990 anstellen. Dafür wurden in dem angegebenen Zeitraum insgesamt 279 Mio. € Sach- und 78,2 Mio. € Personalmittel aufgewendet (Preise von 1984). Über die direkten, indirekten und induzierten Nachfrageeffekte führte dies zwischen 1984 und 1990 bundesweit zu insgesamt 416,8 Mio. € Einkommen (Gegenwartswert von 1984) – das entspricht 14 205 Arbeitsplätzen, die für die Dauer der Investitionsphase insgesamt gesichert wurden. Am HERA-Bau konnte

Hamburg insbesondere dadurch profitieren, dass rund 90 Prozent der Bauausgaben direkt in die Hansestadt flossen.

All diese Effekte führen über Einkommen- und Verbrauchssteuern zu zusätzlichen Steuereinnahmen. Für den laufenden DESY-Betrieb 1997 ergibt eine grobe Abschätzung dieses „fiskalischen“ Effekts Steuereinnahmen von bundesweit wenigstens 49 Mio. €, von denen der Bund etwas mehr als die Hälfte einnimmt. Für die Bundesrepublik insgesamt macht dieser Effekt fast 40 Prozent der laufenden Personal- und Sachausgaben von DESY aus, so dass die Nettobelastung durch die Finanzierung von DESY für den Steuerzahler effektiv um etwa 40 Prozent sinkt. „Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der zu 90 Prozent mit Bundesmitteln finanzierte Betrieb von DESY / HERA sich zu etwa 40 Prozent selbst finanziert, seine wirtschaftlichen Wirkungen hauptsächlich (d.h. zu 65-70 Prozent) außerhalb der Standortregion Hamburg und in einem breiten Spektrum von Wirtschaftssektoren entfaltet“, schließen die Autoren.

DEUTSCHES ELEKTRONEN-SYNCHROTRON



DESY 00-116  
August 2000

## The Legacy of HERA - the First Decade

A. Levy

*School of Physics and Astronomy  
Raymond and Beverly Sackler Faculty of Exact Sciences,  
Tel Aviv University, Israel*

ISSN 0418-9833

NOTKESTRASSE 85 - 22607 HAMBURG

**Bilanz im Jahr 2000: HERA steuert  
bedeutende Erkenntnisse zu unserem Weltbild bei.**



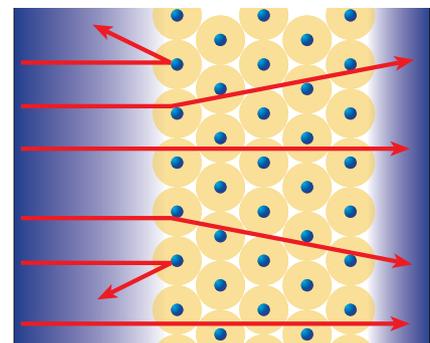
# Eine kurze Geschichte der Streuversuche

Das Prinzip ist einfach. Wahrscheinlich ist einer unserer Vorfahren schon in der Steinzeit auf die Idee gekommen, zwei Dinge gegeneinander zu schlagen und nachzusehen, was die Bruchstücke ihm über deren Innenleben verraten. Inzwischen sind Jahrtausende vergangen. Die Technologien sind komplexer geworden, die Objekte immer kleiner, der Aufwand entsprechend größer. Doch das Prinzip bleibt gleich: Wollen wir herausfinden, was sich im Innersten der Materie abspielt, ob die kleinsten Bausteine unserer Welt womöglich aus noch kleineren zusammengesetzt sind, so lassen wir zwei Teilchen zusammenprallen und sehen uns an, was bei der Kollision passiert. Im Fachjargon klingt der Prozess gehobener: Man spricht von „Streuversuchen“, in denen ein Teilchen, das als Sonde fungiert, an einem anderen Teilchen – der zu untersuchenden Probe – gestreut wird. Die Art und Weise,

wie das Sondenteilchen von der Probe abbrillt – in welche Richtung es gestreut wird, welche Energie es dabei besitzt, ob die Probe beim Zusammenstoß auseinander bricht oder nicht –, verrät uns, wie das Probenteilchen beschaffen war.

Ein solches Streuexperiment war es, das Anfang des 20. Jahrhunderts das Weltbild der Physik revolutionierte. Damals lenkten Hans W. Geiger und Ernest Marsden, die Assistenten von Ernest Rutherford, Alphateilchen auf eine hauchdünne Goldfolie. Zu ihrer großen Überraschung stellten sie fest, dass einige Teilchen mit großer Wucht zurückgeworfen wurden. „Ich hatte den Eindruck, mit einem Gewehr auf ein Stück Seidenpapier zu schießen und dass auf einmal eine der Kugeln nach hinten abprallte“, soll Rutherford das Geschehen kommentiert haben. Erst Wochen später, im Jahr 1911,

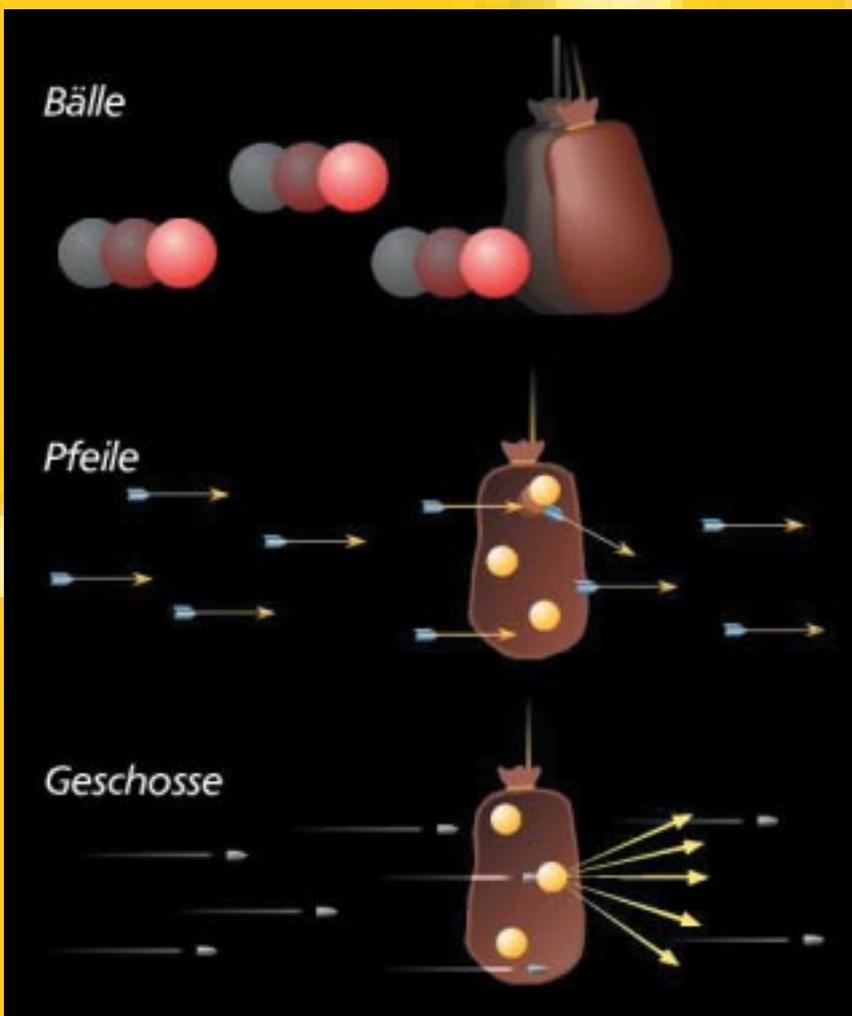
kam Rutherford auf die Erklärung des erstaunlichen Phänomens. Die Häufigkeit, mit der die Alphateilchen um einen bestimmten Winkel gestreut wurden, lieferte ihm den entscheidenden Hinweis: Dass die meisten Teilchen einfach durch die



**Alphateilchen treffen auf eine Goldfolie: Stoßen sie auf einen Atomkern, werden sie zurückgeworfen; die anderen durchqueren die Folie mehr oder weniger ungehindert.**

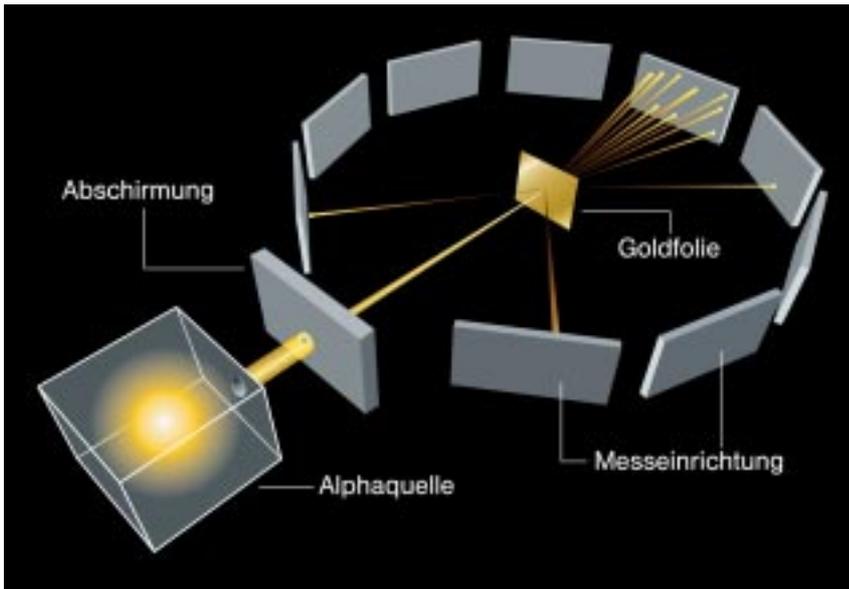
Folie hindurchflogen, ohne abgelenkt zu werden, ließ darauf schließen, dass die Goldatome im Wesentlichen leer sind. Diejenigen Teilchen, die mit Wucht zurückgestreut wurden, also große Abprallwinkel aufwiesen, mussten dagegen auf einen kleinen, schweren Kern gestoßen sein, der fast die gesamte Masse der Goldatome in sich konzentriert. Damit war das damals vorherrschende Bild des Atoms – eine positiv geladene Kugel mit eingebetteten negativen Elektronen – passé: Der Atomkern war entdeckt.

Obwohl die Atome viel zu klein sind, als dass der Mensch in sie hineinsehen könnte, lassen sich diese winzigen Teilchen also mit Streuver suchen „durchleuchten“ – ihr Inneres wird indirekt sichtbar gemacht. So konnte Rutherford nicht nur feststellen, dass sich im Inneren der Goldatome kleinere Objekte befinden, er konnte auch einiges über die Eigenschaften dieser Objekte herausfinden. Anhand von grundlegenden physikalischen Betrachtungen gelang es ihm, eine Formel zu finden, mit der er die Stöße



Je energiereicher die Projektile, desto mehr verraten sie über den Aufbau eines Objekts: Aus der Ablenkung der Bälle kann man auf die Form des Sacks schließen; die Pfeile lassen die Kugeln in seinem Inneren erkennen; die hochenergetischen Geschosse lassen die Kugeln zerplatzen und offenbaren so deren innere Struktur.

Kleine Energie entspricht großer Wellenlänge.



Die Versuchsanordnung von Rutherford

zwischen sehr kleinen, elektrisch geladenen Teilchen beschreiben konnte; dabei hängt die Häufigkeit verschiedener Abprallwinkel von der Ladung der Teilchen ab. Durch Versuche mit Folien aus verschiedenen Metallen konnte nun gezeigt werden, dass die Atomkerne verschiedener Elemente unterschiedliche Ladungen besitzen. Den Schlüssel zu diesem Erfolg lieferten die Beobachtungen von Geiger und Marsden, die geduldig im dunklen Labor hinter dem Messmikroskop saßen und zählten, wie viele Teilchen in welche Richtung gestreut wurden.

Mit der Weiterentwicklung der Teilchenbeschleuniger wurden die „Geschosse“ kleiner und die Zusammenstöße heftiger. Mit steigender Teilchenenergie sondierten die Streuexperimente immer kleinere Abstände, sie offenbarten immer feinere Details. 1954 wurde deutlich, dass die Protonen keinesfalls „Punkte“ sind, sondern einen messbaren Durchmesser besitzen; Ende der 1960er Jahre entdeckte man die Bausteine der Protonen und Neutronen, die Quarks. Die Experimente H1 und ZEUS an der Speicher-

ringanlage HERA schreiben die Erfolgsgeschichte der Streuversuche fort. Auch hier prallen Elektronen auf Protonen, und der Winkel und die Energie der gestreuten Elektronen geben Aufschluss über die Vorgänge im Proton. Da die Protonen bei den HERA-Experimenten nicht ruhen, sondern ebenfalls auf hohe Energien beschleunigt werden, ist die Energie, die den Elektronen während der Kollision zur Verfügung steht, etwa 2600-mal größer als bei dem SLAC-Experiment von 1969 – und 9 000 000-mal höher als die der Alphateilchen von Rutherford. Damit ermöglicht HERA heute den weltweit schärfsten Blick ins Proton – bis hinunter zu Strukturen, die nur den milliardsten Teil eines milliardstel Meters groß sind, d.h. 2000-mal kleiner als das Proton selbst.

Große Energie entspricht kleiner Wellenlänge.

E

## Mit hochenergetischen Teilchen kleine Abstände erkennen

Im Jahr 1924 brachte der junge französische Physiker Louis V. de Broglie in seiner Doktorarbeit eine revolutionäre Idee vor: Genauso wie Lichtwellen sich – den Erkenntnissen von Einstein nach – unter bestimmten Umständen wie Teilchen verhalten, sollten Teilchen in gewissen Situationen als Wellen auftreten.

Bis dato galten Elektronen als harte, undurchdringliche, geladene Kügelchen. Der de Broglie'schen Theorie zufolge sollten sie – genau wie Lichtwellen – nun ebenfalls Beugungs- oder Interferenzeffekte zeigen. Dass dem tatsächlich so ist, konnten Clinton J. Davisson und Lester H. Germer drei Jahre später beweisen, als sie einen Elektronenstrahl an einem Kristallgitter streuten: Für bestimmte Streuwinkel ergaben sich Interferenzmaxima, die sich nur als Interferenzerscheinungen von Wellen – in diesem Fall „Materiewellen“ – deuten ließen.

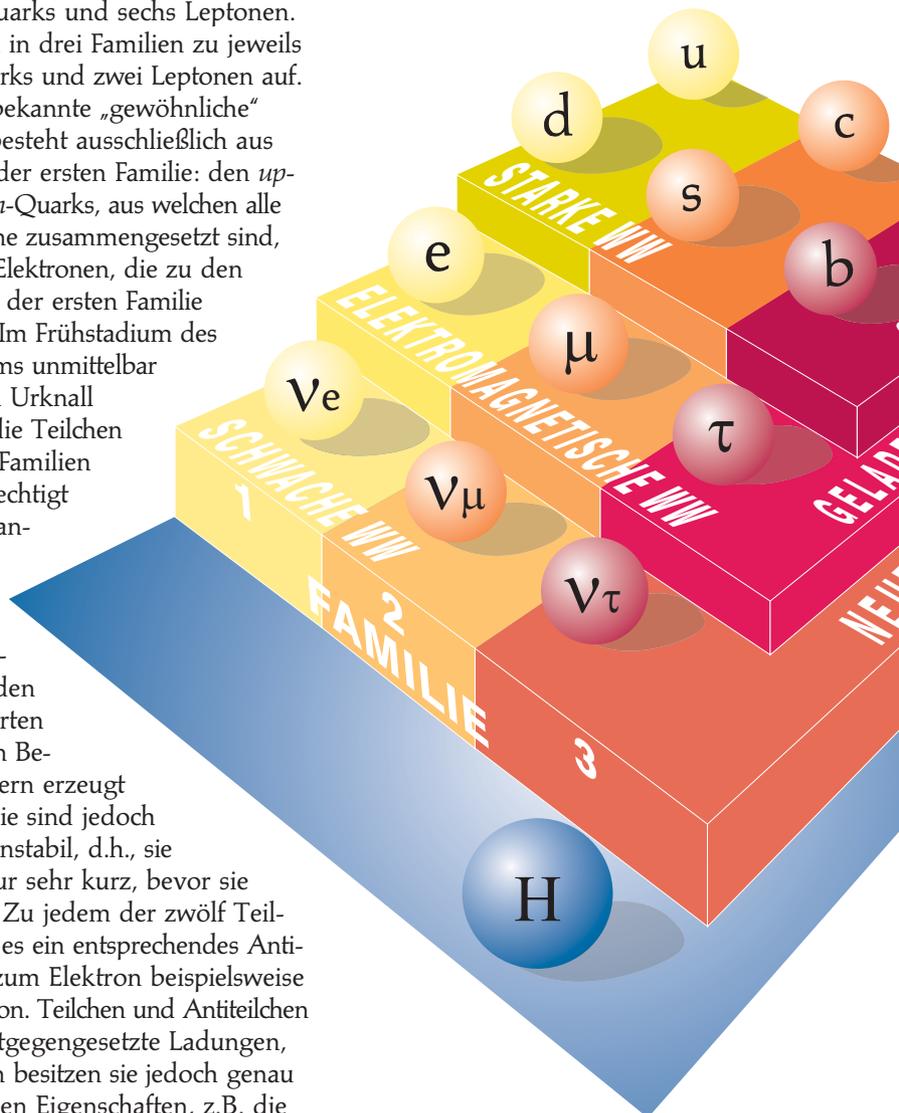
Um die Analogie komplett zu machen, ordnete de Broglie jedem Teilchen eine Wellenlänge zu, die umgekehrt proportional zu seinem Impuls ist. Je größer also der Impuls eines Teilchens – und damit seine Energie –, desto kleiner seine Wellenlänge. Und genauso wie man mit Lichtwellen Strukturen von der Größe der Wellenlänge des Lichts untersuchen kann, so lassen sich mit Teilchenstrahlen Abstände im Bereich der Wellenlänge der Materiewelle sichtbar machen. Betragen die kleinsten unter einem Lichtmikroskop noch sichtbaren Abstände etwa einen Mikrometer ( $10^{-6}$  m), so lassen sich mit Röntgenstrahlen mit Wellenlängen um  $10^{-10}$  m schon einzelne Atome untersuchen. Die Teilchenstrahlen bei HERA haben dagegen eine so kleine Wellenlänge, dass die Physiker mit ihnen  $10^{-18}$  m kleine Strukturen erkennen können.

E

# Das Standard-Modell der Teilchenphysik

Anfang des 20. Jahrhunderts wurde noch jeder Entdecker eines neuen Teilchens mit dem Nobelpreis geehrt. Doch damit war in den 1950er Jahre Schluss: Damals nahmen die ersten modernen Teilchenbeschleuniger ihren Betrieb auf, und plötzlich kündigte sich alle paar Monate ein neues Teilchen an. Bis 1960 war aus dem zuvor so übersichtlichen Feld ein undurchdringlicher Dschungel geworden, bevölkert von an die Hundert Teilchen, die sich nirgends so recht einordnen ließen. Ähnlich hatte die Lage in der Chemie ein Jahrhundert zuvor ausgesehen, bevor Dimitrij I. Mendelejew und Julius L. Meyer den chemischen Elementen mit dem Periodensystem ihre Ordnung gaben. Doch auch in der Teilchenphysik entstand bald Ordnung aus dem Chaos. Über die letzten 50 Jahre hinweg nahm das zugrunde liegende System immer präzisere Konturen an. Heutzutage fasst man die gewonnenen Erkenntnisse im „Standard-Modell der Teilchenphysik“ zusammen. Der unscheinbare Name täuscht: Dahinter verbirgt sich eine elegante mathematische Theorie, die mit großem Erfolg alle gesicherten experimentellen Ergebnisse der Teilchenphysik beschreibt. Die Grundannahmen des Standard-Modells lassen sich in wenigen Zeilen aufschreiben – eine beachtliche Leistung der Teilchenphysik.

Als Bausteine der Materie kennt das Standard-Modell sechs Quarks und sechs Leptonen. Sie treten in drei Familien zu jeweils zwei Quarks und zwei Leptonen auf. Die uns bekannte „gewöhnliche“ Materie besteht ausschließlich aus Teilchen der ersten Familie: den *up*- und *down*-Quarks, aus welchen alle Atomkerne zusammengesetzt sind, und den Elektronen, die zu den Leptonen der ersten Familie gehören. Im Frühstadium des Universums unmittelbar nach dem Urknall „lebten“ die Teilchen aller drei Familien gleichberechtigt nebeneinander. Die heute nicht mehr vorkommenden Teilchenarten können in Beschleunigern erzeugt werden, sie sind jedoch allesamt instabil, d.h., sie „leben“ nur sehr kurz, bevor sie zerfallen. Zu jedem der zwölf Teilchen gibt es ein entsprechendes Antiteilchen, zum Elektron beispielsweise das Positron. Teilchen und Antiteilchen haben entgegengesetzte Ladungen, ansonsten besitzen sie jedoch genau die gleichen Eigenschaften, z.B. die



## Das Universum in der Kaffeetasse



gleiche Masse. Treffen Teilchen und Antiteilchen aufeinander, so können sie sich gegenseitig vernichten: Übrig bleibt nur Strahlungsenergie, aus der wiederum neue Teilchen entstehen können.

Die Materieteilchen unterliegen vier fundamentalen Kräften: der Gravitation, der elektromagnetischen, der schwachen und der starken Wechselwirkung. Die Gravitation lässt den Apfel vom Baum fallen und die Planeten um die Sonne kreisen, sie hält uns auf der Erde fest. 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. Die starke Kraft hält Quarks und Gluonen im Proton sowie Protonen und Neutronen im Kern zusammen und liefert der Sonne die Energie, die sie zum Leuchten braucht.

**Die Bausteine der Materie und die Kräfte, die sie zusammenhalten: Heute kennt man insgesamt 12 Materieteilchen, 6 Quarks und 6 Leptonen. Das Higgs-Teilchen (H) ist für die Masse der elementaren Teilchen verantwortlich. Die Teilchen auf einer „Stufe“ spüren jeweils auch die Kräfte der unteren „Stufen“.**

Das Standard-Modell kennt neben den Materieteilchen eine zweite Art von Teilchen, die als Botenteilchen zwischen den Materieteilchen ausgetauscht werden und Kräfte und Information übertragen. Diese Austauschteilchen sind für jede Kraftart spezifisch: Die als Lichtquanten bekannten Photonen vermitteln die elektromagnetische Kraft; die Gluonen die zwischen Quarks wirkende starke Kraft; das neutrale Z-Teilchen, das negativ und das positiv geladene W-Teilchen die schwache Kraft. Für die Schwerkraft werden die so genannten Gravitonen postuliert – allerdings ist die Gravitation im Standard-Modell bisher nicht enthalten.

Die dritte Art von Teilchen des Standard-Modells sind die so genannten Higgs-Bosonen, die für die Erzeugung der Teilchenmassen sorgen. Im Standard-Modell sollten Materie- und Austauschteilchen zunächst masselos sein – im offensichtlichen Widerspruch zu dem, was man in der Natur beobachtet. Eine Lösung dieses Problems bietet der nach dem schottischen Theoretiker Peter W. Higgs benannte „Higgs-Mechanismus“. Diesem zufolge ist das gesamte Universum – also auch das Vakuum – mit einem Hintergrundfeld angefüllt, dem Higgs-Feld, unter dessen Einfluss jedes Teilchen seine Masse erhält. Der Theorie nach gehören zu diesem Feld ein oder mehrere Higgs-Teilchen, die trotz intensiver Suche bislang allerdings noch nicht beobachtet werden konnten. Erst die Entdeckung dieser Higgs-Bosonen wird endgültig Klarheit darüber schaffen, wie die Teilchen zu ihrer Masse kommen.

Morgens beim Frühstück: Sie streuen Zucker in den Kaffee, rühren um und beobachten, wie die Zuckerkrystalle langsam verschwinden. Sosehr Sie es auch versuchen, mit dem bloßen Auge werden Sie den Zucker in der Tasse nicht mehr finden. Viel zu klein sind die Moleküle, in die sich die Zuckerkrystalle aufgelöst haben, zehn Millionen Mal kleiner als die ursprünglichen Krystalle. Um sie zu sehen, müssten Sie schon mit einem extrem guten Mikroskop in Ihre Kaffeetasse hineinschauen.

Was passiert mit dem Zucker in Ihrer Tasse? Jedes einzelne Zuckermolekül besteht aus etwa zehnmal kleineren Einzelbausteinen, den Atomen. Betrachtet man die Atome genauer, entdeckt man die für alle Atomsorten gleichen Bausteine: Die Elektronen bilden die Atomhülle, der Atomkern setzt sich aus Neutronen und Protonen zusammen.

Verglichen mit dem Atom ist der Kern unglaublich klein: Wäre das Atom so groß wie ein Fußballplatz, entspräche der Kern höchstens einer Erbse. Doch selbst die im Kern enthaltenen Protonen und Neutronen sind noch nicht die kleinsten Teilchen. Sie sind aus mindestens tausendmal kleineren Bausteinen aufgebaut: den Quarks.

Eindrucksvoll reiht sich Null an Null, wenn man die „Größe“ der Quarks aufschreibt: Quark (kleiner als ein Attometer) = weniger als 0,000 000 000 000 000 001 m  
Zum Vergleich: Stecknadelkopf (etwa 1 Millimeter) = 0,001 m

Die Quarks aus dem Inneren des Atomkerns und die Elektronen der Atomhülle sind nach dem heutigen Stand des Wissens punktförmig ohne räumliche Ausdehnung – und damit vielleicht die kleinsten Bausteine unseres Universums.

# Ein Weltbild mit Lücken

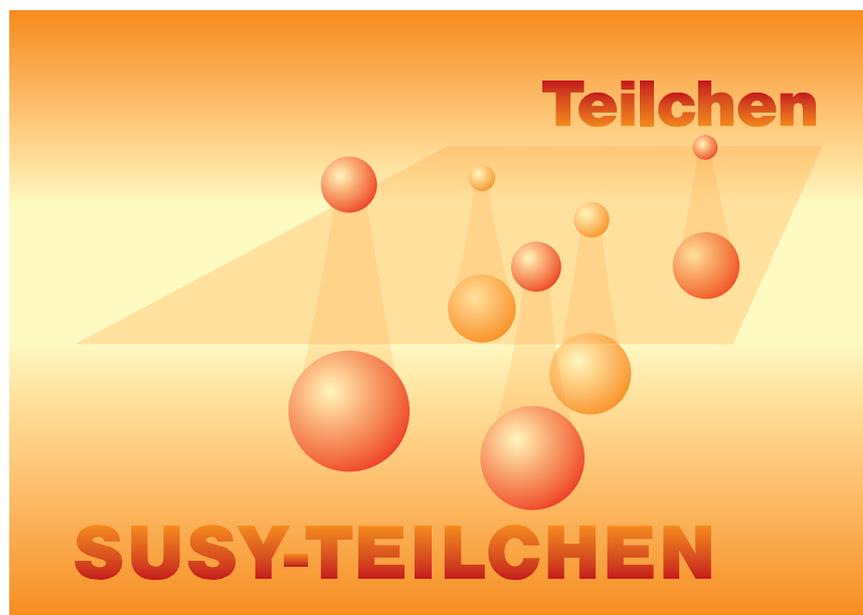
**Das Standard-Modell ist eine der erfolgreichsten naturwissenschaftlichen Theorien überhaupt. Dennoch lässt es viele Fragen offen – Fragen, die eine allumfassende „Weltformel“ eigentlich beantworten sollte. Allgemein geht man heute davon aus, dass das Universum im Urknall aus einem allumfassenden Zentrum entstand. Daher sollten auch die heute vorhandenen Kräfte einer gemeinsamen „Urkraft“ entstammen und sich einheitlich beschreiben lassen. Zwar führt das Standard-Modell die elektromagnetische und die schwache Kraft auf eine einzige „elektroschwache“ Kraft zurück, die starke Kraft lässt sich im Rahmen des Standard-Modells jedoch nicht mit den anderen Kräften verbinden. Auch die Schwerkraft widersetzt sich hartnäckig allen Vereinheitlichungsversuchen.**

Das Standard-Modell enthält zudem zahlreiche scheinbar willkürlich vorgegebene „Naturkonstanten“. Diese können zwar experimentell bestimmt werden, die Frage aber, warum diese Zahlen gerade so groß sein müssen, wie sie im Experiment zu finden sind, bleibt unbeantwortet. Offen bleibt zum Beispiel auch, warum die Materieteilchen gerade in drei Familien auftreten oder warum die elektrische Ladung des Elektrons – eines punktförmigen Elementarteilchens –, soweit die Messungen reichen, genau derjenigen des Protons entspricht, das ein aus Quarks zusammengesetztes, komplexes Gebilde ist.

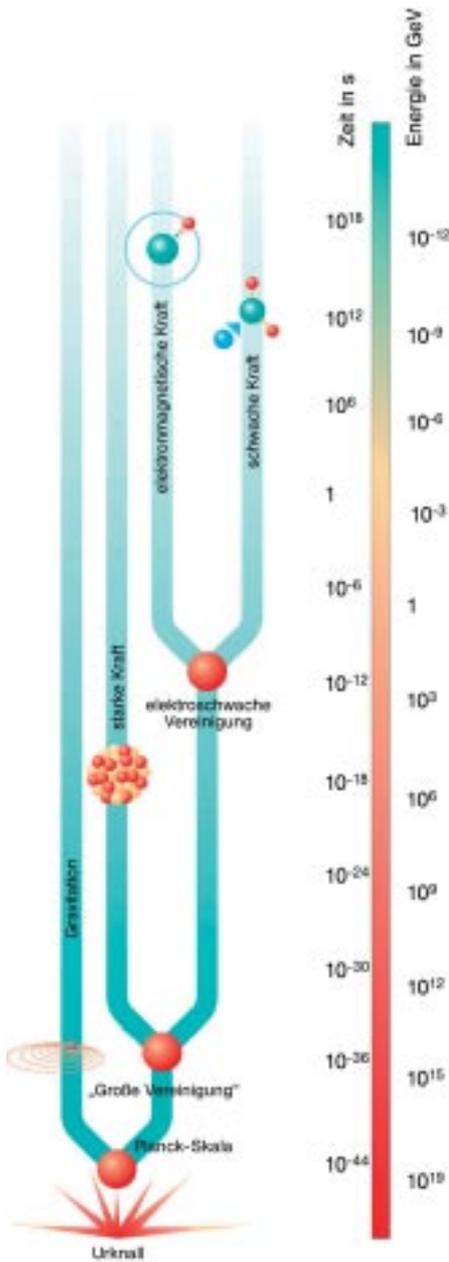
Auch auf die Frage, wie die „Ur-suppe“ aus Quarks und Gluonen kurz nach dem Urknall ausgesehen hat oder warum die Quarks niemals als freie Teilchen in Erscheinung treten, sondern in den Protonen und Neutronen „eingesperrt“ zu sein scheinen, gibt das Standard-Modell keine befriedigende Antwort. Hier gehen die Physiker allerdings davon aus, dass die Antworten in den Formeln des Standard-Modells bereits enthalten sind – und es bisher nur an den richtigen „Rechentricks“ mangelt, diese Probleme zu lösen.

Das Standard-Modell stellt offensichtlich eine gute Näherung für nicht zu hohe Energien und Teilchendichten dar, letztendlich muss es jedoch durch

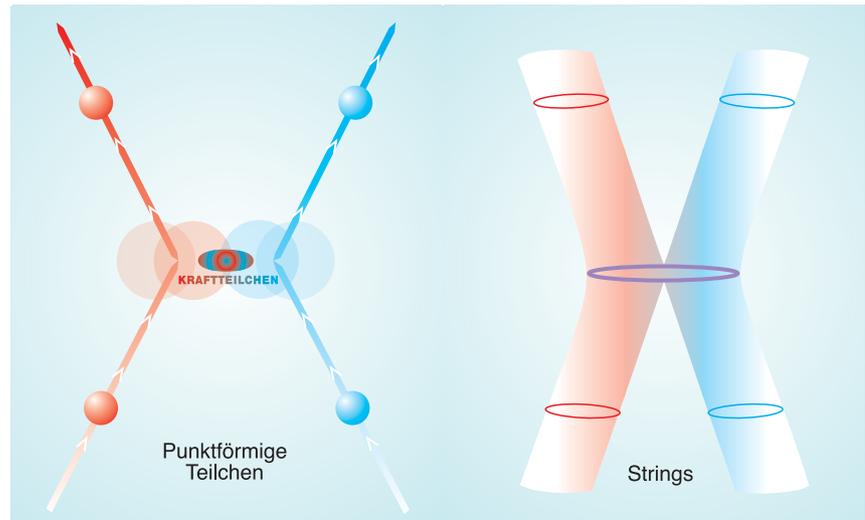
eine bessere, umfassendere Beschreibung ersetzt werden. Dies ist bisher trotz größter experimenteller Anstrengungen allerdings noch nicht gelungen. Mit ihrem einzigartigen Forschungsprogramm können auch die HERA-Experimente entscheidende Hinweise auf eine solche Theorie jenseits des Standard-Modells geben. In so genannten Großen Vereinheitlichten Theorien, die eine einheitliche Beschreibung aller drei Grundkräfte des Standard-Modells anstreben, könnten z.B. Zwitterteilchen aus Quarks und Leptonen, so genannte Leptoquarks, auftreten. Da HERA als einzige Anlage weltweit hochenergetische Zusammenstöße zwischen zwei unterschiedlichen Teilchensorten



**„Schattenpartner“: Die Theorie der Supersymmetrie ordnet jedem Teilchen ein supersymmetrisches Partnerteilchen zu.**



**Eine Zeitreise an den Anfang des Universums: Die Skala zeigt das Alter des Universums vom Urknall bis heute sowie die entsprechende mittlere Energie von Strahlung und Materieteilchen.**



**Teilchen und Strings: Zwei Teilchen kommunizieren über den Austausch eines Kraftteilchens (links). Die gleiche Wechselwirkung im „String“-Bild (rechts): Zwei „Saiten“ schließen sich zu einer einzigen zusammen und trennen sich anschließend wieder.**

liefert – den Elektronen aus der Gattung der Leptonen und den aus Quarks zusammengesetzten Protonen –, ist der Beschleuniger besonders gut dazu geeignet, die Beziehungen zwischen Quarks und Leptonen auszuloten. Insbesondere könnten bestimmte Leptoquarks an HERA leicht erzeugt und untersucht werden.

Eine Idee, wie man die fundamentalen Naturgesetze aus einem grundlegenden Prinzip ableiten könnte, liefert die Theorie der Supersymmetrie, kurz SUSY. Sie verknüpft die im Standard-Modell strikt unterschiedenen Materieteilchen und die Kraftteilchen und führt zu einem tieferen Zusammenhang zwischen drei der vier Naturkräfte. Dies geschieht auf eine so elegante Weise, dass die Physiker geneigt sind, die Supersymmetrie als einen entscheidenden Schlüssel zum Innersten der Materie anzusehen. Falls die Supersymmetrie gilt, muss es eine ganze Reihe zusätzlicher Teilchenarten geben, die alle im frühen Universum vorhanden gewesen sein sollten. Einige von ihnen könnten heute noch existieren, ohne dass sie entdeckt wurden, denn sie haben völlig andere Eigenschaften als die uns vertraute Materie. Solange keines dieser „Schattenteilchen“ gefunden ist, bleibt SUSY allerdings

unbewiesen. Auch zur Suche nach der Supersymmetrie trägt HERA entscheidend bei.

Noch exotischer mutet die Perspektive an, mit HERA die Anzahl und Größe von möglichen zusätzlichen Raumdimensionen zu erkunden. Dieser Gedanke scheint direkt einem Sciencefiction-Roman zu entspringen – und doch handelt es sich hier um eine der aktuellsten Entwicklungen auf dem Gebiet der theoretischen Teilchenphysik und Kosmologie. So genannte String-Theorien z.B. vereinigen die Gravitation mit den anderen drei Naturkräften, indem sie die Teilchen nicht als punktförmige Objekte beschreiben, sondern als winzig kleine Saiten. Diese schwingen nicht etwa in den uns bekannten drei Raumdimensionen, sie „leben“ vielmehr in bis zu zehn räumlichen Dimensionen. Diese Extra-Dimensionen können wir nicht sehen, da sie auf extrem kleinen Abständen „aufgerollt“ sein müssten. Ihre Auswirkungen könnten in den Teilchenkollisionen von HERA jedoch zu spüren sein. Mit einem solchen Beitrag könnten die HERA-Experimente nicht nur die Grenzen des Standard-Modells aufzeigen, sondern auch entscheidende Hinweise auf eine neue, umfassende Theorie jenseits des Standard-Modells geben.

# Wie groß sind die Quarks?

**Im Prinzip ist HERA ein Mikroskop. Ein ziemlich großes zwar, doch die grundlegende Idee hinter den Teilchenkollisionen bei HERA ist tatsächlich die logische Fortsetzung dessen, was von den klassischen Lichtmikroskopen her geläufig ist. Denn bei der Untersuchung von Objekten gilt folgende Grundregel: Je kleiner die Strukturen, die sichtbar gemacht werden sollen, desto kürzer muss die Wellenlänge des benutzten Lichts sein. Mit Licht im Röntgenbereich, das eine Wellenlänge von wenigen millionstel Millimetern, also der Größe von Atomen, aufweist, lässt sich die Struktur von Molekülen auflösen. Noch kleinere Strukturen sind damit nicht mehr zu sehen – dazu müsste man zu noch kürzeren Wellenlängen greifen.**

Möchte man Objekte untersuchen, die noch wesentlich kleiner sind als die Atome – ein Proton zum Beispiel ist etwa  $10^{-15}$  Meter groß –, so lässt sich dies mit „normalem“ Licht nicht mehr bewerkstelligen. Hier kommen die großen Teilchenbeschleuniger ins Spiel: Trifft im HERA-Speicherring ein Elektron frontal auf ein Proton beziehungsweise auf eines von dessen Bausteinen, so „kommunizieren“ die beiden Teilchen miteinander, indem sie zum Beispiel ein Photon, also ein Lichtteilchen, austauschen. Je wuchtiger der Zusammenstoß, desto mehr Impuls überträgt das ausgetauschte Lichtteilchen zwischen den Stoßpartnern. Desto kleiner ist auch die Wellenlänge des ausgetauschten Lichts – womit sich der Kreis zum Mikroskopie-Prinzip schließt: Je hef-

tiger die Teilchen in HERA zusammenstoßen, desto kleiner sind die Abstände, die man damit untersuchen kann; desto winziger also auch die Strukturen, die dabei sichtbar gemacht werden können.

Genau dieses Prinzip hat es den Physikern erlaubt, in den letzten 50 Jahren immer tiefer ins Innere der Materie vorzudringen. 1954 lenkte Robert Hofstadter an der Universität Stanford Elektronen aus einem Beschleuniger auf Protonen in einem Wasserstoff-Target. Er untersuchte, wie häufig die Elektronen in welche Richtung zurückgeworfen wurden. Dabei stellte er fest, dass sich das beobachtete Streubild von demjenigen unterschied, das sich bei dem Zusammenstoß von zwei punktförmigen Teilchen ohne messbaren Durchmesser ergeben sollte. Diese Abweichung von der theoretischen Kurve ließ sich nur dadurch erklären, dass das Proton „verschmiert“ ist – also eine messbare Größe besitzt. Damit hatte das Proton seinen Status als „elementares“ Teilchen verloren, denn diese werden im Standard-Modell als reine „Punkte“ ohne Ausdehnung angesehen. Fünfzehn Jahre später war die Energie der Elektronen am SLAC so groß, dass sie den Physikern den Blick ins Proton hinein ermöglichten. Plötzlich entsprach das aufgenommene Streubild wieder dem von punktförmigen Teilchen – im Proton musste es also winzige

Bausteine geben, an denen das Elektron abprallte: Die Physiker hatten die Quarks entdeckt, die punktförmigen Bausteine der Protonen und Neutronen.

HERA erlaubt es nun, die Quarks genau unter die Lupe zu nehmen: Der Bereich, den HERA dabei zugänglich macht, ist 100-mal größer als bei früheren Experimenten, die Auflösung der Teilchenzusammenstöße zehnmal so groß (siehe Kasten). So kann HERA die Geschehnisse im Mikrokosmos bei Abständen bis hinunter zu  $5 \times 10^{-19}$  Metern untersuchen – und damit Strukturen sichtbar machen, die noch 2000-mal kleiner sind als das Proton selbst. Auch hier vergleichen die Physiker das gemessene Streubild der Kollisionen mit demjenigen, das die Theorie für punktförmige Teilchen vorhersagt, beziehungsweise mit dem für Quarks mit einer messbaren Ausdehnung. Was die Elektronen betrifft, so weiß man aufgrund der Ergebnisse von anderen Experimenten, dass sie noch viel kleiner sind als die kleinsten mit HERA erreichbaren Dimensionen.

## Vom Kollisionsbild zum Ergebnis

Der Detektor spuckt reihenweise Bilder von Teilchenzusammenstößen aus. Auf den Bildschirmen der Experimente sehen sie aus wie Schnappschüsse von einem Feuerwerk. Doch was lesen die Teilchenphysiker daraus ab? Wie kommen sie von den bunten Linien zu einem greifbaren, bezifferbaren Ergebnis?

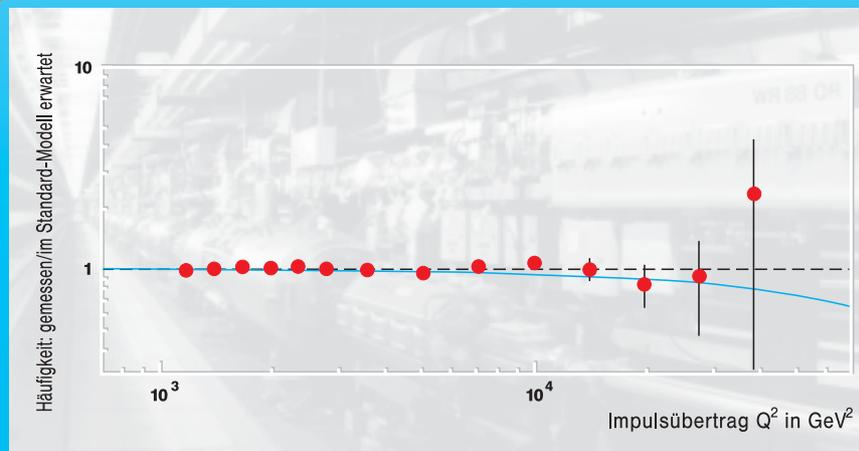
Was bei den Elektron-Proton-Zusammenstößen an HERA gemessen wird, ist – genau wie bei Rutherfords erstem Streuexperiment – die Häufigkeit, mit der das vom Proton aus der Bahn geworfene Elektron um einen bestimmten Winkel abgelenkt wird; außerdem die Energie, die es nach dem Zusammenstoß hat. Auch die „Bruchstücke“ des Protons werden analysiert: In welche Richtung fliegen sie davon, und welche Energie tragen sie mit sich fort? Aus diesen Messgrößen lassen sich so genannte kinematische Variablen berechnen, die für die Stoßprozesse charakteristisch sind. Betrachtet man die Streuung eines Elektrons an einem Quark im Proton, so gibt es davon genau zwei: „ $x$ “ und „ $Q^2$ “.

Anschaulich bezeichnet  $x$  den Bruchteil des Protonenimpulses, den das Quark trägt, mit dem das Elektron zusammenstößt.  $Q^2$  ist ein Maß für die Heftigkeit des Zusammenstoßes, es bezeichnet das Quadrat des Impulses, der bei der Kollision zwischen den Stoßpartnern übertragen wird, also das Quadrat des Impulses, den das Austauscheteilchen trägt. Damit ist  $Q^2$  auch ein Maß für die Auflösung des HERA-Mikroskops: Je größer  $Q^2$ , desto kleinere Strukturen werden sichtbar.

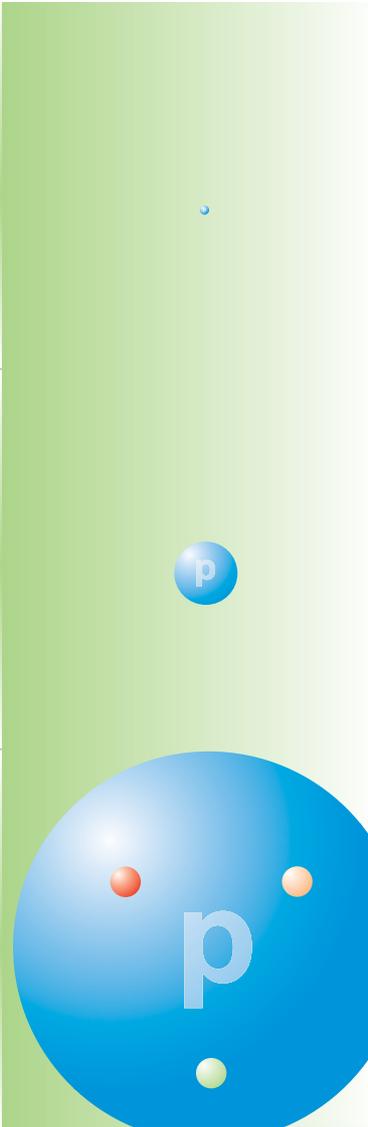
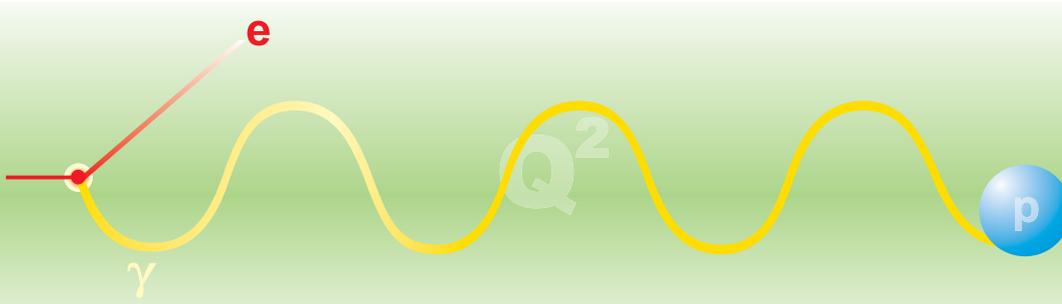
Beobachtet man eine ausreichende Anzahl von Teilchenzusammenstößen, so kann man in einem Diagramm auftragen, wie häufig diese Ereignisse in einem bestimmten Intervall von  $x$  bzw.  $Q^2$  aufgetreten sind. Dieses Diagramm – die „Strukturfunktion“ – verrät, wie sich das Proton aus Quarks zusammensetzt. Eigentlich sollte das Standard-Modell das Ergebnis der Messungen vorhersagen. Dies ist bisher jedoch nicht der Fall, da die mathematischen Gleichungen, welche die starke Kraft beschreiben, nicht gelöst werden können. Was bisher gelang, ist die Vorhersage, wie die Strukturfunktion vom Impulsübertrag  $Q^2$  abhängt: Hat man sie bei einem bestimmten Wert von  $Q^2$  gemessen, so kann man sie für entsprechend größere Werte von  $Q^2$  voraussagen.

Stimmen die theoretischen und die experimentellen Werte überein, wird dies als Erfolg für das Standard-Modell gefeiert: Die Voraussetzungen der Theorie sind dann wahrscheinlich richtig. Wenn die experimentelle Kurve dagegen von der theoretischen abweicht, wird es spannend. Dann muss genau überprüft werden, ob alle möglichen experimentellen Fehler ausgeschlossen werden können und ob es sich bei der Abweichung womöglich um einen statistischen „Ausreißer“ handelt. Erst dann weiß man – und das entscheidet sich oft erst nach Jahren, wenn die Menge an experimentellen Daten groß genug ist, um eine ausreichende Genauigkeit zu gewährleisten –, ob die Abweichung auf etwas grundlegend Neues hindeutet und die Theorie entsprechend revidiert werden muss.

Aus den Analysen der HERA-Messungen ergibt sich, dass die Quarks unvorstellbar winzig sind: Zumindest ist ihr Durchmesser nicht größer als ein Tausendstel des Protonendurchmessers, also etwa  $10^{-18}$  Meter. Bis hinunter zu diesem Wert lässt sich für die Quarks keine messbare Größe feststellen. Damit gibt es auch keinerlei Anzeichen dafür, dass die Quarks aus weiteren, noch kleineren Bausteinen zusammengesetzt sein könnten. So weit der Blick von HERA reicht, sind die Quarks tatsächlich Materiepunkte – genau wie es das Standard-Modell voraussetzt. Sind wir damit vielleicht am Ende der Kette aus immer weiter teilbaren Materieteilchen angelangt, die vom Kristall über das Molekül, das Atom, den Atomkern und das Proton und Neutron bis hin zum Quark und Elektron reicht?



**Aus dem Vergleich zwischen Experiment (rote Punkte) und Theorie (blaue Kurve für einen Quarkradius von  $8 \times 10^{-19}$  m) lassen sich Grenzen für die Ausdehnung der Quarks bestimmen.**



## Energierreiche Teilchen sehen mehr

Je höher die Energie, mit der die Elektronen und Protonen im HERA-Ring aufeinander prallen, desto größer wird die Auflösung des HERA-Mikroskops.

Links in der Grafik: Elektron (e) und Proton (p) tauschen ein Lichtteilchen (Photon  $\gamma$ ) aus; rechts: Je nachdem, wie heftig der Zusammenstoß war, „sieht“ das Photon das Proton unterschiedlich.

### Oben:

Überträgt das ausgetauschte Lichtteilchen (Photon) zwischen den Stoßpartnern nur wenig Impuls ( $Q^2$  klein), dann besitzt es eine große Wellenlänge. Ist diese größer als die Ausdehnung des Protons, so „sieht“ das Photon das Proton nur als einen Punkt: Das von den Physikern gemessene Streubild entspricht dem Zusammenstoß von zwei punktförmigen Teilchen.

### Mitte:

Der Zusammenstoß zwischen Elektron und Proton wird heftiger, die Auflösung  $Q^2$  größer. Dementsprechend wird die Wellenlänge des Photons kleiner, bis sie dem Durchmesser des Protons entspricht. Für das Photon nimmt das Proton nun Konturen an, es „sieht“ das Proton als ein ausgedehntes Objekt. Eventuelle Strukturen innerhalb des Protons lassen sich mit diesem Photon allerdings noch nicht ausmachen.

### Unten:

Bei Zusammenstößen mit höchster Energie ist die Wellenlänge des Photons so klein, dass das Proton als Ganzes irrelevant wird. Das Photon dringt in das Proton ein und macht dort die winzigen Unterstrukturen sichtbar – die Quarks. Das gemessene Streubild entspricht – so weit HERA blicken kann – wieder dem Zusammenstoß von punktförmigen Teilchen.



# Mit HERA auf dem Weg zur Vereinheitlichung der Naturkräfte

Als „Super-Elektronenmikroskop“ ist HERA ein Multitalent. Denn mit der Speicherringanlage lassen sich nicht nur winzige Teilchen sichtbar machen – auch die „Kommunikation“ zwischen den Teilchen bleibt den Physikern nicht verborgen. Vier Kräfte regieren heute die Welt: die Gravitation, die elektromagnetische, die schwache und die starke Kraft. Die Gravitation, die unser Leben am unmittelbarsten beeinflusst, spielt im Reich der kleinsten Teilchen nur eine untergeordnete Rolle, da sie weitaus schwächer als die anderen drei Grundkräfte ist. Die elektromagnetische, die schwache

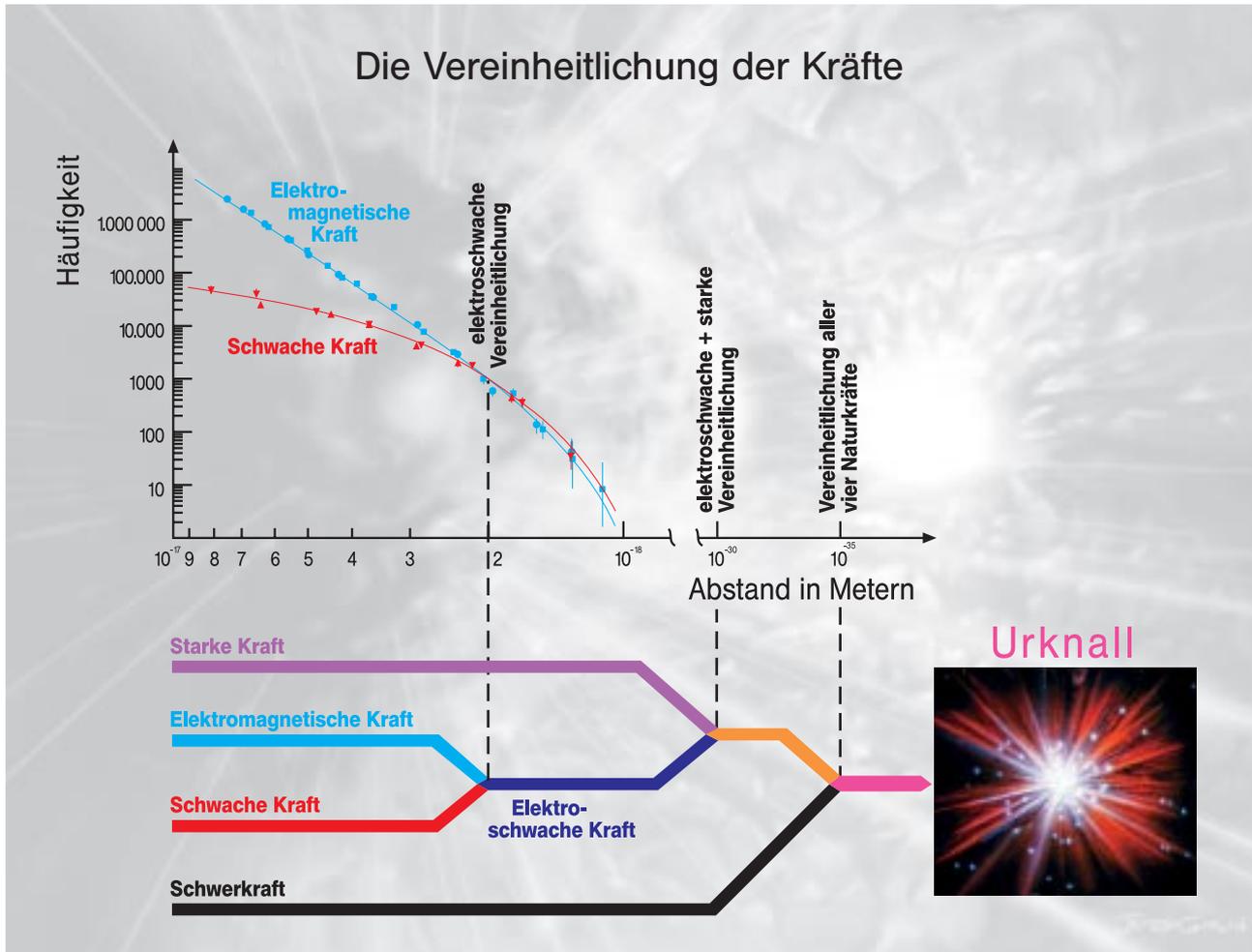
und die starke Kraft können mit HERA jedoch eingehend untersucht werden. Das Proton stellt hier gewissermaßen ein „Mikrolabor“ dar, in dem die Forscher das Wesen der drei Naturkräfte gezielt erkunden können.

**K**aum jemand zweifelt heute daran, dass das Universum vor rund 15 Milliarden Jahren im Urknall aus einem alles umfassenden Zentrum entstand. Zusammen mit Ergebnissen von Teilchenphysikexperimenten legt dies die Vermutung nahe, dass auch die heute vorhandenen Kräfte einer gemeinsamen „Urkraft“

entstammen; sie wären dann letztlich nur verschiedene Erscheinungsformen dieser einen Kraft. Damit sollten sich die Naturkräfte auch einheitlich in einem gemeinsamen theoretischen Rahmen beschreiben lassen. Tatsächlich ist es inzwischen gelungen, die elektromagnetische und die schwache Kraft zur „elektroschwachen Kraft“ zusammenzufassen. Genau diese Vereinigung der beiden Kräfte lässt sich bei HERA „live“ im Experiment mitverfolgen.

Wenn in den HERA-Experimenten H1 und ZEUS ein Elektron auf ein Proton prallt, dann können die Teil-

## Die Vereinheitlichung der Kräfte



Die elektroschwache Vereinigung – ein wichtiges Ergebnis der HERA-Experimente. Die Grafik zeigt die Häufigkeit von Teilchenreaktionen der elektromagnetischen und der schwachen Kraft als Funktion des Minimalabstands beim Stoß. Nach rechts hin werden die Abstände kleiner. Bei Abständen, die größer als die Reichweite der schwachen Kraft ( $2 \times 10^{-18}$  m) sind, tritt die elektromagnetische Reaktion wesentlich häufiger auf als die schwache. Bei kleineren Abständen sind beide Reaktionen etwa gleich häufig – aus der Messung lässt sich also direkt die elektroschwache Vereinheitlichung ablesen, wie sie auch theoretisch vorhergesagt wurde (durchgezogene Linien). Im unteren Teil der Abbildung ist die Vereinheitlichung der vier Naturkräfte symbolisch dargestellt.

chen auf unterschiedliche Weise miteinander in Wechselwirkung treten: entweder über die elektromagnetische oder über die schwache Kraft. Im ersten Fall tauschen die Stoßpartner ein Photon, ein Lichtteilchen, aus. Kommunizieren die Teilchen über die schwache Kraft miteinander, so ist das ausgetauschte Kraftteilchen entweder ein elektrisch neutrales Z-Teilchen oder ein elektrisch geladenes W-Teilchen. Beim Austausch eines W-Teilchens passiert etwas Bemerkenswertes: Das Elektron verwandelt sich in ein Neutrino, das den Detektor unbeobachtet verlässt.

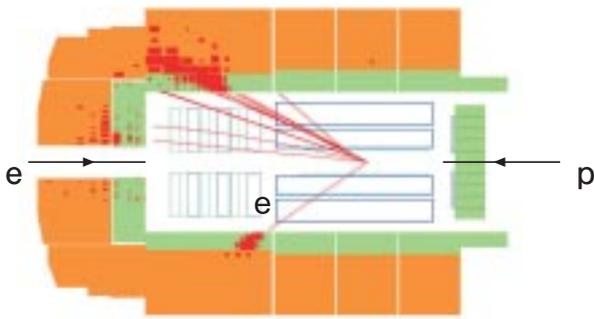
Bei HERA treten also zwei verschiedene Sorten von Teilchenreaktionen auf:

- Ein Elektron trifft auf ein Proton, daraus entstehen ein Elektron und weitere Teilchen. Diese Reaktion wird sowohl durch das Photon als auch durch das Austauschteilchen Z vermittelt – hier treten also die elektromagnetische und die schwache Kraft auf. Da sowohl das Photon als auch das Z-Teilchen elektrisch neutral sind, spricht man in diesem Fall von einer „Neutraler-Strom-Reaktion“.

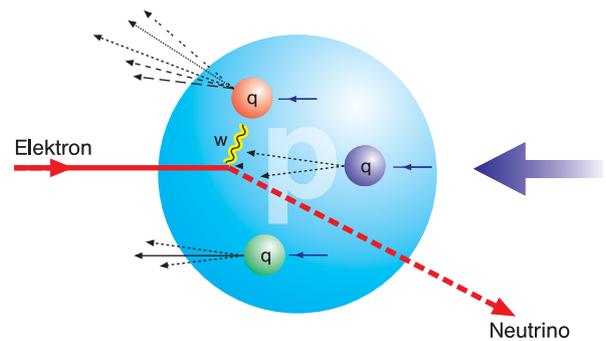
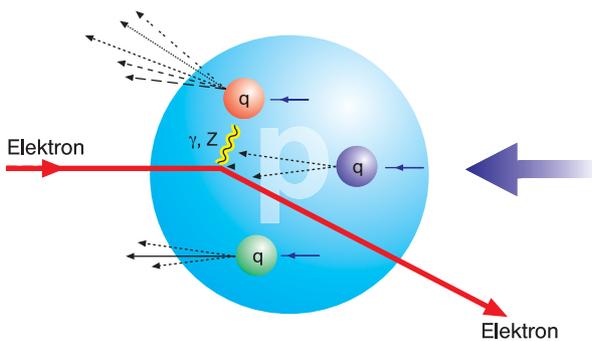
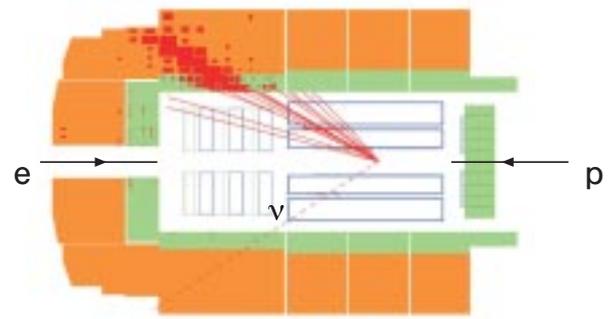
- Ein Elektron trifft auf ein Proton, daraus entstehen ein Neutrino und weitere Teilchen. Das Neutrino ist elektrisch neutral, spürt ausschließlich die schwache Kraft und wird nur über das Austauschteilchen W erzeugt. Die Häufigkeit, mit der diese Reaktion auftritt, ist somit ein Maß für die Stärke der schwachen Kraft. Da das W-Teilchen elektrisch geladen ist, spricht man in diesem Fall von einer „Geladener-Strom-Reaktion“.

Verglichen wird nun die Häufigkeit, mit der beide Reaktionen als Funktion

## Neutraler-Strom-Reaktion



## Geladener-Strom-Reaktion



**Zwei Arten von Kollisionen: Trifft ein Elektron auf ein Proton, so kann es mit einem Quark (q) in dessen Innerem reagieren – entweder über ein neutrales Austauschteilchen (Photon  $\gamma$  bzw. Z-Teilchen) oder über ein geladenes W-Teilchen. Im ersten Fall wird das Elektron abgelenkt und im Detektor sichtbar (Neutraler-Strom-Reaktion, links). Im zweiten Fall verwandelt es sich in ein Neutrino ( $\nu$ ), das die Apparatur spurlos durchquert (Geladener-Strom-Reaktion, rechts). Das getroffene Quark wird aus dem Proton herausgeschlagen und erzeugt ein Bündel von Teilchen.**

des Minimalabstands der Teilchen beim Zusammenstoß in den HERA-Detektoren auftreten. Hierbei entsprechen die kleinsten erreichbaren Abstände den höchsten Impulsüberträgen (siehe Seite 53), die HERA liefert. Bei größeren Abständen tritt die elektromagnetische Reaktion wesentlich häufiger auf als die schwache, 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. Aus der Messung lässt sich also direkt ablesen, wie sich die beiden Naturkräfte zur elektroschwachen Kraft vereinigen.

Warum die elektromagnetische und die schwache Kraft bei großen Abständen so unterschiedlich stark wirken, wird klar, wenn man die Masse der entsprechenden Botenteilchen betrachtet: Das Photon ist masselos und kann deshalb seine „Botschaft“ – die elektromagnetische Kraft – viel weiter übermitteln als die schweren Botenteilchen der schwachen Kraft, die W- und Z-Bosonen. Bei Energien, die

der Masse der W- und Z-Teilchen entsprechen, verschwindet dieser Unterschied – die Kräfte werden gleich stark.

Mit dieser Demonstration der elektroschwachen Vereinigung erlaubt HERA faktisch einen Schritt zurück in der Zeit in Richtung Urknall, als die Kräfte und Materieteilchen im frühen Universum bei ähnlich hohen Energien agierten, wie sie heute im Teilchenbeschleuniger erzeugt werden.

# Das Proton unter dem HERA-Mikroskop



Das Innenleben des Protons mit höchster Präzision zu messen – das war eine wesentliche Motivation für den Bau von HERA. Denn wenn in den Detektoren H1 und ZEUS die Elektronen und Protonen aufeinander prallen, dann wirkt das Elektron wie eine winzige Sonde, die über den Austausch eines Botenteilchens das Innere des Protons regelrecht „ab-tastet“. Je nachdem, was dem Elektron im Inneren des Protons widerfährt – auf welche Bausteine es trifft, welchen Anteil am Protonenimpuls diese Bausteine tragen –, unterscheiden sich die vom Detektor aufgenommenen Reaktionen. Doch wie gelangt man von diesen Reaktionsbildern zu einer konkreten Aussage über das Innenleben des Protons? Wie können die Physiker aus den bunten Bildern herauslesen, was im Proton tatsächlich vorgeht?

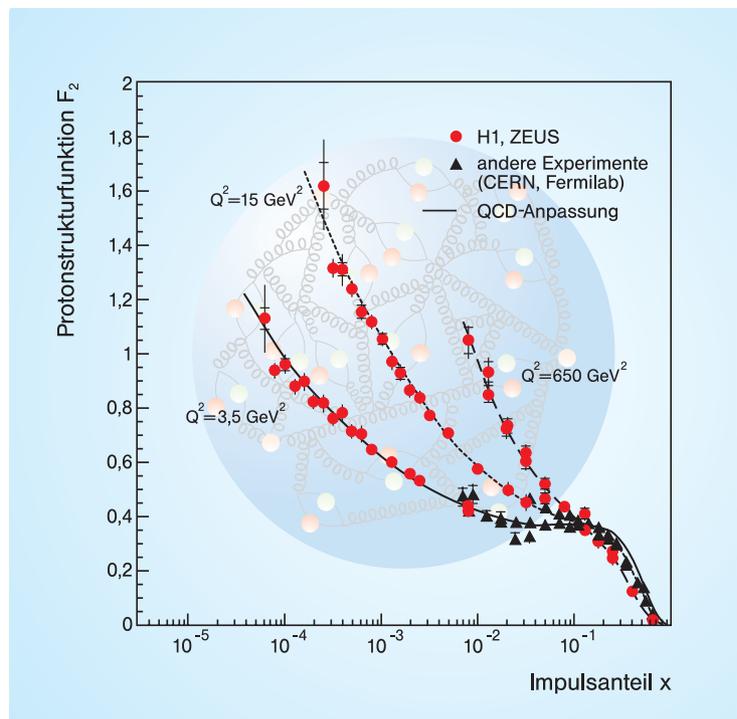
oder mehrere Bündel von Teilchen. Die mathematische Beschreibung des Elektrons und der Austauscheteilchen sind aus der Theorie bekannt, dieser Teil der Reaktion lässt sich präzise vorher-sagen. Schwieriger wird es mit dem Proton, dessen komplexe Zusammen-setzung aus Quarks und Gluonen weit gehend unbekannt war. Diese – unbekannte – Struktur wird durch die Strukturfunktion beschrieben. Über diese Funktion weiß man zu-nächst nur wenig, da die komplizier-ten Gleichungen, die die starke Kraft im Standard-Modell beschreiben, bis-

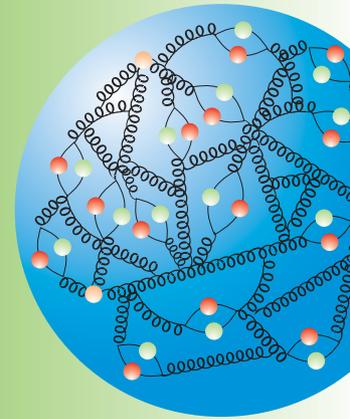
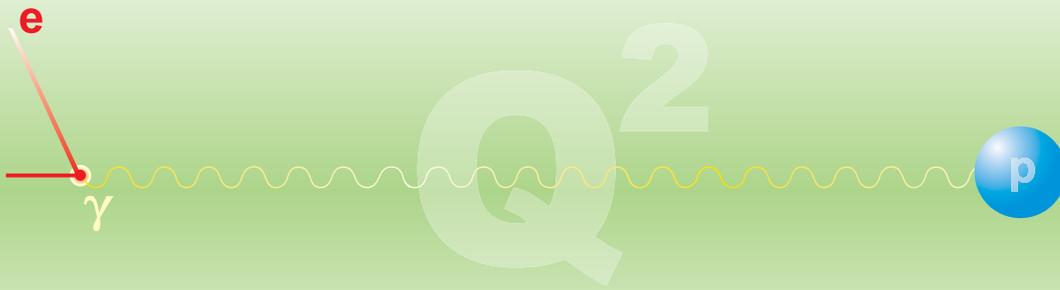
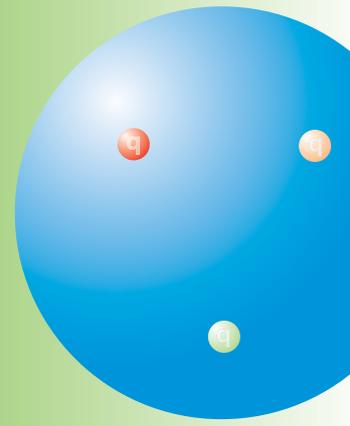
her nur zum Teil lösbar sind. Wie die Strukturfunktion konkret aussieht, muss deshalb experimentell bestimmt werden. Genau dieses Aussehen – der Verlauf der Strukturfunktion – ist es, das den Physikern schließlich verrät, was sich im Inneren des Protons verbirgt (siehe Kasten Seite 66).

Als HERA 1992 an den Start ging, wusste keiner so recht, was in den Tiefen des Protons zu erwarten war. Dass die Quarks im Proton Gluonen

Den Schlüssel zum Innenleben des Protons liefert die so genannte Strukturfunktion. Eine typische Teilchenreaktion in HERA läuft folgendermaßen ab: Ein Elektron fliegt auf ein Proton zu, wird über den Austausch eines Kraftteilchens gestreut und fliegt anschließend aus der Wechselwirkungszone wieder heraus. Das Proton dagegen bricht bei dem Stoß auseinander, seine „Bruchstücke“ verlassen den Kollisionspunkt als ein

**Weltweit einzigartig: H1 und ZEUS zeigen, dass die Anzahl der Quarks und Gluonen im Proton bei kleinem Impulsanteil dramatisch ansteigt (bei verschiedenen Auflösungen  $Q^2$  des HERA-Mikroskops).**





**Elektron-Proton-Wechselwirkung bei kleinen Quarkimpulsen und unterschiedlich heftigen Stößen:**

**Oben:** Überträgt das zwischen Elektron (e) und Proton (p) ausgetauschte Lichtteilchen ( $\gamma$ ) nur wenig Impuls ( $Q^2$  klein), so „sieht“ das Photon nur die Hauptbestandteile des Protons, die einzelnen Valenzquarks.

**Unten:** Bei höherem Impulsübertrag  $Q^2$  wird die Auflösung des HERA-Mikroskops größer – das hochenergetische Photon enthüllt die brodelnde „Suppe“ von Quarks, Antiquarks und Gluonen im Proton.

aussenden (die Klebeteilchen zwischen den Quarks) und dass diese wiederum Gluonen oder Paare von Quarks und Antiquarks erzeugen, war bekannt. Zumeist ging man jedoch davon aus, dass sich neben den drei Quarks, die für die Ladung des Protons verantwortlich sind – den „Valenzquarks“ –, nur wenige Quark-Antiquark-Paare und Gluonen im Proton befinden.

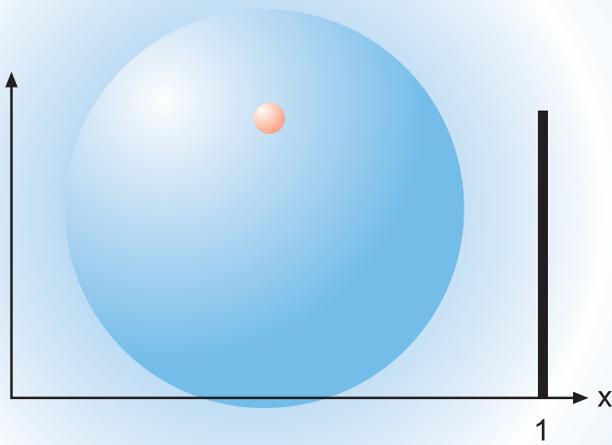
Dank der hohen Energie des HERA-Mikroskops dringen die Experimente H1 und ZEUS in einen Bereich vor, der weit über das hinausgeht, was in früheren Experimenten gemessen werden konnte – hin zu immer kleineren räumlichen Abständen und zu immer kleineren Impulsanteilen. Was H1 und ZEUS dort fanden, kam als

große Überraschung: Die HERA-Messungen zeigen, dass das Innere des Protons eher einer dicken, brodelnden Suppe gleicht, in der Gluonen und Quark-Antiquark-Paare unaufhörlich abgestrahlt und wieder vernichtet werden. Je kleiner die Impulsanteile der Quarks und Gluonen sind, auf die das HERA-Mikroskop eingestellt ist, desto mehr Bestandteile gibt es im Proton.

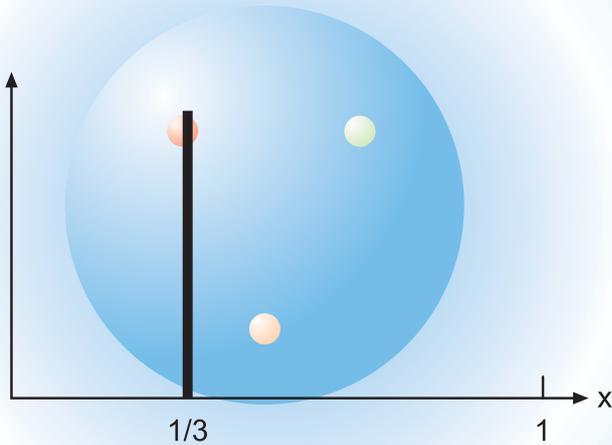
Anschaulich bedeutet das: Betrachtet man das Proton mit einer Brille, durch die sich nur solche Bestandteile erkennen lassen, die mehr als zehn Prozent des Protonimpulses tragen, so sieht man vor allem nur die drei Valenzquarks, die für die Ladung des Protons verantwortlich sind. Benutzt

man hingegen eine Brille, die nur Bestandteile zeigt, welche weit weniger als zehn Prozent des Protonimpulses tragen, so sieht man plötzlich enorm viele Quarks und Gluonen. Diese hohe Dichte der Gluonen und Quarks stellt einen völlig neuen, bisher noch nicht untersuchten Zustand der starken Kraft dar – jener Kraft, die die Quarks und Gluonen im Proton sowie die Protonen und Neutronen im Atomkern zusammenhält. Dieser Zustand ist wahrscheinlich dafür verantwortlich, dass die Quarks und Gluonen im Proton „eingesperrt“ sind, also niemals als freie Teilchen beobachtet werden können.

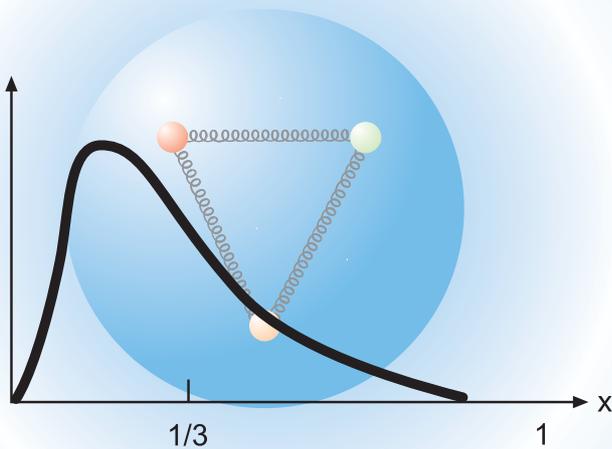
## Was die Strukturfunktion verrät ...



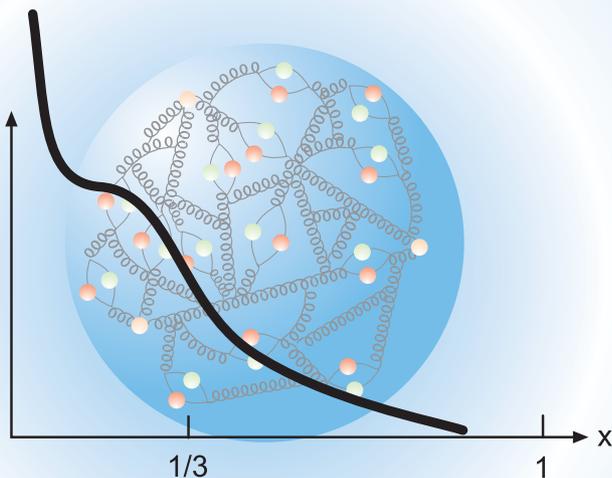
Besteht das Proton aus nur einem Quark, so nimmt die Strukturfunktion die Form eines Strichs bei  $x = 1$  an, denn das eine Quark trägt den gesamten Impuls des Protons. ( $x$  ist der Bruchteil des Protonenimpulses, den das Quark trägt.)



Bei einem Proton aus drei unabhängigen Quarks verschiebt sich der Strich zu  $x = 1/3$ , denn jedes der Quarks trägt in diesem Fall ein Drittel des Protonenimpulses.



Kommunizieren die drei Quarks über den Austausch von Gluonen, so übertragen sie dabei Impuls aufeinander. Die Quarks können also auch höhere oder niedrigere Impulsanteile besitzen – die Strukturfunktion verbreitert sich. Die Gluonen selbst übernehmen etwa die Hälfte des Impulses. Da die Strukturfunktion nur die von den Quarks getragenen Impulsanteile angibt, verschiebt sich ihr Maximum von  $1/3$  zu niedrigeren Impulsanteilen hin.



Je mehr Quark-Antiquark-Paare und Gluonen im Proton zu finden sind, desto weiter wächst die Strukturfunktion zu niedrigen Impulsanteilen hin an – so messen es die HERA-Experimente H1 und ZEUS, die damit erstmals die brodelnde „Suppe“ von Quarks und Gluonen im Proton enthüllten.

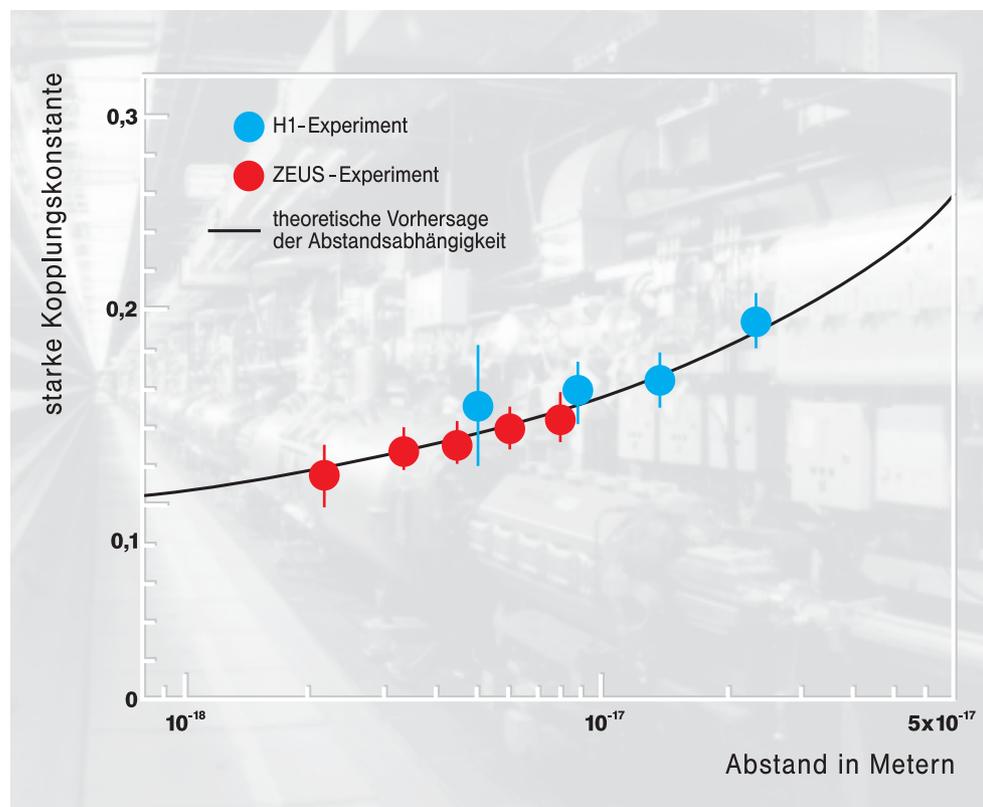
# Gefängnishaft im Proton

Niemand hat je ein einzelnes Quark gesehen. Ganz gleich, bei welchen hohen Energien die Teilchen in den Beschleunigern aufeinander prallen – einzelne Quarks wurden dabei noch nie gesichtet. Dabei sollten sie an ihrer drittelzahligen elektrischen Ladung gut zu erkennen sein. Die Quarks scheinen immer in Verbänden mit ganzzahliger Ladung aufzutreten: So bestehen Protonen und Neutronen z.B. aus drei Quarks, die so genannten Mesonen aus einem Quark-Antiquark-Paar. Auch wenn bei HERA ein Elektron auf ein Quark im Proton trifft und dieses mit voller Wucht aus dem Proton herausschlägt, tritt dieses Quark niemals allein in Erscheinung. Im Detektor findet sich ein ganzes Bündel von neuen Teilchen, die um das herausgeschlagene Quark entstanden sind. Es hat ganz den Anschein, als seien die Quarks in den Teilchen wie dem Proton gefangen. Doch warum?

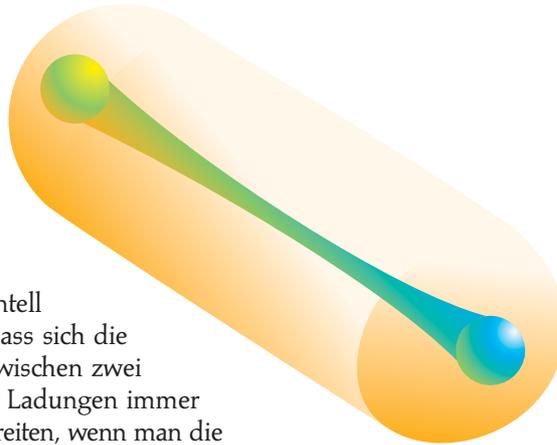
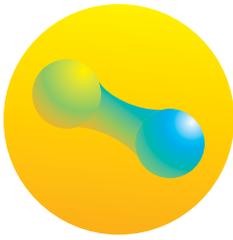
Für den Zusammenhalt der Quarks im Proton ist die starke Kraft zuständig, die von den Gluonen übertragen wird. Sie lässt sich in den Elektron-Proton-Zusammenstößen bei HERA besonders gut studieren – schließlich wimmelt das Proton nur

so von Teilchen, die über die starke Kraft miteinander kommunizieren. Im Gegensatz zur elektromagnetischen

Kraft, deren Auswirkungen teilweise auf über zehn Nach-Komma-Stellen genau berechnet werden können, ist

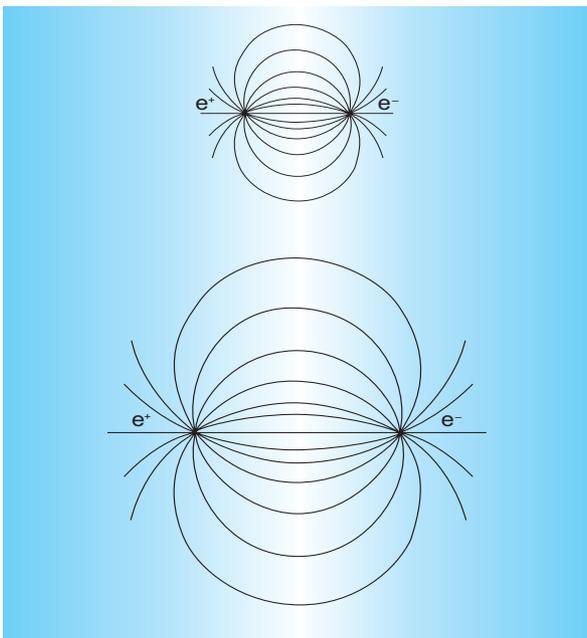


Die starke Kopplungskonstante gibt die Stärke der Kraft zwischen den Quarks an. Sie ist eigentlich keine Konstante: Wie H1 und ZEUS mit hoher Präzision messen konnten, wächst sie mit größer werdenden Abständen an.

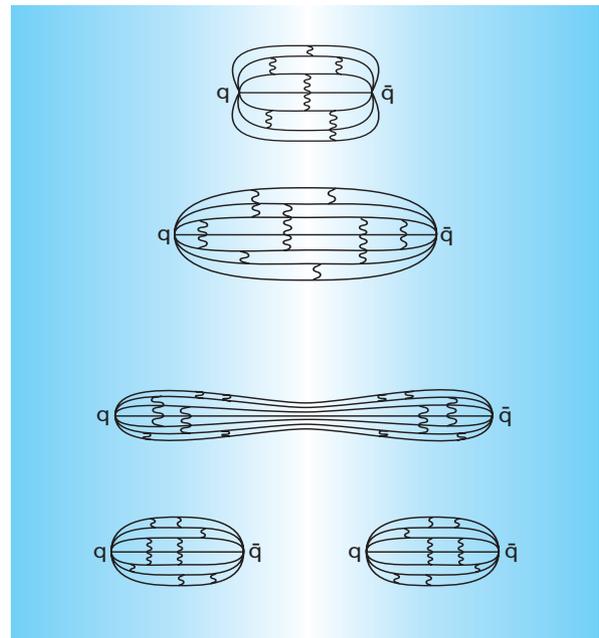


es viel schwieriger, die starke Kraft mathematisch zu erfassen. Dies liegt an einem fundamentalen Unterschied zwischen den beiden Kräften: Während die Photonen – die Lichtteilchen, welche die elektromagnetische Kraft übermitteln – elektrisch neutral sind und damit nicht untereinander kom-

Experimentell zeigt sich, dass sich die Feldlinien zwischen zwei elektrischen Ladungen immer weiter ausbreiten, wenn man die Ladungen voneinander wegbewegt: Die elektromagnetische Kraft zwischen ihnen wird immer schwächer. Bei der



**Bewegt man zwei elektrische Ladungen auseinander, so wird auch die elektromagnetische Kraft zwischen ihnen schwächer; die Feldlinien breiten sich immer weiter aus.**

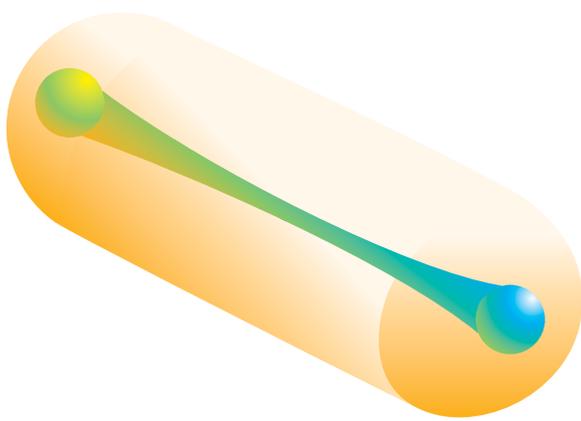


**Umgekehrt verhält es sich bei der starken Kraft: Sie wird immer stärker, je weiter sich die Quarks voneinander entfernen – bis die Feldlinien „reißen“ und ein neues Quark-Antiquark-Paar entsteht.**

munizieren können, verhält es sich bei den Gluonen, den Botenteilchen der starken Kraft, anders. Sie können nicht nur mit den Quarks, sondern auch untereinander in Wechselwirkung treten – eine Eigenschaft, die drastische Auswirkungen auf das Wesen der starken Kraft hat.

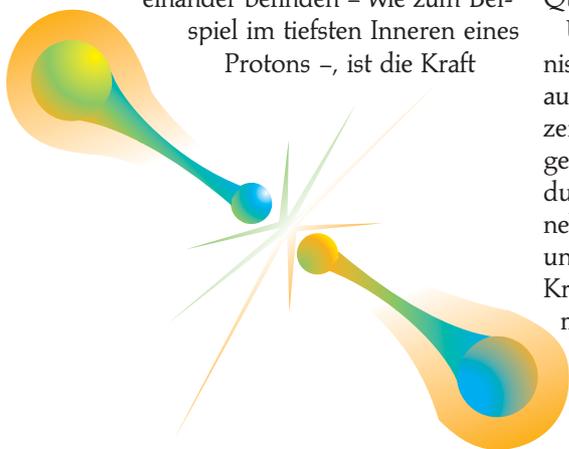
starken Kraft dagegen werden die Feldlinien durch die „Selbst-Wechselwirkung“ der Gluonen zusammengehalten. Entfernt man zwei Quarks voneinander, so verhalten sich die Feldlinien zwischen ihnen wie Gummibänder. Das Ganze wirkt wie eine Art „Teilchen-Expander“ – je weiter die

Teilchen sich voneinander entfernen, desto mehr Kraft muss man aufwenden, um sie noch weiter zu trennen. Irgendwann enthält das System genug Energie, um ein Quark-Antiquark-Paar aus dem Nichts zu erschaffen. Als würde das Gummiband reißen, fliegen die ursprünglichen Quarks



auseinander – allerdings nicht einzeln, sondern jeweils in Begleitung eines anderen Quarks, mit dem zusammen sie ein neues Teilchen bilden.

Sowohl die Stärke der elektromagnetischen Kraft als auch die der starken Kraft hängen vom Abstand zwischen den Teilchen ab. Während die elektromagnetische Wechselwirkung bei größerem Abstand immer schwächer wird, verhält es sich bei der starken Kraft genau andersherum. Nur wenn sich die Quarks besonders dicht beieinander befinden – wie zum Beispiel im tiefsten Inneren eines Protons –, ist die Kraft

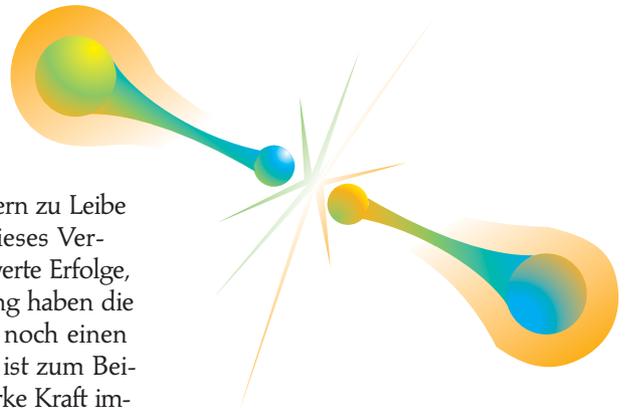


zwischen ihnen schwach: Dann genießen sie das, was im Fachjargon „asymptotische Freiheit“ genannt wird. In diesem Regime nahezu freier Teilchen feiert die Theorie ihre Erfolge, denn nur bei schwachen Kräften lassen sich die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen mathematisch im Rahmen der so genannten Störungstheorie berechnen. Wird die Kraft zu stark, so verliert das angewendete mathematische Verfahren seine Gültigkeit – bei großen Abständen zwischen den Quarks sind die Theoretiker bisher machtlos. Im Rahmen der „Gittertheorie“ versucht man, dem Problem

mit Hilfe von Großrechnern zu Leibe zu rücken. Zwar liefert dieses Verfahren erste bemerkenswerte Erfolge, bis zur endgültigen Lösung haben die Physiker allerdings wohl noch einen weiten Weg vor sich. So ist zum Beispiel nicht klar, ob die starke Kraft immer weiter ansteigt – damit wären die Quarks für immer unzertrennlich – oder ob die Stärke der Kraft bei großen Abständen wieder abfällt. Dann wäre es eine Frage der Energie der Teilchenbeschleuniger, bis die ersten freien Quarks beobachtet werden könnten.

Um den Ursachen für die „Gefängnishaft“ der Quarks im Proton weiter auf den Grund zu gehen, ist man derzeit auf experimentelle Untersuchungen angewiesen, wie sie bei HERA durchgeführt werden. So konnten neben anderen Experimenten auch H1 und ZEUS die Stärke der starken Kraft in Abhängigkeit vom Abstand mit hoher Präzision vermessen und dadurch die „starke Kopplungskonstante“ – ein Maß für die Stärke der Kraft – in Abhängigkeit vom Abstand

zwischen den Teilchen bestimmen. Dazu benutzen die Physiker zum Beispiel Teilchenkollisionen, in denen neben dem gestreuten Elektron und einem von dem getroffenen Quark stammenden Teilchenbündel



– einem so genannten Jet – noch ein zusätzliches Teilchenbündel auftritt. Dieses wird durch ein Gluon erzeugt, das während der Kollision abgestrahlt wurde. Die Wahrscheinlichkeit für eine solche Gluonabstrahlung ist direkt proportional zur starken Kopplungskonstante, also zur Stärke der Kraft zwischen den Quarks. Aus der Anzahl der beobachteten Ereignisse mit einem Gluon als Funktion des Impulsübertrags während der Kollision lässt sich daher die Abstandsabhängigkeit der starken Kopplungskonstante messen. Für Werte zwischen  $10^{-16}$  und  $10^{-18}$  Metern bestätigen die Ergebnisse eindrucksvoll das von der Theorie der Quantenchromodynamik vorhergesagte starke Anwachsen zu größeren Abständen hin. Dass die große Zahl von Messungen der starken Kopplungskonstanten in verschiedenen Teilchenreaktionen an verschiedenen Beschleunigern übereinstimmende Werte liefert, ist ein großer Triumph des Standard-Modells.

Gleichzeitig stärkt es das Vertrauen, dass man sich mit der Quantenchromodynamik tatsächlich auf dem richtigen Weg zur Beschreibung der starken Kraft befindet.



# Diffraction – Aktenzeichen epX ungelöst

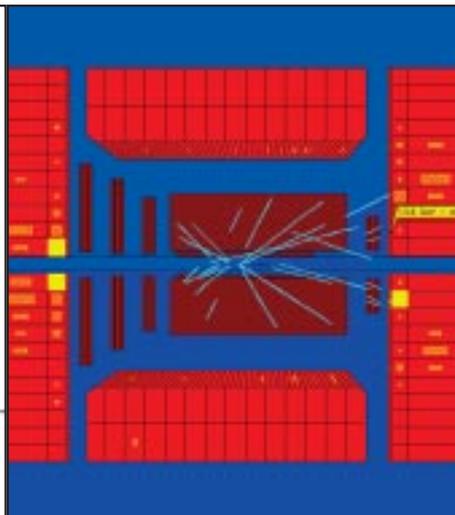
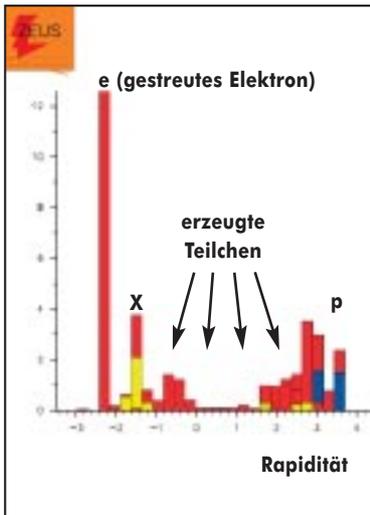
Mit dem Start von HERA erwartete die Physiker eine Überraschung: Bei den gewaltigen Kollisionen im Beschleuniger – besonders bei höchsten Impulsüberträgen – sollten die Protonen eigentlich in eine Unzahl neuer Teilchen zerbersten. In etwa 15 Prozent der Fälle bleibt das Proton jedoch völlig unversehrt, obwohl die Wechselwirkung überaus heftig war. Das ist ungefähr so, als hinterließen 15 Prozent aller Frontalzusammenstöße keine Schrammen an Autos. Bei der Kollision wird schließlich mit aller Wucht ein Quark aus dem Proton herausgeschlagen, und dabei sollte es aufgrund der besonderen Eigenschaften der starken Kraft viele weitere Teilchen abstrahlen – wie kann das Proton den Zusammenstoß dann unbehelligt überstehen?

Noch ringen Theoretiker und Experimentalphysiker um das Verständnis dieses Phänomens, das in Anlehnung an die Optik „Diffraction“ genannt wird. Man ist noch weit davon entfernt, den rätselhaften Effekt im Rahmen der Theorie der starken Wechselwirkung erklären zu können, auch wenn es inzwischen Modelle gibt, die die Messungen gut beschreiben. In einem dieser Modelle wird angenommen, dass es im Proton ein mysteriöses Objekt namens „Pomeron“ gibt, benannt nach dem russischen Physiker Isaac J. Pomerantshuk. Damit lassen sich die Messungen zwar gut beschreiben – aber verstanden hat man sie deshalb noch lange nicht. Letztendlich ist die Ursache für die Diffraction wohl in der Abstrahlung einer ganzen Kette von Gluonen zu suchen, die schlussendlich dazu führt, dass das Proton unbehelligt aus dem Zusammenstoß herauskommt. Es ist anzunehmen, dass diese außergewöhnliche Eigenschaft der starken Kraft auch den Schlüssel zur Antwort auf die fundamentale, bisher noch ungeklärte Frage liefert, warum wir in der Natur keine freien Quarks finden bzw. warum die Quarks im Proton wie in einem Gefängnis eingesperrt sind.

## Farbige Quarks

Im Standard-Modell der Teilchenphysik wird jede Kraft durch eine charakteristische Ladung verursacht: So hängt die elektromagnetische Kraft zum Beispiel mit der elektrischen Ladung der Teilchen zusammen. Bei der starken Kraft spricht man von einer „Farbladung“ – die allerdings nichts mit den herkömmlichen Farben zu tun hat. Bei der Farbladung handelt es sich lediglich um einen anschaulichen Namen für eine abstrakte Teilcheneigenschaft.

Die Quarks zum Beispiel kommen in den „Farben“ rot, grün und blau vor, die Antiquarks in 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 – noch nie wurde ein einzelnes farbiges Teilchen wie ein Quark oder ein Gluon gesichtet. Die Physiker nennen diese Eigenschaft der starken Kraft *Confinement*, auf Deutsch in etwa „Gefängnishaft“. Warum die Quarks in Teilchen wie dem Proton „gefangen“ sind, zählt zu den grundlegenden ungelösten Fragen der Teilchenphysik.



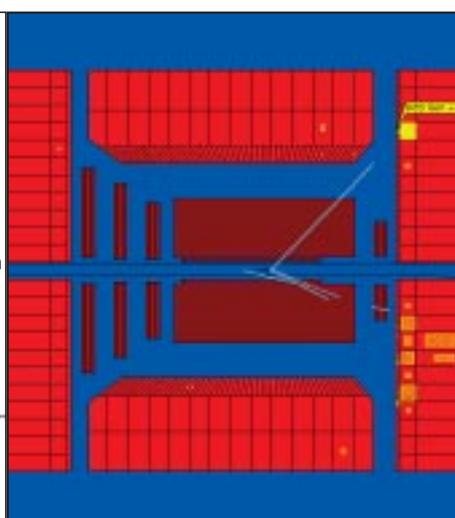
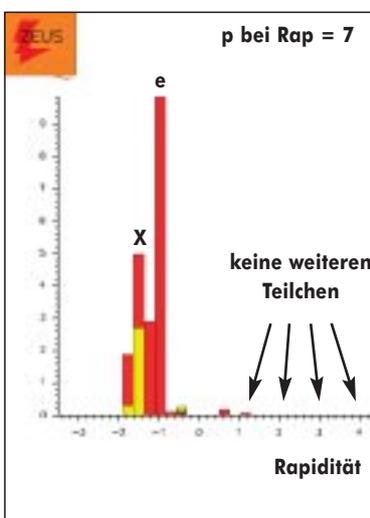
Ein Ereignis der „tiefunelastischen Streuung“ bei ZEUS (rechts: Teilchenspuren im Detektor, links: die gemessene Energie in Abhängigkeit von der „Rapidity“, einem Maß für den Winkel, unter dem die Teilchen erzeugt werden). Aufgrund der besonderen Wirkung der starken Kraft erscheinen zwischen den Bruchstücken des Protons (p) und dem Teilchenbündel von dem herausgeschlagenen Quark (X) zahlreiche weitere Teilchen.

## RapGap bei HERA

Tatort HERA. Ein Elektron stößt bei höchsten Energien mit einem Proton zusammen und schlägt ein Quark heraus. Das Elektron prallt zurück, das gestreute Quark erzeugt ein Bündel aus weiteren Teilchen, die Überreste des Protons ebenso. Sowohl das Elektron als auch die beiden „Jets“ hinterlassen ihre Spuren in den Detektoren H1 und ZEUS. Charakteristisch für diese „tiefunelastische Streuung“ ist, dass zwischen den beiden Teilchenjets ebenfalls Teilchen zu finden sind: Wird das getroffene Quark aus seinem Verband im Proton herausgeschleudert, so wirkt die starke Kraft zwischen den Quarks immer stärker, je weiter sich das getroffene Quark entfernt. Wie „Gummibänder“ hält die starke Kraft den Verband zusammen. Irgendwann jedoch reißt dieses Band, und aus der darin gespeicherten Energie entstehen nach Einsteins berühmter Formel  $E = mc^2$  weitere Teilchen. Diese finden sich in den Detektoren zwischen dem Teilchenbündel, das direkt von dem gestreuten Quark stammt, und dem Protonenrest wieder.

Bei den mysteriösen „diffraktiven Ereignissen“, die bei HERA entdeckt wurden, klappt genau hier eine Lücke. Ein Elektron und ein Proton fliegen in den Detektor hinein; heraus kommt das gestreute Elektron (e), ein enges Teilchenbündel von dem aus dem Proton herausgeschleuderten Quark (X) – und das unversehrte Proton (p). Sonst nichts. Kein Anzeichen für irgendwelche Überreste aus den „Gummibändern“ der starken Kraft, kein Anzeichen für eine Veränderung im Proton. Dies lässt darauf schließen, dass das Elektron ein farbneutrales Objekt getroffen hat, ein Teilchen, das nicht über die Gummibänder der starken Kraft mit dem Rest des Protons zusammenhing. Was das sein könnte, darüber streiten sich bisher die Geister.

Im Fachjargon werden die sonderbaren Ereignisse nach ebendieser Teilchenlücke benannt: Sie heißen *rapidity gap*-Ereignisse, kurz „RapGap“.



RapGap – ein „diffraktives“ Ereignis bei ZEUS (rechts: Teilchenspuren im Detektor, links: gemessene Energie in Abhängigkeit von der „Rapidity“). Hier ist der Protonenrest (p) im linken Teil der Grafik nicht mehr zu sehen – er sollte bei einem Wert von ca. 7 liegen. Außergewöhnlich ist, dass zwischen dem Teilchenbündel von dem herausgeschlagenen Quark (X) und dem Protonenrest keine weiteren Teilchen zu finden sind. Diese „Lücke“ in der Rapidity („RapGap“) ist ein Merkmal der Diffraction.

# Die Welt mit anderen Wenn das Proton ruht

Ein grundlegendes Postulat der Physik besagt, dass die Gesetze der Physik im gesamten Universum gelten – egal, unter welchem Blickwinkel wir das Geschehen betrachten. Zwar ändert sich mit dem gewählten Bezugssystem das Bild, das der Betrachter von einem Ereignis wahrnimmt; doch die physikalischen Beobachtungen und die Ergebnisse, die man letztendlich erhält, sind unabhängig von dem Blickwinkel, unter dem der Prozess beschrieben wird. So kann man bei HERA die Teilchenkollisionen zum Beispiel vom „Laborsystem“ aus analysieren. Wie der Name verrät, sitzt der Betrachter dabei in seinem Laborstuhl und beobachtet, wie Elektron und Proton aufeinander zurasen, um dann im Mittelpunkt der Detektoren H1 und ZEUS zu kollidieren. In vielen Fällen ist es jedoch günstiger, im „Ruhesystem des Protons“ zu arbeiten

– jenem Bezugssystem, das sich mit dem Proton mitbewegt. Dabei analysiert der Betrachter das Geschehen, als würde er auf dem Proton sitzen und mit ihm mitfliegen. Das Proton erscheint dabei unbewegt, während das Elektron praktisch mit Lichtgeschwindigkeit auf das Proton zufliegt.

In diesem Bild trägt das Proton keine Bewegungsenergie. Die gesamte Kollisionsenergie wird vielmehr durch das heranbrausende Elektron geliefert: Während das Elektron im Laborsystem nur 27,5 Gigaelektronenvolt (GeV) an Energie besitzt und das Proton mit 920 GeV durch den HERA-Ring fliegt, wirkt es im Ruhesystem des Protons so, als würde das Elektron mit mehr als 50 000 GeV auf ein Proton mit einem Impuls von 0 GeV treffen. Dieser zunächst scheinbar banale Unterschied hat jedoch tief greifende Auswirkungen auf das Bild, das sich dem Betrachter beim Zusammenstoß der Teilchen bietet.

Den Schlüssel zum weiteren Verlauf der Dinge liefert die Heisenberg'sche Unschärferelation. In der Welt der Quanten kann sich ein Teilchen für sehr kurze Zeit in weitere Teilchen aufspalten. Wie lange diese so genannten Quantenfluktuationen existieren, gibt die Unschärferelation vor: Je energiereicher das ursprüngliche Teilchen, desto langlebiger die Quantenfluktuationen. So kann sich ein Photon zum Beispiel für kurze Zeit in ein Paar aus Quark und Antiquark aufspalten; diese können sich wiederum in weitere Teilchen aufteilen – bis sozusagen die von der Unschärferelation vorgegebene Zeit abgelaufen ist und alle Fluktuationen ihren Weg wieder in Form des ursprünglichen Photons fortsetzen. Im Ruhesystem des Protons besitzt das Elektron bei HERA eine derart hohe Energie, dass seine Quantenfluktuationen sehr langlebig sind. Etwa ein billiardstel Meter kann das Photon unter bestimmten Umständen in Form von Quarks und Gluonen zurücklegen; das ist 1000-mal so weit wie die Größe des Protons.

Beim Zusammenstoß eines Elektrons und eines Protons im HERA-Ring sendet das Elektron ein Photon, ein Lichtteilchen, aus. Im Ruhesystem des Protons betrachtet, kann sich das Photon dank seiner hohen Energie in eine ganze Kaskade aus Quarks, Antiquarks und Gluonen verwandeln. Was dann schließlich mit dem Proton in Wechselwirkung tritt, ist nicht mehr das ursprüngliche Photon, sondern ein „Hadron“: ein aus Quarks zusammengesetztes Teilchen, das im Gegensatz zum Photon nicht über die elektromagnetische, sondern über die starke Kraft mit dem Proton kommuniziert.



# Augen:

•••



Unter diesem Blickwinkel betrachtet, erhält so manches physikalische Ergebnis eine alternative Erklärung. So wird der Anstieg der Strukturfunktion des Protons bei kleinen Werten des Impulsanteils  $x$  (siehe Seite 64) in diesem Bild nicht etwa auf eine immer komplexer werdende innere Struktur des Protons zurückgeführt – dieses sitzt weiterhin unverändert in seinem Ruhesystem. In diesem Fall ist es vielmehr das Photon, das sich bei kleinen Werten von  $x$  in eine immer dichtere Wolke aus Quarks und Gluonen verwandelt, die sich als Anstieg in der gemessenen Strukturfunktion niederschlägt. Beide Bilder sind komplementär: Die Betrachtungsweise ist verschieden; das erhaltene Ergebnis jedoch bleibt dasselbe.

Auch die rätselhafte Diffraktion (siehe Seite 70) lässt sich im Ruhesystem des Protons erklären. In diesem Bild trifft nicht etwa das Photon auf ein farbneutrales Teilchen im Proton, sondern es ist das Photon selbst, das sich in ein (farbneutrales) Hadron verwandelt und schließlich als Hadron am Proton streut. Die Wechselwirkung kann dabei so „weich“ sein, dass das Proton ganz bleibt und schließlich mit dem Elektron und dem gestreuten Hadron in den Detektoren als diffraktives Ereignis nachgewiesen wird. Damit sollte die Reaktion zwischen Elektron und Proton, die ursprünglich als elektromagnetische Streuung begann, de facto einer Hadron-Hadron-Streuung entsprechen (auch das Proton gehört zur Familie der Hadronen) – was der Vergleich mit anderen Hadron-Hadron-Streuxperimenten bestätigt.



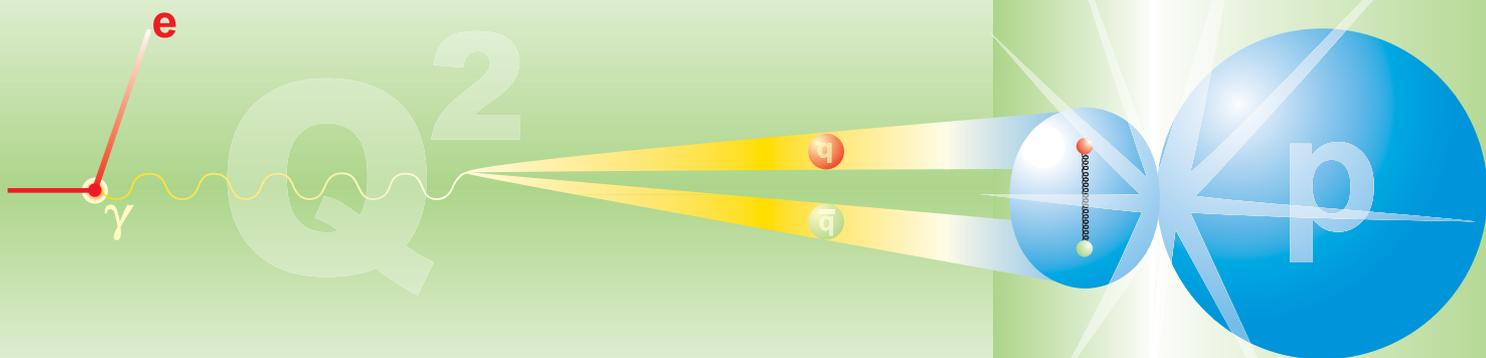
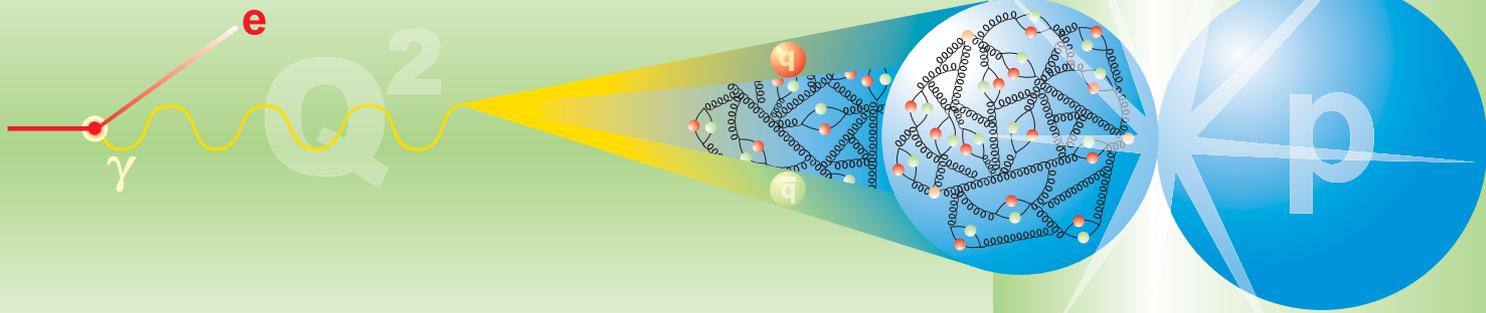
Die physikalischen Ergebnisse solcher Hadron-Hadron-Streuungen lassen sich bisher durch Modelle ganz gut reproduzieren. Eine Erklärung, wie diese Ergebnisse im Rahmen der grundlegenden Theorie der starken Kraft, der Quantenchromodynamik, zustande kommen, bieten diese Modelle jedoch nicht. Hier könnten die HERA-Experimente eine Schlüsselrolle spielen. Mit den Parametern des Experiments lässt sich nämlich die Beschaffenheit der Fluktuationen variieren, in die sich das Photon verwandelt: Misst man Reaktionen mit hohen Impulsüberträgen ( $Q^2$  groß), so ist die Quantenfluktuation sehr schmal. Im Extremfall besteht sie aus einem einzelnen Quark-Antiquark-Paar.

Je kleiner der Impulsübertrag  $Q^2$  der Reaktion ist, desto breiter ist das aus dem Photon gebildete Hadron, desto mehr Quarks und Gluonen enthält es. Bei HERA lässt sich quasi aus einem Photon ein immer komplexeres Hadron bauen – bei durchstimmbarer Komplexität der gebildeten Quark-Gluon-Kaskade.

Der Mechanismus, der hinter diesem Übergang vom einzelnen Quark-Antiquark-Paar zum komplexen Hadron steckt, ist ein rein von der starken Kraft beherrschter Prozess. Seine Untersuchung erlaubt es, die Quantenchromodynamik in ihren elementaren Grundlagen zu testen. Letztendlich kann dieser Prozess uns verraten, wie die starke Kraft die Quarks und Gluonen in den Hadronen genau zusammenhält – und uns damit erlauben, das Geheimnis um die Gefängnishaft der Quarks im Proton zu lüften.

## Die kinematischen Variablen $x$ und $Q^2$ :

$x$ : Anteil des Protonenimpulses, den das Quark trägt, mit dem das Elektron zusammenstößt;  
Impulsübertrag  $Q^2$ : 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)



## Im Ruhesystem des Protons

Im Ruhesystem des Protons betrachtet, sieht die Welt anders aus – die physikalischen Ergebnisse jedoch bleiben gleich: In diesem Fall ist es nicht ein einfaches Photon ( $\gamma$ ), das mit einem höchst komplexen Proton zusammenstößt (vergleiche Seite 65). Es erscheint vielmehr so, als würde das Photon sich in ein komplexes Teilchen aus Quarks, Antiquarks und Gluonen (ein „Hadron“) verwandeln, das schließlich auf das Proton trifft.

Ist der Impulsübertrag  $Q^2$  klein (oben), so bildet das Photon ein großes, komplexes Hadron. Bei größerem  $Q^2$  ist das Hadron einfacher, es kann sogar aus nur einem einzelnen Quark-Antiquark-Paar bestehen (unten).

Mit dem Impulsübertrag lässt sich also die Komplexität des gebildeten Hadrons einstellen: So können die HERA-Physiker im Detail untersuchen, wie solche Teilchen gebildet werden und welche Eigenschaften der starken Kraft dabei eine Rolle spielen. Womöglich erlaubt dies auch zu klären, warum die Quarks im Proton „gefangen“ sind.

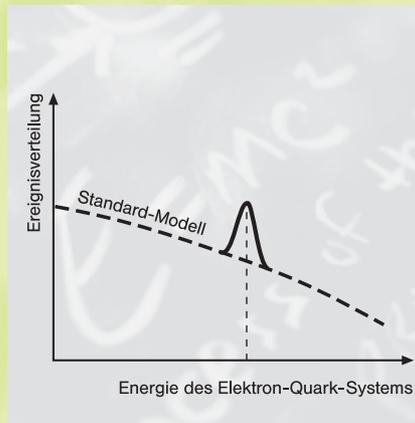
# Auf der Suche nach neuen Teilchen und Kräften

Mit der Entdeckung des **top-Quarks** 1994 und dem direkten Nachweis des **Tau-Neutrinos** im Sommer 2000 bei Fermilab, Chicago, ist der Teilchenzoo des Standard-Modells beinahe komplett. Was noch fehlt, ist das **Higgs-Teilchen**, das für die Erzeugung der Teilchenmassen verantwortlich sein soll. Bis heute beschreibt das Standard-Modell die Geschehnisse im Reich der kleinsten Teilchen mit überaus großem Erfolg. Dennoch sind die Physiker mit dem Modell nicht zufrieden. Es lässt viele Fragen offen, die Schwerkraft findet darin keinen Platz, und zu viele scheinbar willkürliche Naturkonstanten müssen experimentell bestimmt und in die Berechnungen hineingesteckt werden. Letztendlich suchen die Physiker nach einer umfassenderen Theorie – einer „Weltformel“, die über das Standard-Modell hinausgeht und unsere Welt anhand nur weniger Annahmen und Konstanten erklärt.

Anwärter für eine solche umfassendere Theorie gibt es einige (siehe Seite 56). Bisher fehlt jedoch ein experimenteller Hinweis darauf, welcher dieser Theorien die Natur den Vorzug gibt. Deshalb wird an den Beschleunigerzentren weltweit nach Effekten „jenseits“ des Standard-Modells gefahndet: Die Entdeckung eines neuen Teilchens oder einer neuen Kraft würde schließlich den wohl deutlichsten Fingerzeig

auf eine Erweiterung des Standard-Modells liefern.

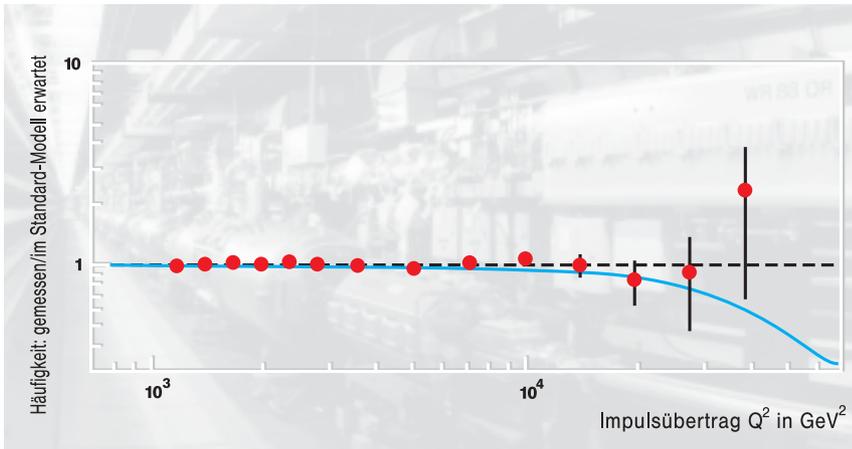
Ausschlaggebend dafür, ob ein Teilchen an einem Beschleuniger direkt erzeugt werden kann, sind sowohl die Art der aufeinander prallenden Teilchen als auch die Kollisionsenergie: die „Schwerpunktsenergie“ des Beschleunigers. Sie beträgt bei HERA etwa 320 Gigaelektronenvolt (GeV). Teilchen, die leichter als diese Schwerpunktsenergie sind, können dank  $E = mc^2$ , Einsteins berühmter Äquivalenz von Masse und Energie, direkt produziert werden. Zu erkennen sind sie einerseits an ihrem charakteristischen „Fußabdruck“ – ihrer Art, in bestimmte weitere Teilchen zu zerfallen, die sich an dem Bild der Teil-



**Eine „Resonanz“ in der Häufigkeit der beobachteten Ereignisse: Hier ist ein neues Teilchen entstanden.**

chenspuren bei der Kollision direkt ablesen lässt. Trägt man außerdem die Häufigkeit der beobachteten Ereignisse gegenüber der Energie des Systems Elektron/getroffenes Quark auf, sollte sich ein neues Teilchen als „Spitze“ in dieser Verteilung bemerkbar machen: Bei der Energie, die der Masse des neuen Teilchens entspricht, steigt die Rate der gemessenen Ereignisse an; sie zeigt eine „Resonanz“ – ein untrügliches Zeichen dafür, dass hier etwas Neues entstanden ist.

Da HERA weltweit der einzige Elektron-Proton-Speicherring ist, sind die Experimente H1 und ZEUS für die Entdeckung bestimmter Teilchensorten besonders geeignet. In manchen Theorien jenseits des Standard-Modells treten zum Beispiel so genannte Leptoquarks auf, Zwitterteilchen, welche die Eigenschaften von Leptonen und Quarks in sich vereinen. Da bei HERA ein Lepton (das Elektron) auf die Quarks im Proton trifft, könnten solche Leptoquarks hier direkt aus einem Zusammenschluss beider Teilchen entstehen. Andere Beschleuniger müssten dagegen genügend Energie zur Verfügung haben, um die Leptoquarks paarweise zu erzeugen. Auch nach supersymmetrischen Teilchen, die im Rahmen der Theorie der Supersymmetrie vorhergesagt werden, wird bei HERA nach Kräften geforscht – bisher allerdings ebenso vergeblich wie an anderen Beschleunigern.



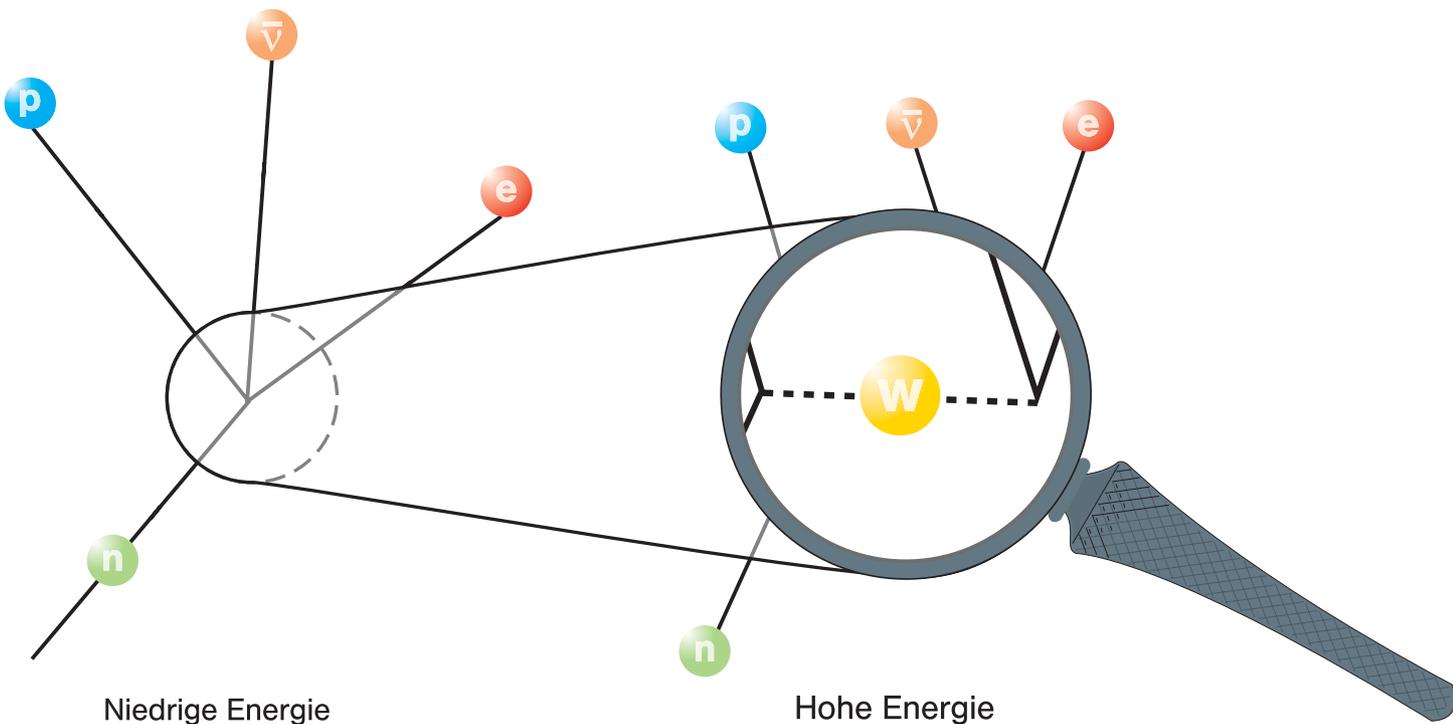
Der Vergleich zwischen Messung (rote Punkte) und Theorie (blaue Linie) erlaubt es, die Existenz von neuen Teilchen wie Leptoquarks mit einer Masse oberhalb der Schwerpunktsenergie von HERA auszuschließen (blaue Linie für ein Leptoquark mit einer Masse von 900 GeV bei starker Kopplung).

Die direkte Suche nach neuen Teilchen ist durch die Schwerpunktsenergie des Beschleunigers begrenzt; ein Trick erlaubt es den Physikern jedoch, mit ihren Experimenten quasi „um die Ecke“ zu blicken, in einen Bereich hinein, der weit jenseits der zur Verfügung stehenden Energie liegt. Dieser Trick hat sich in der Ver-

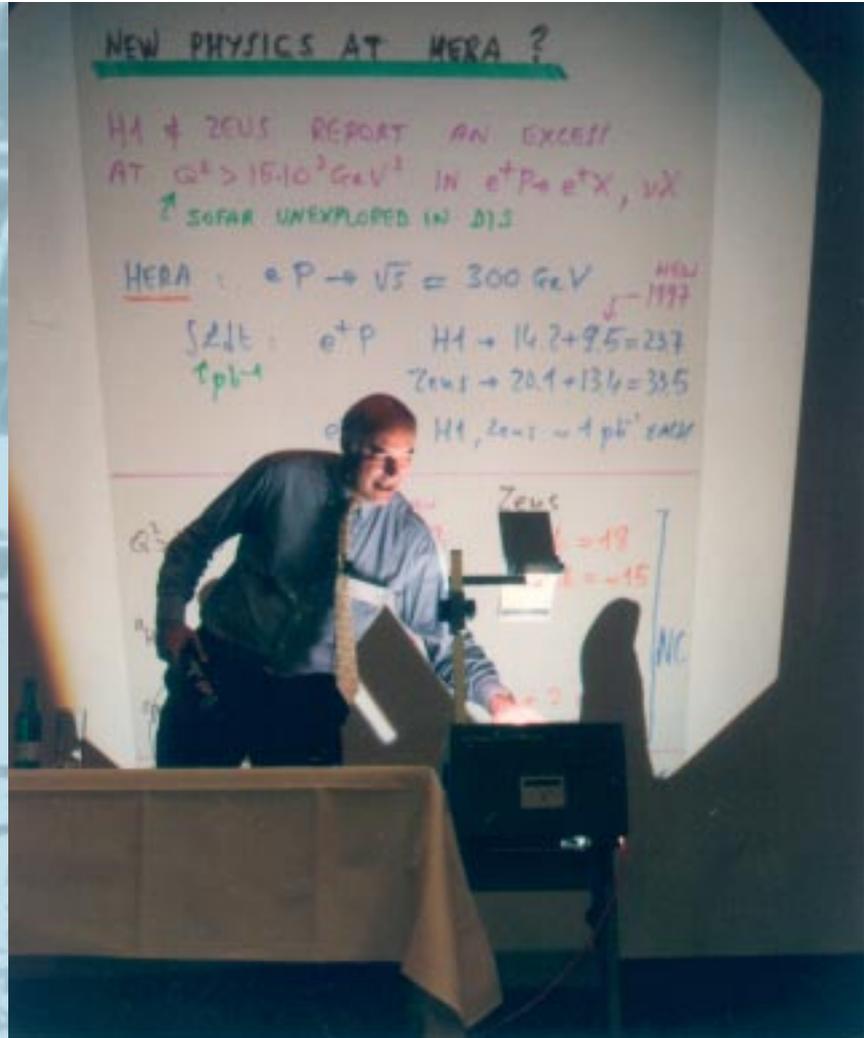
gangenheit bereits bestens bewährt: So konnten die Botenteilchen W und Z der schwachen Kraft, bevor sie 1983 bei CERN in Genf entdeckt wurden, auf der Grundlage experimenteller Ergebnisse mit guter Genauigkeit vorhergesagt werden.

Das Prinzip beruht auf dem Konzept der „Kontaktwechselwirkung“.

Wenn die Energie des Beschleunigers zu niedrig ist, um einen bestimmten Prozess aufzulösen, dann wirkt die Wechselwirkung zwischen den Teilchen so, als fände sie an einem Punkt statt: Zwei Teilchen treffen an einem Punkt zusammen, zwei Teilchen streben danach auseinander; was genau an diesem Punkt passiert ist, lässt sich



Ein Neutron zerfällt in ein Proton, ein Antineutrino und ein Elektron: Bei niedrigen Energien wirkt die Wechselwirkung, als finde sie an einem Punkt statt. Erhöht sich mit der Energie die Auflösung, bei der man den Zerfall betrachtet, so erkennt man, dass er tatsächlich über den Austausch eines W-Teilchens stattfindet.



**Im Februar 1997 registrierten H1 und ZEUS einen unerklärlichen Überschuss von Ereignissen, der auf „neue Physik“ hinzuweisen schien. Was den Effekt verursacht, kann erst nach der Luminositätserhöhung von HERA abschließend geklärt werden.**

bei den erreichbaren Energien nicht erkennen. Hier könnte zum Beispiel ein besonders schweres – neues – Botenteilchen ausgetauscht worden sein, das eine bisher unbekannte Kraft vermittelt. Der Einfluss solcher hochenergetischen, unerreichbaren Prozesse bleibt allerdings auch bei niedrigeren Energien nicht unbemerkt: Sie interferieren mit den bekannten Prozessen und verändern dadurch die Häufigkeit der gemessenen Reaktionen. Weisen die experimentellen Daten also eine Abweichung gegenüber der theoretischen Vorhersage des Standard-Modells auf, so könnte dies auf einen hochenergetischen Prozess jenseits der Energie des Beschleunigers hinweisen. Anhand solcher Analysen

der HERA-Daten lässt sich bisher ausschließen, dass es zusätzliche Fundamentalkräfte zwischen Elektronen, Quarks oder Gluonen gibt, deren Reichweiten größer als etwa ein Fünftausendstel des Protonenradius sind.

Die durch neue Effekte verursachten Veränderungen sollten sich insbesondere bei der höchsten Auflösung, also bei hohen Impulsüberträgen  $Q^2$ , zeigen – genau in jenem Bereich, in dem sowieso nur sehr wenige Reaktionen auftreten. Entsprechend langwierig gestaltet sich die Suche. So verzeichneten die HERA-Experimente H1 und ZEUS im Februar 1997 in ihren Datensätzen einen unerklärlichen Überschuss an hochenergetischen Ereignissen. Darüber, ob

diese Abweichung nur eine statistische Fluktuation ist oder tatsächlich auf etwas Neues hindeutet, wurde damals auch in der Presse wild spekuliert. Endgültig geklärt werden konnte der Effekt jedoch nicht – die Datenmenge reichte dafür nicht aus. In der inzwischen siebenfach größeren Datenmenge ist die Abweichung noch vorhanden, sie hat allerdings an Signifikanz verloren. Wodurch genau sie verursacht wird, kann wahrscheinlich erst abschließend geklärt werden, wenn den Experimenten nach dem Umbau von HERA die vierfache Luminosität des Beschleunigers zur Verfügung steht.

# Die Suche nach Extra-

Links – rechts, vorne – hinten, oben – unten. Der Raum, in dem wir uns bewegen, hat offensichtlich drei Dimensionen. Hinzu kommt die Zeit als vierte Dimension. Dabei bleibt es in den meisten Sciencefiction-Romanen allerdings nicht. Kaum geraten die Helden – in den üblichen vier Dimensionen – in eine ausweglose Situation, tut sich prompt eine fünfte auf, durch die ebenso prompt die Rettung herannahet. Tatsächlich ist der Gedanke, unsere Welt könne über die bekannten drei Raumdimensionen hinaus in einen höher dimensional Raum eingebettet sein, weit mehr als eine bloße Spekulation von Sciencefiction-Autoren: Auch einige Theorien jenseits des Standard-Modells postulieren die Existenz von mehr als nur drei Raumdimensionen. String-Theorien zum Beispiel ersetzen die punktförmigen Teilchen des Standard-Modells durch winzige Saiten, die in bis zu zehn räumlichen Dimensionen schwingen. Dass uns diese zusätzlichen Raumdimensionen verborgen bleiben, wird dadurch erklärt, dass diese Dimensionen auf kleinsten Abständen „aufgerollt“ sind – ähnlich wie ein Strohhalm, der aus der Ferne wie eine eindimensionale Linie erscheint, während die Ameise sehr wohl auf seiner zweidimensionalen Oberfläche herumkrabbeln kann.

Hintergrund dieser Überlegungen ist die Vereinigung der Naturkräfte zu einer einzigen Urkraft (siehe Seite 62). Während die elektromagnetische und die schwache Kraft schon bei den heutzutage erreichbaren Energien von 100 Gigaelektronenvolt (GeV) gleich stark

werden, findet die Vereinigung der daraus entstehenden elektroschwachen Kraft mit der starken Kraft erst bei etwa  $10^{16}$  GeV statt – weit jenseits der Reichweite eines jeden erdenkbaren irdischen Teilchenbeschleunigers. Die Schwerkraft ist bei unseren alltäglichen Energien sogar so schwach, dass sie erst bei  $10^{19}$  GeV die Stärke der anderen Kräfte erreicht. Diese Energieskala – die Planck-Energie – entspricht Abständen von nur  $10^{35}$  Metern, Planck-Länge genannt. Erst bei diesen gigantischen Energien, so nahmen die Physiker bisher an, würde sich die große Vereinigung der Gravitation mit den übrigen Kräften in einer „Weltformel“ offenbaren. Zwischen der Energieskala der elektroschwachen Vereinigung und der Zusammenführung mit der Schwerkraft lägen damit gewaltige 17 Größenordnungen – ein ausgesprochen unbefriedigender Unterschied, der auch die Theoretiker vor schwierige Probleme stellt. Außerdem wäre die vereinheitlichte Theorie damit in absehbarer Zukunft hoffnungslos

außer Reichweite einer direkten experimentellen Überprüfung.

Im Jahr 1998 jedoch warteten Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos und Georgi Dvali an der Universität Stanford in Kalifornien mit einer radikal



# Dimensionen

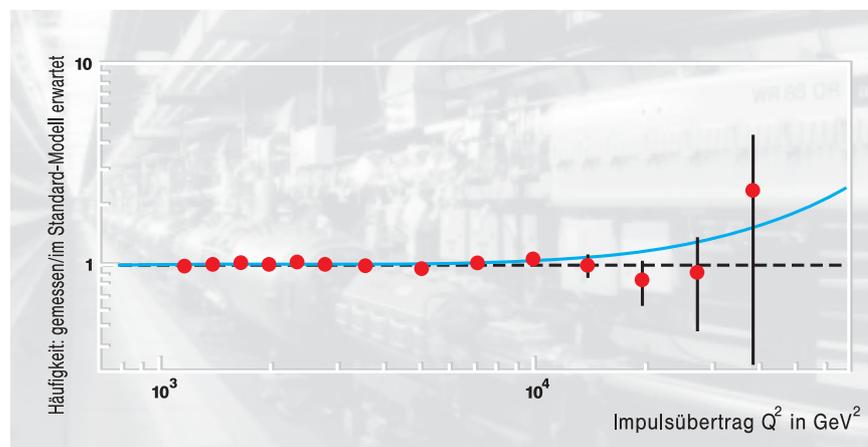


ausgesprochen attraktiv und steht erstaunlicherweise in keinerlei Widerspruch zu bisherigen Beobachtungen. Die Vereinheitlichung bei der herkömmlichen Planck-Skala von  $10^{35}$  Metern beruht nämlich auf der Annahme, dass Newtons Gravitationsgesetz – das die Schwerkraft im Fall von Sonnensystemen, fallenden Äpfeln und Menschen perfekt beschreibt – auch bei kleinsten Entfernungen gültig ist. Tatsächlich ist es bisher jedoch nur bis zu Entfernungen oberhalb von 0,2 Millimetern experimentell überprüft worden. Dass das Gravitationsgesetz universell gültig ist, wurde bisher allgemein angenommen – bewiesen ist es allerdings nicht. Und immerhin muss man über 32 Größenordnungen extrapolieren, um darauf zu schließen, dass die Schwerkraft erst bei der Planck-Länge von  $10^{35}$  Metern stark wird.

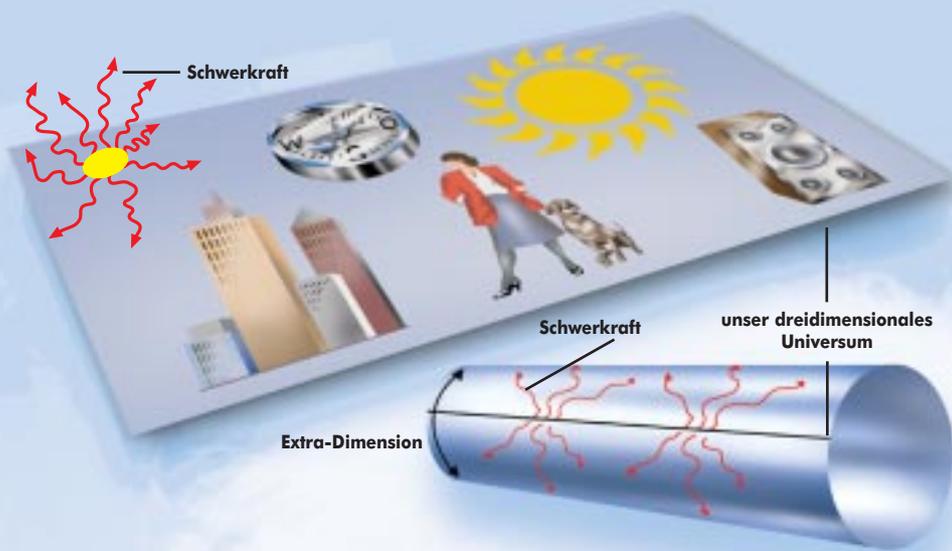
Führt man nun zusätzliche Dimensionen ein, die auf Abständen unterhalb von 0,2 Millimetern „aufgerollt“ sind, so ändert sich das Gravitationsgesetz bei diesen kurzen Abständen; bei den bisher experimentell überprüften Entfernungen oberhalb von 0,2 mm bleibt dagegen alles beim Alten. Ein Effekt dieser Änderung ist jedoch, dass die Schwerkraft bei immer kleineren Abständen, also mit wachsender Energie, viel schneller stark wird als bisher angenommen. Mit der richtigen Anzahl und Größe der Extra-Dimensionen könnte die „effektive“ Planck-Skala somit tatsächlich in den Bereich um 1000 GeV rücken. Damit würde zumindest ein Teil der String-Theorien, nämlich der höher dimensionale Rahmen, in dem sie sich bewegen, einer experimentellen Überprüfung an bestehenden oder geplanten Beschleunigern zugänglich.

neuen Idee auf.

Was wäre denn, wenn die Planck-Skala nicht bei  $10^{19}$  GeV, sondern effektiv schon im Bereich von 1000 GeV läge? Dieser Ansatz rückt die große Vereinheitlichung aller Naturkräfte und damit die „Theorie für Alles“ in die Reichweite der nächsten Beschleuniger wie dem LHC bei CERN in Genf und dem von DESY vorgeschlagenen TESLA-Beschleuniger. Die Idee ist



**Gibt es zusätzliche Raumdimensionen? Auch zu dieser Frage kann der Vergleich der HERA-Daten (rot) mit der Theorie (blaue Kurve für eine effektive Planck-Skala von 800 GeV) Entscheidendes beisteuern.**



**Unser Universum existiert möglicherweise auf einer Wand oder Membran, die in den Extra-Dimensionen liegt. Die Linie auf dem Zylindermantel (unten rechts) und die flache Ebene stellen unser dreidimensionales Universum dar, das alle bekannten Teilchen und Kräfte gefangen hält – mit Ausnahme der Gravitation: Die Schwerkraft (rote Linien) breitet sich in allen Dimensionen aus.**

Wenn diese zusätzlichen Dimensionen so groß sind, dann stellt sich die Frage, warum man sie bisher noch nicht gesehen hat. Die Antwort ist einfach und seltsam zugleich: Alle experimentell bisher untersuchten Teilchen sind weiterhin auf die üblichen drei Raumdimensionen beschränkt, ähnlich wie auf einer Wand oder Membran, die in die zusätzlichen Dimensionen eingebettet ist. Allein die Gravitonen – die hypothetischen Botenteilchen, welche die Schwerkraft übertragen – können sich frei in den Extra-Dimensionen bewegen. Die zusätzlichen Dimensionen machen sich also ausschließlich über die Gravitationskraft bemerkbar.

Damit könnte das Konzept der großen Extra-Dimensionen einige Rätsel der Teilchenphysik und der Kosmologie lösen; so zum Beispiel die Frage, woraus die „dunkle Materie“ besteht. Mehr als 90 Prozent der Masse des Universums ist unsichtbar und nicht aus Quarks und Elektronen aufgebaut, sie macht sich ausschließlich durch ihre Schwereanziehung bemerkbar. Womöglich hält sich diese Materie in Paralleluniversen auf, die von unserem durch zusätzliche Dimensionen getrennt sind. Solche Materie würde unser Universum nur durch die Schwerkraft beeinflussen,

deren Botenteilchen sich frei durch die Extra-Dimensionen bewegen können. Die Photonen, Gluonen und W- und Z-Teilchen dagegen, mit denen die Physiker experimentieren, wären unwiderruflich in unserem Universum gefangen und könnten die dunkle Materie deshalb nicht offenbaren.

Schon jetzt können die Teilchenbeschleuniger-Experimente solch großen Extra-Dimensionen auf indirekte Weise auf die Spur kommen – so auch H1 und ZEUS bei HERA. Wieder wird hier der Einfluss verschiedener Dimensionen auf die HERA-Daten theoretisch berechnet und anschließend mit den gemessenen Werten verglichen. Bisher zeigen sich in den Ergebnissen keine Anzeichen für zusätzliche Dimensionen über die uns vertrauten drei Raumdimensionen hinaus. Daraus können die HERA-Experimente bestimmen, dass die effektive Planck-Skala oberhalb von 800 GeV liegen muss; nach dem Umbau von HERA werden die Experimente in der Lage sein, das Terrain auf der Suche nach der effektiven Planck-Skala bis etwa 1200 GeV zu sondieren.

# HERA-B auf der Spur des Charmoniums

**Das Experiment HERA-B ist ein Spezialist. Gebaut, um eine ganz bestimmte Nadel im sprichwörtlichen Heuhaufen aufzuspüren: jenen „Goldenen Zerfall“ von B-Mesonen, der in 100 Milliarden Teilchenreaktionen von Protonen und Atomkernen nur ein einziges Mal auftritt und an dem sich die Ursache für das Ungleichgewicht von Materie und Antimaterie im Universum besonders gut studieren lässt. Das Wettrennen um die B-Mesonen hat die internationale HERA-B-Gruppe zwar gegen die so genannten B-Mesonen-Fabriken bei SLAC, USA, und KEK in Japan verloren – zu groß waren die Verzögerungen, die der gewaltige, für das Experiment notwendige Vorstoß in technologisches Neuland mit sich gebracht hat. Doch haben sich andere Wege aufgetan, die die spezifischen Stärken des Detektors nutzen und dem Spezialisten aus der HERA-Halle West neue Einsatzmöglichkeiten bieten.**

**D**as Proton rast mit beinahe Lichtgeschwindigkeit durch das Strahlrohr. Eine lang gezogene Linkskurve, dann die Zielgerade, noch 20 Meter bis zum Target von HERA-B – Treffer! Für das Proton sind die haarfeinen Drähte, die ihm die Physiker von HERA-B in den Weg stellen, allerdings fast durchsichtig: Zwischen den Atomkernen im Metall befindet sich hauptsächlich – nichts. Fast ungestört braust das Teilchen

durch den Draht hindurch. Doch dann kommt es zum Aufprall. Frontal fliegt das Proton auf einen Atomkern zu und trifft mit voller Wucht einen von dessen Bausteinen. Beide bersten auseinander, in einem Feuerwerk aus Quarks und Gluonen. Die Materiebausteine mischen sich neu – es entstehen neue Teilchen, die, vom Elan des einfliegenden Protons mitgerissen, aus dem Draht hervorbrechen, um ihren Weg in den Komponenten des Detektors zu beenden.

Bei den Zusammenstößen der Protonen aus dem Beschleuniger mit den Drähten des HERA-B-Targets haben es die Physiker auf eine besondere Spezies abgesehen: die Gattung der Charmonium-Teilchen, die aus einem *charm*-Quark und einem *charm*-Antiquark bestehen. Diese Teilchen werden beim Aufprall des Protons im Inneren des getroffenen Atomkerns gebildet. Bevor sie den Atomkern verlassen und ihren Weg in die Detektor-komponenten fortsetzen, müssen sie also ein Stück durch den Kern hindurchfliegen. Dabei werden sie in ihrem Fortkommen durch die Bausteine des Kerns – die Protonen und Neutronen, die ihrerseits wieder aus Quarks und Gluonen aufgebaut sind – gehindert. Nun gibt es von den Charmonium-Teilchen verschiedene Versionen, die unterschiedlich lose gebunden sind: Am engsten hängen *charm*-Quark und -Antiquark in den so genannten  $J/\psi$ -Teilchen (sprich

„ $J/\psi$ “) zusammen, die ihren unromantischen Doppelnamen ihrer Entdeckung durch zwei unabhängige Forschergruppen verdanken. Loser gebunden sind zum Beispiel das  $\psi'$  (sprich „Psi-Strich“) oder das  $\chi_c$  („Chi-C“) – im Fachjargon heißt es, die Teilchen besitzen unterschiedliche Bindungsenergien. Je loser die Charmonium-Teilchen gebunden sind, desto leichter „zerbrechen“ sie, wenn sie auf ihrem Weg durch den Atomkern mit der Kernmaterie wechselwirken. Und je größer der Atomkern – je länger also der Weg, den die Teilchen im Kern zurücklegen müssen –, desto höher ist auch die Wahrscheinlichkeit, dass die Charmonium-Teilchen nicht unbehelligt wieder aus dem Kern herauskommen. Je nach Größe des Kerns finden also unterschiedlich viele Charmonium-Teilchen ihren Weg aus dem Atomkern heraus – ein Phänomen, das die Physiker als „Charmonium-Unterdrückung“ bezeichnen.

Bei HERA-B können gleich vier Target-Drähte aus verschiedenen Materialien auf einmal in den Protonenstrahl von HERA gebracht werden. Damit lässt sich die Erzeugung von Charmonium-Teilchen gleichzeitig an unterschiedlich schweren Atomkernen studieren, was Ergebnisse mit deutlich kleineren Messfehlern garantiert, als wenn man die Messungen nacheinander durchführt. Da die B-Mesonen, für deren Untersuchung



**5 Meter hoch und 6 Meter breit: das elektromagnetische Kalorimeter von HERA-B, in dem die Teilchen gestoppt und nachgewiesen werden.**

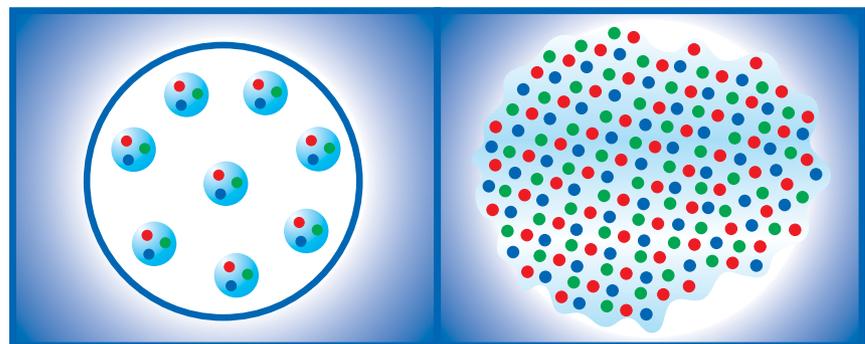
Forscher bei CERN in der Schweiz und beim *Brookhaven National Laboratory* in den USA, durch den Zusammenprall von hochbeschleunigten, schweren Atomkernen die für ein Quark-Gluon-Plasma notwendigen Energiedichten zu erzeugen. Der Nachweis, ob tatsächlich ein Quark-Gluon-Plasma produziert wurde, ist allerdings nur indirekt möglich – ein Weg ist genau jene Charmonium-Unterdrückung, deren Details HERA-B unter die Lupe nimmt. Denn die Rate, mit der die  $J/\psi$ -Teilchen in Teilchenkollisionen gebildet werden, wird durch ein Quark-Gluon-Plasma ebenfalls merklich herabgesetzt: Bevor die *charm*-Quarks und -Antiquarks ein  $J/\psi$  bilden, wechselwirken sie mit den Quarks des Plasmas und stehen da-

HERA-B ursprünglich gebaut wurde, ebenfalls in  $J/\psi$ -Teilchen zerfallen, ist der Detektor – trotz oder vielmehr aufgrund seiner speziellen Ausrichtung auf ebendiese Teilchen – besonders gut zum Studium des Charmoniums geeignet. Das Phänomen der Charmonium-Unterdrückung sollte überwiegend bei jenen Teilchen auftreten, die im Atomkern besonders langsam laufen, da sich diese am längsten im Kern aufhalten. Erkennen kann man diese Teilchen daran, dass sie einen kleinen Vorwärtsimpuls besitzen und deshalb relativ zum Protonenstrahl unter großen Winkeln in den Detektor hineingestreut werden. Frühere Experimente bei CERN in Genf und Fermilab in Chicago mussten sich bei der Untersuchung des Charmoniums auf kleine Winkel beschränken.

HERA-B dagegen deckt auch den bisher unzugänglichen Bereich großer Streuwinkel ab – also gerade jenen Bereich, in dem sich die verschiedenen theoretischen Modelle für die Produktion und Absorption von Charmonium-Teilchen besonders gut testen lassen.

Die Wechselwirkung des Charmoniums mit der Materie des Kerns, in dem es entsteht, gibt Aufschluss über eine Reihe von offenen Fragen in der Kernphysik. Doch auch für die Teil-

chenphysiker und die Kosmologen sind diese Ergebnisse von großem Interesse: Seit geraumer Zeit suchen Experimente weltweit nach dem so genannten Quark-Gluon-Plasma, der „Ursuppe“ des Universums. Theoretischen Überlegungen zufolge existierten die Quarks und Gluonen wenige millionstel Sekunden nach dem Ur-



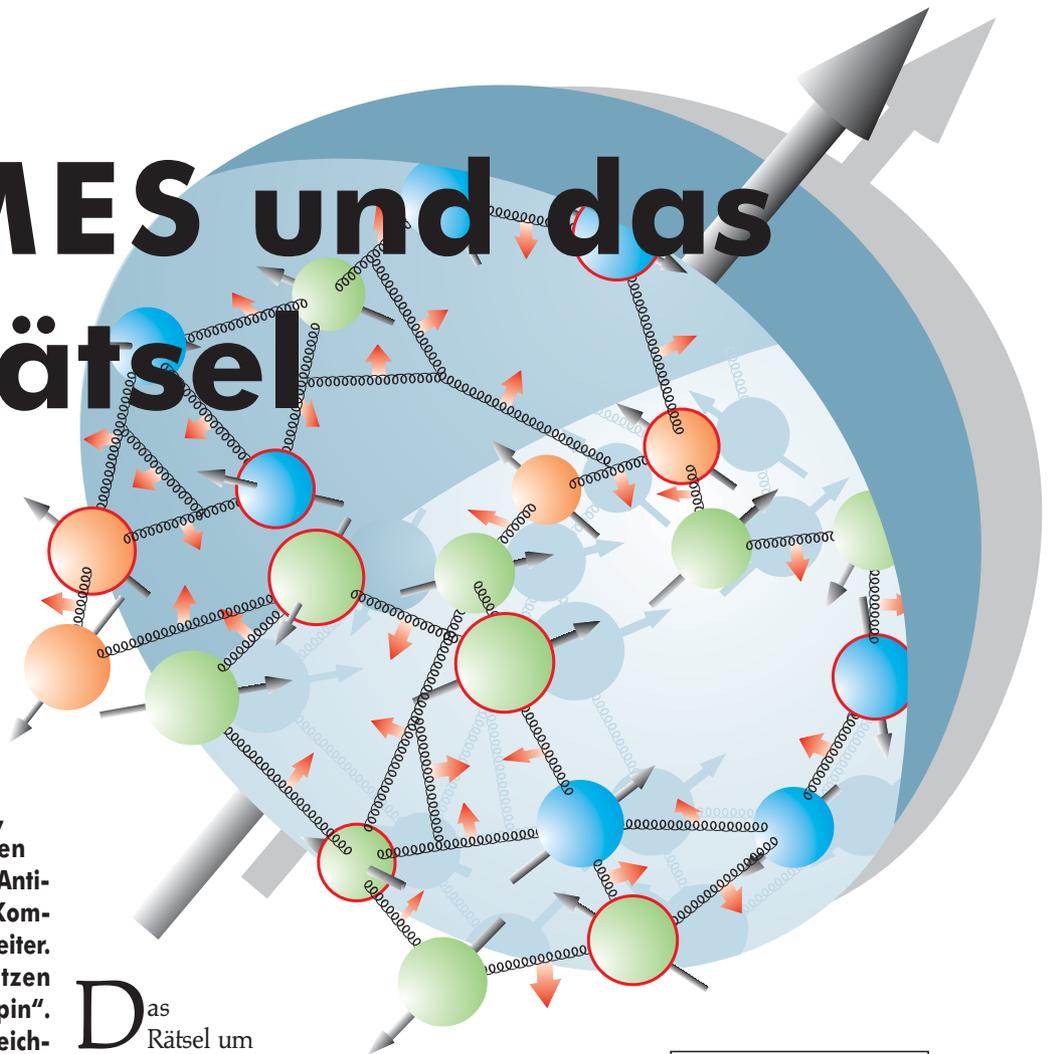
**Die „Ursuppe“ des Universums: Im Atomkern sind die Quarks innerhalb der Protonen und Neutronen „gefangen“ (li.). In einem Quark-Gluon-Plasma dagegen treten Quarks und Gluonen als freie Teilchen auf (re.).**

knall als freie Teilchen, bevor sie im Zuge der Abkühlung des Universums zu „normaler“ Materie kondensierten. Ein solches Plasma aus freien Quarks und Gluonen könnte heutzutage noch in extrem dichten Neutronensternen vorkommen. Im Labor versuchen die

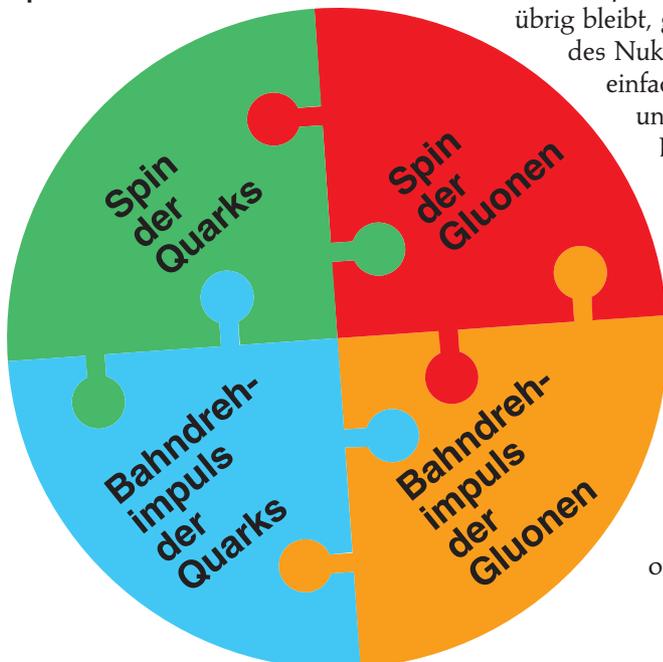
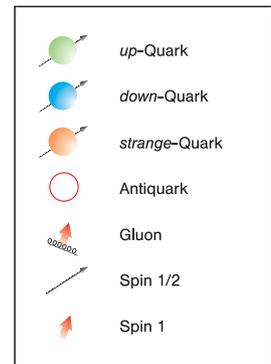
mit für die Teilchenbildung nicht mehr zur Verfügung. Das Prinzip der Charmonium-Unterdrückung in herkömmlicher Kernmaterie genau zu verstehen, ist die Voraussetzung für die physikalische Interpretation der Experimente zum Quark-Gluon-Plasma.

# HERMES und das Spinrätsel

Je genauer man in das Proton hineinblickt, so ver-raten die Messungen der HERA-Experimente H1 und ZEUS, desto mehr Teilchen scheint es zu enthalten: Die drei Valenzquarks, die dem Proton seine Identität verleihen, schwimmen in einem ganzen „See“ aus kurzlebigen Quarks, Anti-quarks und Gluonen. Doch die Kom-plexität geht noch einen Schritt weiter. Denn all diese Teilchen besitzen einen Eigendrehimpuls, den „Spin“. Und alle bewegen sie sich – vergleich-bar mit einem Karussell auf dem Jahr-markt, bei dem sich die Mitfahrer zusätzlich wahllos auf ihren Sesseln drehen. Dennoch fügt sich diese bro-delnde, wirbelnde „Suppe“ zu einem Gebilde zusammen, das ebenfalls einen klar definierten Spin trägt. Wie kommt dieser Spin des Protons zu-stande? Dies herauszufinden, ist Forschungsschwerpunkt des HERA-Experiments HERMES.



Das Rätsel um den Spin der Nucleonen – also der Protonen und Neutronen – beschäftigt die Teilchenphysiker schon geraume Zeit. In den einfachsten Modellen ging man Mitte der 1960er Jahre zunächst davon aus, dass der Spin des Nucleons aus denen der drei Valenzquarks entsteht: Zwei Quarks „drehen“ sich in eine Richtung, das andere entgegengesetzt, so dass sich zwei der Spins aufheben. Was übrig bleibt, gibt den Spin

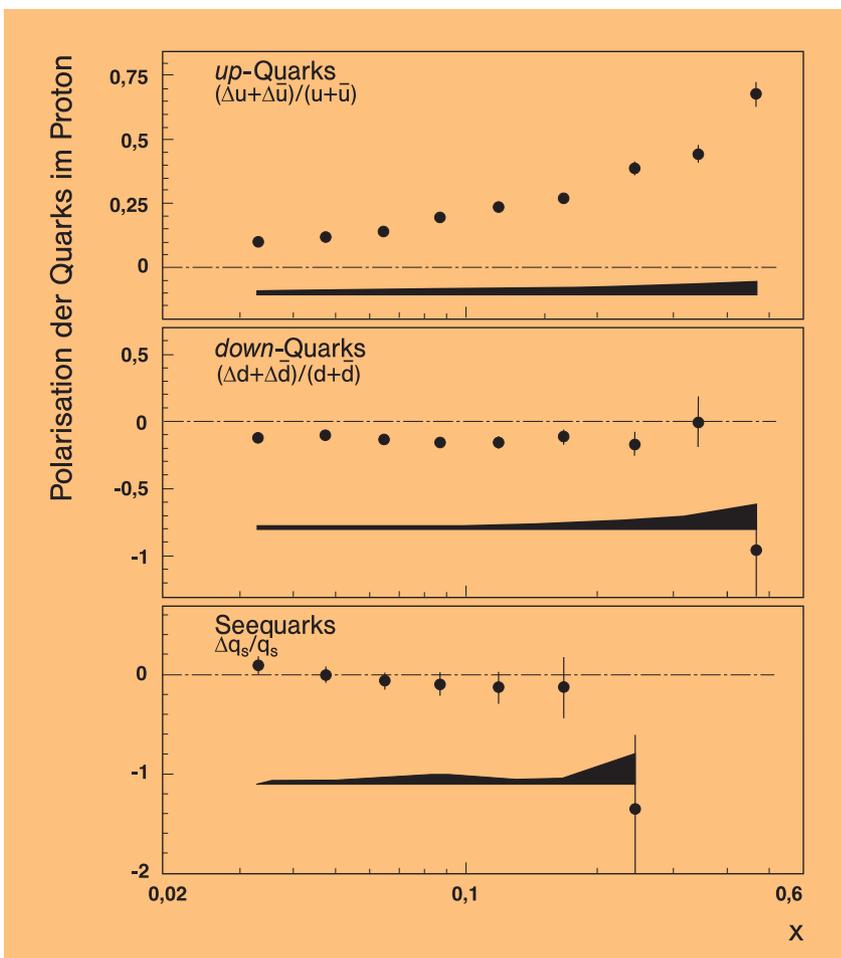
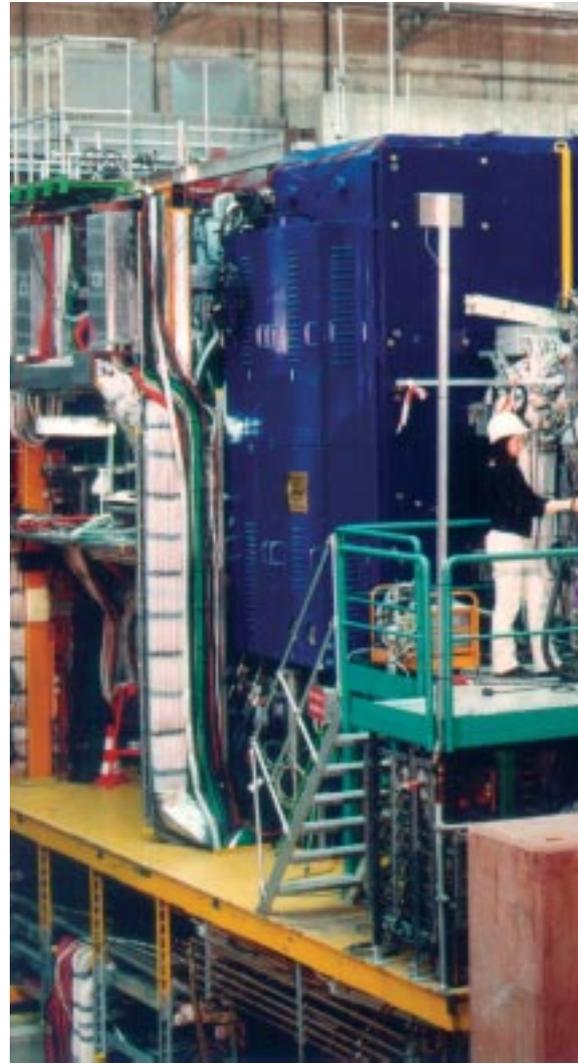


des Nucleons vor – eine einfache, elegante und befriedigende Erklärung, die kaum in Frage gestellt wurde. Seit Ende der 1980er Jahre hat sich jedoch herausgestellt, dass die Quarks zusammenge-nommen weniger als ein Drittel des Nucle-onen spins liefern.

Diese Erkenntnis kam so überraschend, dass man zunächst von einer wahren „Spinkrise“ sprach. Inzwischen ist klar, dass nicht nur die Valenzquarks ihren Beitrag zum Spin des Nucleons leisten. Auch die Spins der Seequarks und der Gluonen sowie die Bahndrehimpulse, die durch die Bewegung der Teilchen entstehen, steuern ihren Teil bei. Herauszufinden, wie genau dies geschieht, ist jedoch alles andere als einfach. Da HERMES im Gegensatz zu älteren Experimenten die Beiträge der verschiedenen Quarktypen getrennt bestimmt, konnte das HERA-Experiment hierzu in den letzten Jahren entscheidende Beiträge erbringen.

Bei HERMES trifft der polarisierte Elektronenstrahl von HERA auf ein Gas, dessen Atomkerne ebenfalls polarisiert wurden – z.B. Wasserstoff, dessen Kern aus einem Proton besteht, oder Deuterium mit einem

Kern aus einem Proton und einem Neutron. Über den Austausch eines Photons, das die Polarisation der Elektronen zum Teil übernimmt, streuen die Elektronen an einem Quark im Inneren der Protonen oder Neutro-



**Präzise vermessen: die Polarisation der *up*- und *down*-Quarks sowie der Seequarks im Proton. Die Spins der *up*-Quarks zeigen bevorzugt in Richtung des Protonenspins, die *down*-Quarks entgegengesetzt. Die Seequarks tragen kaum zum Spin des Protons bei. (Die schwarzen Bänder geben die systematischen Fehler der Messung an.)**

nen in den Atomkernen. Sie treten dabei allerdings nur mit Quarks der entgegengesetzten Spinrichtung in Wechselwirkung. Diese werden aus dem Nukleon herausgeschlagen und bilden neue Teilchen, die wie das gestreute Elektron in den Detektorkomponenten des Experiments nachgewiesen werden. Je nachdem, wie man die Polarisationsrichtung der Elektronen und Gasatome relativ zueinander einstellt, treten die Streueignisse unterschiedlich häufig auf; aus dieser gemessenen Asymmetrie lässt sich schließlich der Beitrag aller Quarks im Nukleon zum Gesamtspin bestimmen. Dadurch, dass HERMES nicht nur das gestreute Elektron, sondern auch die vom gestreuten Quark stammenden Teilchen nachweist und identifiziert, können die Beiträge der verschiedenen Quarksorten zum Nukleonenspin einzeln aufgeschlüsselt werden.

So konnte HERMES die Polarisation der *up*- und *down*-Quarks sowie der Seequarks im Proton mit hoher Genauigkeit bestimmen. Es zeigt



**Der HERMES-Detektor in der HERA-Halle Ost: im Vordergrund der Bereich des Gas-Targets, dahinter der große Spektrometer-Magnet (blau).**

Elektronen die starke Kraft nicht fühlen und somit die Gluonen – im Gegensatz zu den elektrisch geladenen Quarks – nicht direkt „sehen“ können. Zwar ist es möglich, die Polarisation der Gluonen indirekt aus der polarisierten Strukturfunktion des Nukleons herauszurechnen, die Spanne der weltweiten Daten reicht für eine präzise Bestimmung bisher jedoch nicht aus. So griff man bei HERMES zu einer direkten, wenn auch nahezu ebenso kniffligen Methode, dem Prozess der „Photon-Gluon-Fusion“. Hierbei wechselwirkt das von dem Elektron ausgesandte Photon über ein Quark-Antiquark-Paar mit dem Gluon. Die gemessene Asymmetrie der Streuprozesse deutet auf eine positive Gluonpolarisation hin: Die Spins der Gluonen scheinen in Richtung des Nukleonenspins zu zeigen und damit zumindest einen Teil des fehlenden Spins beizutragen. Dieser experimentelle Hinweis liefert einen ersten Anhaltspunkt für die Überprüfung der verschiedenen theoretischen Modelle zum Nukleonenspin, die sich selbst über das Vorzeichen der Gluonpolarisation nicht einig sind.

Der Bahndrehimpuls der Teilchen im Nukleon entzog sich bislang jeder experimentellen Überprüfung. Neueste theoretische Überlegungen scheinen jedoch einen Weg aufzuzeigen, wie man den Beitrag dieser Bahndrehimpulse zum Gesamtsin des Nukleons tatsächlich experimentell bestimmen könnte. Bislang ist das Ganze noch Zukunftsmusik – doch die HERMES-Physiker sind sich sicher, dass sie an der vordersten Front dabei sein werden, sollte sich dieser neue Weg als gangbar erweisen.

sich, dass die Spins der *up*-Quarks bevorzugt in die gleiche Richtung weisen wie der Gesamtsin des Protons, während sich die *down*-Quarks bevorzugt entgegengesetzt ausrichten. Die Seequarks tragen im Mittel offenbar nur einen geringen Anteil zum Protonensin bei – bei den bisher analysierten Daten ist der Messwert sogar noch mit Null verträglich. Mit der Auswertung der sehr erfolgreichen Messperiode 2000 werden die HERMES-Physiker den Beitrag der Spins der Seequarks voraussichtlich noch erheblich genauer bestimmen können.

### Nukleon:

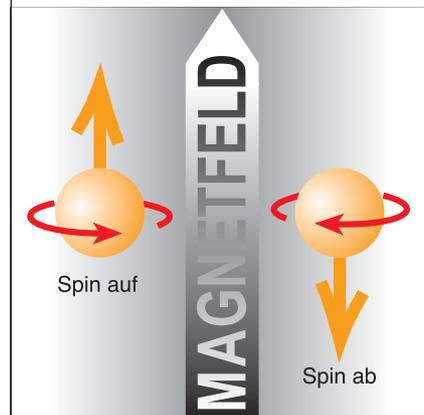
Oberbegriff für Protonen und Neutronen, die aus drei Quarks zusammengesetzten Bausteine des Atomkerns

HERMES konnte weltweit den ersten direkten Hinweis auf den Beitrag der Gluonen zum Spin des Nukleons geben. Diese Untersuchung ist äußerst schwierig, da die einfliegenden

### Spin:

der innere Drehimpuls der Teilchen. Anschaulich kann man sich den Spin am ehesten wie die Drehbewegung eines Kreisels vorstellen – das Bild hat jedoch seine Grenzen, da Teilchen wie Elektronen, Quarks und Gluonen nach heutigem Verständnis punktförmig sind und sich deshalb nicht wirklich um ihre Achse drehen können. Das mit dem Spin verbundene magnetische Moment bewirkt, dass sich die Teilchen in einem Magnetfeld wie kleine Magnete verhalten und sich den Feldlinien entsprechend ausrichten.

Der Wert des Nukleonenspins beträgt in Einheiten des elementaren Drehimpulses  $1/2$  – man spricht deshalb von Spin- $1/2$ -Teilchen. Die Quarks und Elektronen, aus denen sich die Materie aufbaut, sind ebenfalls Spin- $1/2$ -Teilchen. Anders ist es mit den Botenteilchen wie dem Photon und den Gluonen: Ihr Spin hat den Wert 1.





# Blick in den Atomkern

**Hauptaugenmerk von HERMES ist und bleibt der Spin des Nukleons. Doch schon in den ersten Betriebsjahren wurde klar, wie vielseitig sich dieses HERA-Experiment auch darüber hinaus einsetzen lässt. Insbesondere kann die Speicherzelle, durch die der polarisierte Elektronenstrahl von HERA hindurchfliegt, mit einer ganzen Reihe von unpolarisierten Gasen relativ hoher Dichte gefüllt werden. Damit lassen sich bei hoher Ereignisrate unter anderem zahlreiche Untersuchungen zur Struktur von Kernmaterie durchführen.**

Im Zentrum einer dieser Studien steht zum Beispiel die Frage, wie Teilchen, die aus Quarks bestehen – die so genannten Hadronen –, genau gebildet werden. Unterscheidet sich der Erzeugungsprozess, je nachdem, ob die Teilchen in einem einzelnen, freien Proton entstehen oder vielmehr in einem Nukleon, das als Kernbaustein in einem Atomkern „eingebaut“ ist? Um diesen Erzeugungsprozess zu untersuchen, messen die Physiker die Anzahl der Teilchen einer

bestimmten Energie, die sich nach der Kollision im Detektor wiederfinden: Wenn das Elektron mit einem Quark im Inneren eines Atomkerns zusammenstößt, so bewegt sich das getroffene Quark zunächst durch den Kern und bildet nach einer kurzen Wegstrecke ein Hadron. Bei kleinen Kernen wie dem Proton geschieht dies praktisch schon außerhalb des Kerns, bei schwereren Atomkernen dagegen entsteht das Hadron im Inneren, so dass es auf seinem Weg aus dem Kern heraus auf weitere Kernbausteine stößt. Bei jeder dieser „Begegnungen“ im Atomkern verliert das Teilchen Energie. Misst man nun die Anzahl der Teilchen einer bestimmten Energie, so sollte sich die Bildung der Hadronen im Kern direkt verfolgen lassen.

Der Atomkern stellt damit gewissermaßen eine Art „Minilabor“ dar, in dem sich die Wechselwirkung von Hadronen mit den Kernbausteinen untersuchen lässt. Von besonderem Interesse ist dabei die Bildungsdauer der Hadronen, also die Zeit, die notwendig ist, um ein solches aus Quarks

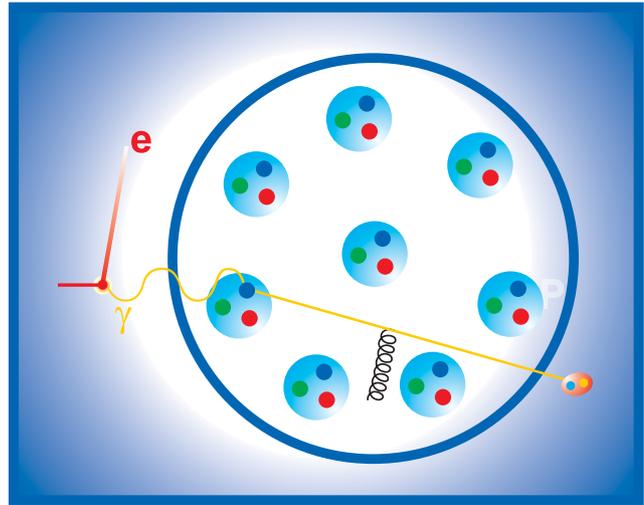
und Gluonen zusammengesetztes Teilchen in physikalischen Reaktionen bei hohen Energien zu erzeugen. Erkenntnisse über diese Bildungsdauer sind insbesondere für jene Experimente wichtig, bei denen sehr schwere Kerne – wie z.B. Blei oder Gold – aufeinander gelenkt werden, um dem „Quark-Gluon-Plasma“ auf die Spur zu kommen: jener „Ursuppe“, aus dem unser Universum wenige millionstel Sekunden nach dem Urknall bestand. Für die Interpretation dieser Experimente sind die präzisen Messungen von HERMES von großer Bedeutung.

Wird das Hadron in einem Atomkern erzeugt, so kann es auf seinem Weg aus dem Kern heraus mit dessen

## Hadron, Nukleon:

Hadron: Oberbegriff für Teilchen, die aus Quarks zusammengesetzt sind;  
Nukleon: Oberbegriff für Protonen und Neutronen, die aus drei Quarks zusammengesetzten Bausteine des Atomkerns

**Das Photon schlägt ein Quark aus einem Nukleon. Das Quark fliegt durch den Atomkern, verliert womöglich Energie und verlässt den Kern als Hadron. Dieser Prozess gibt Aufschluss über die Bildung von Hadronen.**



Bausteinen wechselwirken und dabei Energie verlieren – und das umso öfter, je schwerer und größer der Atomkern ist. Die Anzahl der Hadronen, die man im Detektor beobachtet, sollte bei schweren Kernen also kleiner sein als bei einzelnen Protonen. Diese Verminderung sollte zudem umso stärker sein, je früher das Hadron gebildet wird, da die Wahrscheinlichkeit für einen Zusammenstoß mit den Kernbausteinen auf dem längeren Weg durch den Kern steigt. Genauso zeigen es die HERMES-Daten. Unerwartet kommt jedoch die Erkenntnis, dass die Bildungsdauer der Hadronen offensichtlich von deren Geschwindigkeit abhängt: So belegen die Messungen von HERMES, dass schnelle Hadronen eine kurze Bildungsdauer haben und deshalb verhältnismäßig stark abgeschwächt werden. Diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zu älteren theoretischen Modellen zur Beschreibung des Erzeugungsprozesses von Hadronen.

Die HERMES-Daten zeigen außerdem, dass positiv geladene Hadronen sehr viel weniger abgeschwächt werden als negativ geladene, also deutlich weniger oft an Kernbausteinen streuen. Daraus lässt sich schließen, dass positiv geladene Hadronen – im Durchschnitt – später gebildet

werden als negativ geladene. Da die Bildungsdauer für positiv und negativ geladene Teilchen, die aus einem *up*- und einem *down*-Quark bestehen – so genannte Pionen –, ähnlich ist, muss dieses unerwartete Ergebnis auf einen größeren Beitrag der Protonen unter den positiv geladenen Hadronen zurückzuführen sein: Die Protonen haben vermutlich eine sehr

viel größere Bildungsdauer als die Pionen. Ob diese Annahme stimmt, wird die HERMES-Gruppe nach Analyse der mit Hilfe des „RICH-Detektors“ gewonnenen Daten feststellen können. Diese im Jahr 1998 eingebaute Komponente des HERMES-Experiments erlaubt es, Teilchen wie Pionen und Protonen direkt voneinander zu unterscheiden.



**Das international zusammengesetzte HERMES-Team vor dem Detektor.**

# Ideen für die Zukunft

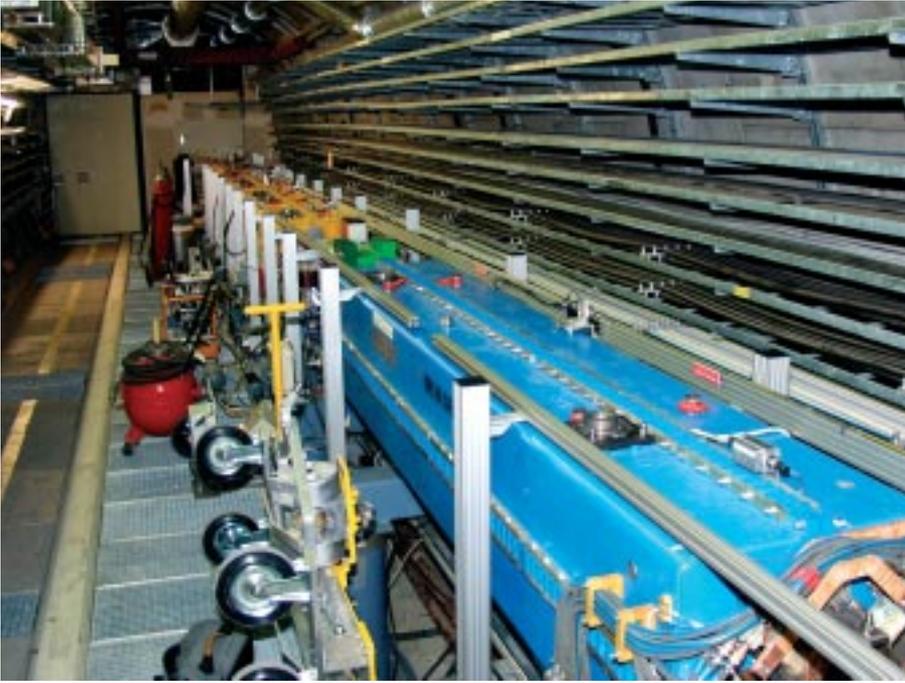
Mit dem Umbau zur Luminositäts-erhöhung eröffnen sich für HERA neue Forschungsmöglichkeiten, die für die nächsten Jahre spannende Aussichten versprechen – speziell, was die Präzisionsmessung der starken Kopplungskonstanten, die genaue Untersuchung der Diffraktion, das Studium der elektroschwachen Wechselwirkung und die Suche nach Kräften und Effekten jenseits des Standard-Modells der Teilchenphysik betrifft. Diese Untersuchungen werden das aktuelle Physikprogramm von HERA abschließen. Die längerfristige Zukunft der Anlage hängt eng mit der Realisierung des TESLA-Projekts zusammen, das in internationaler Zusammenarbeit bei DESY in Hamburg entwickelt und geplant wird.

TESLA steht für *TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator*, also supraleitender linearer Beschleuniger für Tera-Elektronenvolt-Energien. Das Besondere an der 33 Kilometer langen Anlage: Neuartige supraleitende Beschleuniger ermöglichen Kollisionen von Elektronen und Positronen höchster Energie und dienen als Quelle für intensives Röntgenlicht mit Lasereigenschaften. Damit eröffnet TESLA sowohl für die

Grundlagenforschung als auch für anwendungsnahe Forschungen in verschiedenen Naturwissenschaften neue Perspektiven. Eine Entscheidung zu dem Projekt wird ab 2003 erwartet.

In Verbindung mit dem geplanten TESLA-Linearbeschleuniger bietet sich die Möglichkeit, Elektronen aus TESLA auf Protonen aus HERA prallen zu lassen. Die dabei erreichbare Kollisionsenergie könnte bis zu fünfmal so hoch sein wie bei der jetzigen





HERA-Anlage. Diese Kombination beider Beschleuniger – die in der Fachwelt unter dem Kürzel „THERA“ firmiert – würde es erlauben, das Physikprogramm von HERA bis weit in bisher unerreichbare kinematische Bereiche hinein auszudehnen. Das Forschungsprogramm von HERMES ließe sich dadurch fortsetzen, dass man die Elektronen von TESLA auf ein festes Target lenkt – eine unter dem Namen „TESLA-N“ bekannte Option. Ein Teil des linearen Elektronenbeschleunigers von TESLA könnte auch als leistungsfähiger Teilchenbeschleuniger für den HERA-Elektronenring eingesetzt werden. Damit ließe sich ein so genanntes *Stretcher-*

*Ring-Konzept* verwirklichen: eine Anlage, die einen nahezu kontinuierlichen Elektronenstrahl liefert, wie man ihn für Strahl-Target-Experimente in der Kernphysik benötigt. Durch diese Verbindung von TESLA und HERA könnte ein Teilchenstrahl mit außergewöhnlichen Eigenschaften erzeugt werden, wie sie keine der bisher auf diesem Gebiet existierenden oder geplanten Anlagen erreicht. Damit könnte in Hamburg ein europäisches Zentrum für Grundlagenforschung entstehen, in dem die Forscher insbesondere den Grenzbereich zwischen Teilchen- und Kernphysik unter die Lupe nehmen könnten – eines der interessantesten wissenschaftlichen Gebiete, das die moderne Kernphysik derzeit zu bieten hat.



## DESYs Forschungsdirektor Robert Klanner zieht Bilanz

Zehn Jahre Betrieb von HERA – das sind zehn Jahre internationale Zusammenarbeit von Forschergruppen aus 25 Ländern mit dem gemeinsamen Ziel, den Geheimnissen der fundamentalen Teilchen und Kräfte auf die Spur zu kommen. Die zahlreichen Ergebnisse und neuen Erkenntnisse, von denen einige in dieser Broschüre vorgestellt werden, verdanken wir dem unermüdlichen Einsatz, dem Ideenreichtum und der fachlichen Kompetenz zahlloser Techniker, Ingenieure und Physiker in ihren Heimatinstitutionen und bei DESY. Ebenso wichtig ist dabei allerdings der Geist der internationalen Zusammenarbeit und das gemeinsame Ziel, die Geheimnisse der Natur weiter zu lüften. Einen besonderen Anteil an diesem Erfolg tragen die 200 Diplomanden und 600 Doktoranden, die mit HERA ihren eigenen Weg in die Welt der Forschung gefunden haben.

Seit Sommer 2001 ist der Umbau von HERA und den Experimenten abgeschlossen – ein ehrgeiziges Projekt mit vielen Risiken, das erneut den vollen Einsatz aller Mitarbeiter forderte. Welche neuen Erkenntnisse werden wir mit HERA-II, dem bis zur Inbetriebnahme des LHC-Beschleunigers bei CERN im Jahr 2007 einzigen laufenden Hochenergiebeschleuniger Europas, gewinnen können? Einige – wie z.B. Präzisionsmessungen zu den Eigenschaften der starken Kraft, Neues zur Struktur des Protons oder zum Verhalten der elektroschwachen Kraft bei kleinsten Abständen – können wir klar voraussehen. Wir hoffen, mit HERA-II zu neuen Dimensionen, Kräften oder Teilchen jenseits des Standard-Modells der Teilchenphysik vorzudringen. Sicher ist auf jeden Fall, dass die HERA-Ergebnisse auch weiterhin einen entscheidenden Teil zu unserem Weltbild beitragen werden.

*Robert Klanner*

Prof. Dr. Robert Klanner  
DESY-Forschungsdirektor

Hamburg, im Oktober 2002

Die Wissenschaftler der Zukunft:  
DESYs Sommerstudenten.



# Anziehungspunkt für

An den DESY-Forschungen beteiligen sich heute 3400 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 35 Nationen. Mit dabei sind über 1000 junge Menschen – etwa die Hälfte von ihnen aus dem Ausland –, die das vielfältige Angebot an Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten zu DESY lockt. Das beginnt beim „Schnuppern“ als Praktikant oder Exkursionsteilnehmer, erstreckt sich über das erste Mitmachen als Sommerstudent, über vielseitige Themen für Diplomarbeiten und Dissertationen bis hin zur eigenständigen Forschung als Post-Doktorand. Wer Eigeninitiative, Begeisterung und Verantwortungsbewusstsein mitbringt, hat das richtige Rüstzeug für die Mitarbeit in den international zusammengesetzten DESY-Gruppen – und genießt bei DESY eine erstklassige Schulung für den Start ins Berufsleben.

Nachwuchswissenschaftler  
an einem Messplatz  
im HASYLAB.

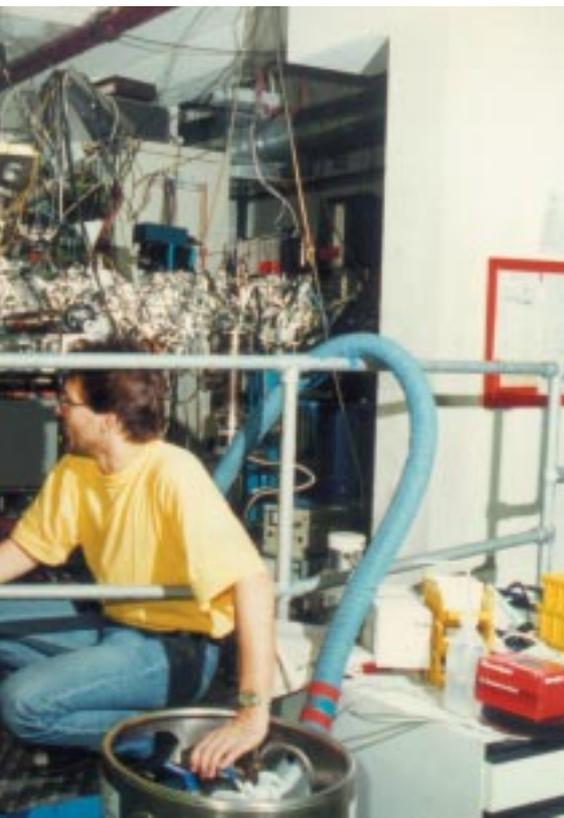
Gerade in Zeiten, in denen der Ruf nach einer schnellen Nutzbarmachung von Forschungsergebnissen immer lauter wird, in denen Arbeitsplätze knapp und vorwiegend anwendungsorientiert sind und in denen die Arbeitswelt sich zunehmend global orientiert, zeigt sich der Wert einer Aus- und Weiterbildung in einem internationalen Zentrum der Grundlagenforschung wie DESY. Denn hier geht es nicht nur darum, sein Fachwissen zu vertiefen.



Schüler der gymnasialen Oberstufe  
bei einer DESY-Besichtigung.



# 1000 junge Menschen

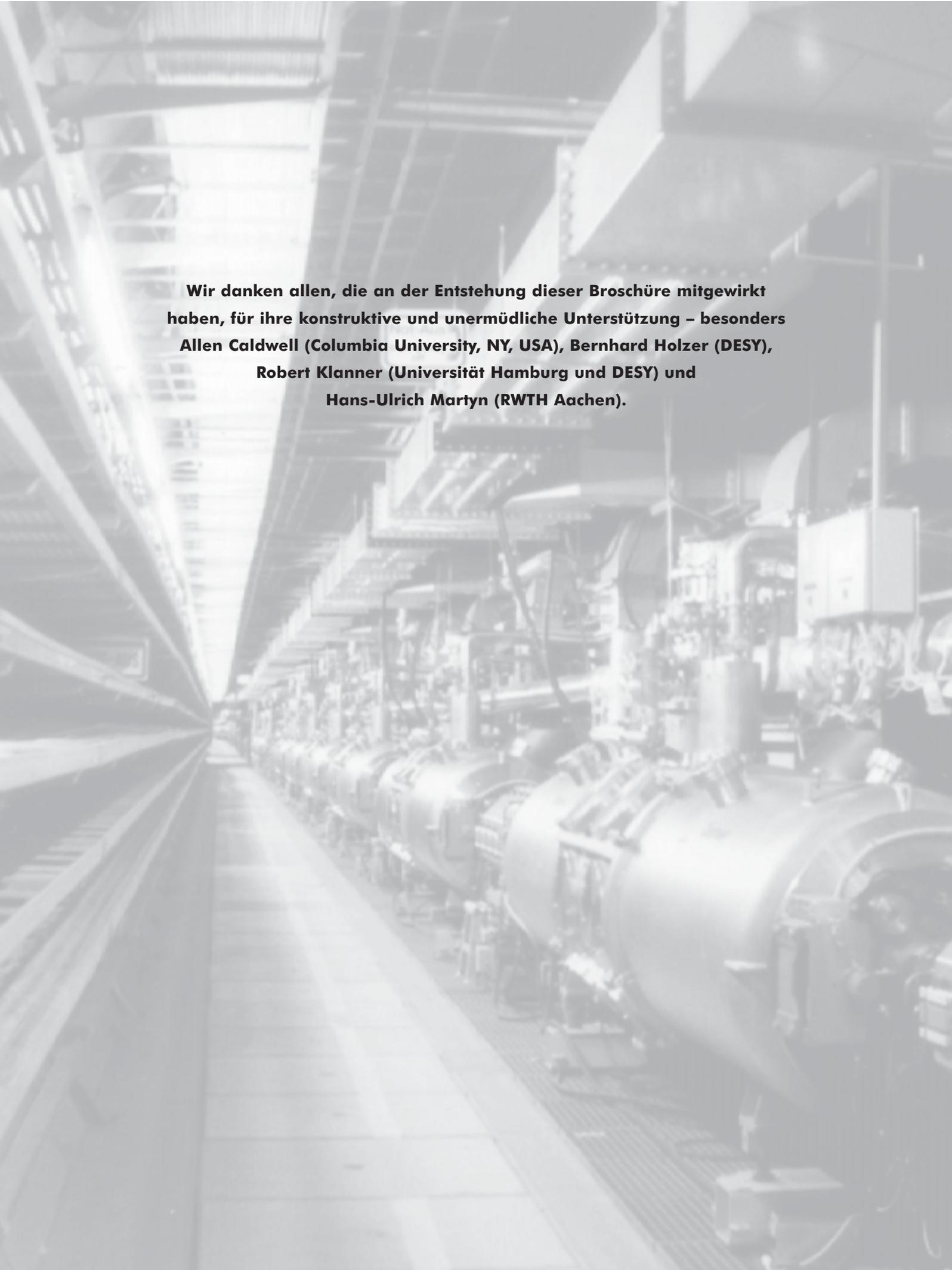


Die Mitarbeit in den DESY-Gruppen bietet eine hervorragende Gelegenheit, sich jene „Softskills“ anzueignen, die in der Arbeitswelt inzwischen unentbehrlich sind. Dazu gehören:

- das eigenverantwortliche Arbeiten in internationalen Teams
- das zeit- und budgetorientierte Projektmanagement
- die Durchsetzungsfähigkeit beim „Verteidigen“ der eigenen Arbeit
- das schnelle Umdenken und Konzentrieren auf neue Fragestellungen.

Sowohl in der Teilchenphysik als auch in der Forschung mit Synchrotronstrahlung erwarten die Diplomanden, Doktoranden und Nachwuchswissenschaftler konkrete Einzelaufgaben, die sie selbstständig lösen und deren Ergebnisse in das komplexe Forschungsthema mit einfließen. In einem von

internationaler Zusammenarbeit geprägten Klima lernen die jungen Menschen, ihre eigene Arbeit innerhalb eines Teams zu koordinieren und zu vertreten. Ausgerüstet mit einem hohen Qualitätsbewusstsein und der Fähigkeit, für scheinbar unlösbare Probleme Lösungen zu finden, sind die jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bestens darauf vorbereitet, auch in der Industrie Verantwortung zu übernehmen. Häufig landen sie dabei auch in ganz „unphysikalischen“ Branchen. So sind heute zahlreiche DESY-Absolventen zum Beispiel als Unternehmensberater, in Banken, in der Entwicklung komplexer Softwaresysteme oder in der Prozessleittechnik tätig.



**Wir danken allen, die an der Entstehung dieser Broschüre mitgewirkt haben, für ihre konstruktive und unermüdliche Unterstützung – besonders Allen Caldwell (Columbia University, NY, USA), Bernhard Holzer (DESY), Robert Klanner (Universität Hamburg und DESY) und Hans-Ulrich Martyn (RWTH Aachen).**

# Impressum

## Herausgeber:

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY in der Helmholtz-Gemeinschaft  
Notkestraße 85 · D-22607 Hamburg

Tel.: 040/8998-0, Fax: 040/8998-3282

[desyinfo@desy.de](mailto:desyinfo@desy.de)

<http://www.desy.de>

DESYs KworkQuark – Teilchenphysik für alle! <http://kworkquark.desy.de>

## Autoren:

Ilka Flegel, Textlabor, Jena  
Paul Söding, Zeuthen (Seite 46)

## Realisation und Redaktion:

Ilka Flegel, Textlabor, Jena  
Robert Klanner, DESY (verantwortlich)

## Gestaltung:

Britta Liebaug, DESY

## Grafiken:

Bohm und Nonnen, Büro für Gestaltung GmbH, Darmstadt  
CERN  
DESY  
Dirk Günther, Hamburg  
H1-Kollaboration  
HERMES-Kollaboration  
Britta Liebaug, DESY  
ZEUS-Kollaboration

## Fotos:

DESY  
Ilka Flegel, Jena  
Peter Ginter, Lohmar  
H1-Kollaboration  
HERA-B-Kollaboration  
HERMES-Kollaboration  
David Parker / Science Photo Library, London  
Sand und Schiefer – büro für neues lernen, Hamburg  
Manfred Schulze-Alex, Hamburg  
Heike Thum-Schmielau, Hamburg  
ZEUS-Kollaboration

## Weitere Illustrationen und Fotos mit freundlicher Genehmigung von:

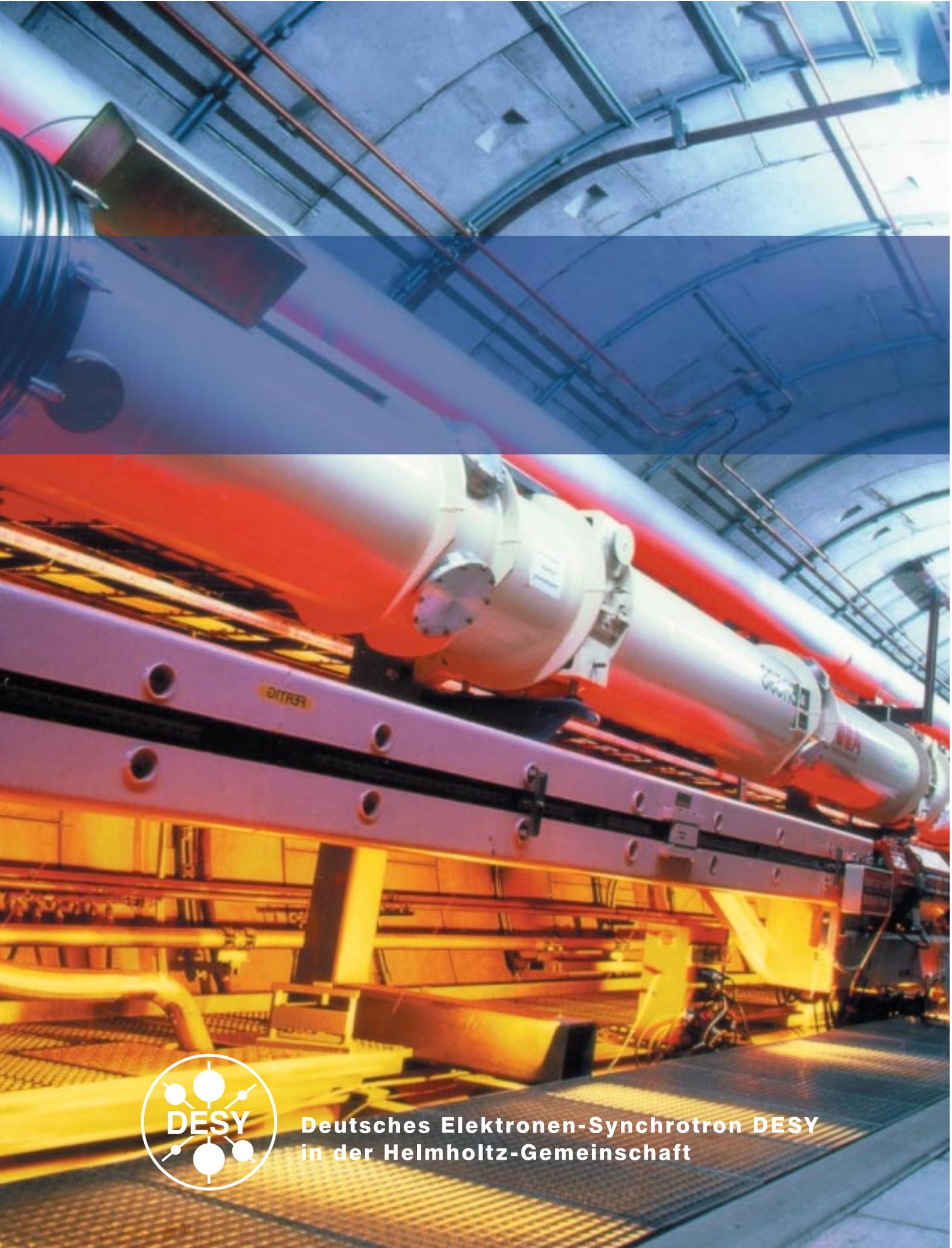
Istituto e Museo di Storia della Scienza, Florenz (Seite 47)  
Kepler-Gesellschaft e.V. Weil der Stadt, Postfach 1120, 71263 Weil der Stadt,  
und Kepler-Museum im Geburtshaus Keplers in Weil der Stadt (Seite 47)  
Sternwarte Kremsmünster, Stift Kremsmünster (Seite 47)  
The Living Archive (Seite 51)  
James Gitlin, STScI (Seite 61)  
Chris Cozzone, Albuquerque (Seite 67)  
AUTO BILD, Hamburg (Seite 70)  
„Gravitation“ von M.C. Escher, © 2002 Cordon Art B.V., Baarn, Holland.  
Alle Rechte vorbehalten. (Seite 78-79)

## Druck:

Dierk Heigener Druckerzeugnisse GmbH, Hamburg

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

Redaktionsschluss: Oktober 2002



**Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY  
in der Helmholtz-Gemeinschaft**