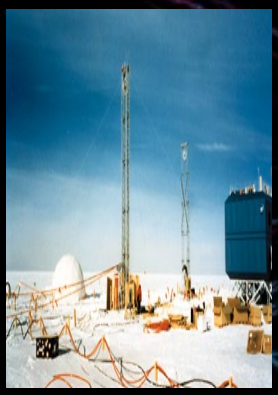
Teilchenphysik bei DESY Zeuthen



Was die Welt

im Innersten zusammenhält...

DEUTSCHES ELEKTRONEN-SYNCHROTRON

Titelgrafik:

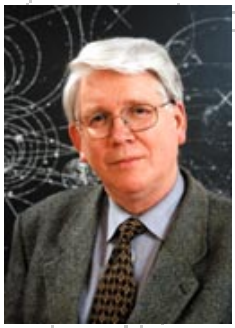
Zwei Momentaufnahmen eines Protons in 100-billionenfacher Vergrößerung, mit künstlerischer Freiheit ausgestaltet. Um drei Verdichtungen, die die sogenannten Valenzquarks anzeigen, wirbeln farbige sich rasch ändernde Strukturen aus einer ständig fluktuierenden Anzahl von Quarks, Antiquarks und Gluonen. Tatsächlich lassen die Untersuchungen am HERA-Beschleuniger, dem weltweit stärkstem „Mikroskop", noch feinere Einzelheiten erkennen als in dieser Darstellung angedeutet.
(Quelle CERN-Courier, Genf)

Was die Welt im Innersten zusammenhält...

Auf der Suche nach den Bausteinen unserer Welt

Teilchenphysik bei DESY-Zeuthen

Vorwort



Prof. Dr.
Björn H. Wiik

Dr.
Ulrich Gensch

Die Welt besteht aus Materie - auch wir selbst. Vielleicht haben Sie sich (oder, als Sie Kind waren, Ihre Eltern) schon einmal gefragt: Was ist das eigentlich, woraus wir gemacht sind? Was ist Materie? Hat sie kleinste Teile? Was hält sie zusammen? Und wo kommt sie her?

Die moderne Antwort auf die Herausforderung, die diese Fragen darstellen, ist die Elementarteilchenphysik. In den 40 Jahren ihres Bestehens hat sie zu einer tiefgreifenden Umwälzung unserer Anschauungen über die Materie geführt. Wir wissen heute, daß sich die beobachtete Vielfalt der Natur auf wenige Bausteine, man nennt sie Quarks und Leptonen, zurückführen läßt. Aus ihnen sind die verschiedenen Atome und Moleküle und damit alle Substanzen zusammengesetzt. Die Elementarteilchenphysik hat auch unser heutiges Verständnis vom Entstehen und der Entwicklung unseres Universums geprägt.

Die Elementarteilchenphysik ist eines der wenigen Gebiete, auf denen eine konstruktive Zusammenarbeit zwischen West und Ost auch in der Zeit des kalten Krieges bestand. Daher stammen langjährige Verbindungen zwischen dem Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg, einem der 16 Helmholtz-Forschungszentren, und dem „Institut für Hochenergiephysik" der früheren Akademie der Wissenschaften der DDR in Zeuthen bei Berlin, in dem die Elementarteilchen-Forschung der DDR konzentriert war. Nach der deutschen Vereinigung wurde daraus DESY-Zeuthen, heute ein integraler Teil von DESY. Das Sitzland Brandenburg übernimmt einen Teil der Finanzierung, der größere Teil wird vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie bereitgestellt.

DESY-Zeuthen ist in ein vielseitiges Programm der Elementarteilchen-Forschung eingebunden. Wegen ihres Umfangs werden die Projekte in meist großen, internationalen Teams geplant und durchgeführt, wozu Zeuthener Wissenschaftler und Ingenieure mit ihren speziellen Kenntnissen, Erfahrungen und Technologien wertvolle Beiträge liefern. Die experimentellen Untersuchungen laufen überwiegend am HERA-Beschleuniger des DESY-Hamburg, einem weltweit einmaligen „Supermikroskop" für das Innerste der Materie. Ein weiteres Experiment wird am Europäischen Forschungszentrum CERN in Genf durchgeführt.

Enge Kooperationen bestehen mit zahlreichen in- und ausländischen Universitäten und Forschungsinstituten. Ein Projekt, die Suche nach Neutrinos von kosmischen Quellen, ist am Südpol stationiert. Auch rein theoretische Untersuchungen werden durchgeführt; sie erfordern zum Teil den Einsatz und die Weiterentwicklung von modernster Höchstleistungsrechner-Technologie. Neben etwa 130 ständigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sind Nachwuchs- und Gastwissenschaftler an den Projekten beteiligt. Diplomanden, Doktoranden, Praktikanten und Lehrlingen wird die Qualifizierung auf ihren jeweiligen Gebieten in Zeuthen ermöglicht.

Mit dieser Broschüre wird der Versuch unternommen, das „Warum" und das „Wie" der Forschung bei DESY-Zeuthen zu erklären, einige Beispiele der Zeuthener Forschungsbeiträge darzustellen und einen Eindruck von den technologischen Herausforderungen, aber auch von der Faszination zu vermitteln, die mit der Erforschung der Elementarteilchen verbunden sind.

Prof. Dr. Björn H. Wiik
Vorsitzender des Direktoriums
Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

Dr. Ulrich Gensch
Leiter des Forschungsbereichs DESY-Zeuthen

Inhalt

5 Teilchenphysik - Entdeckungsreise ins Innerste der Materie

18 DESY-Zeuthen

22 HERA - Das „Super-Mikroskop“

30 High-Tech im Detektorbau

32 Der Mini-Urknall

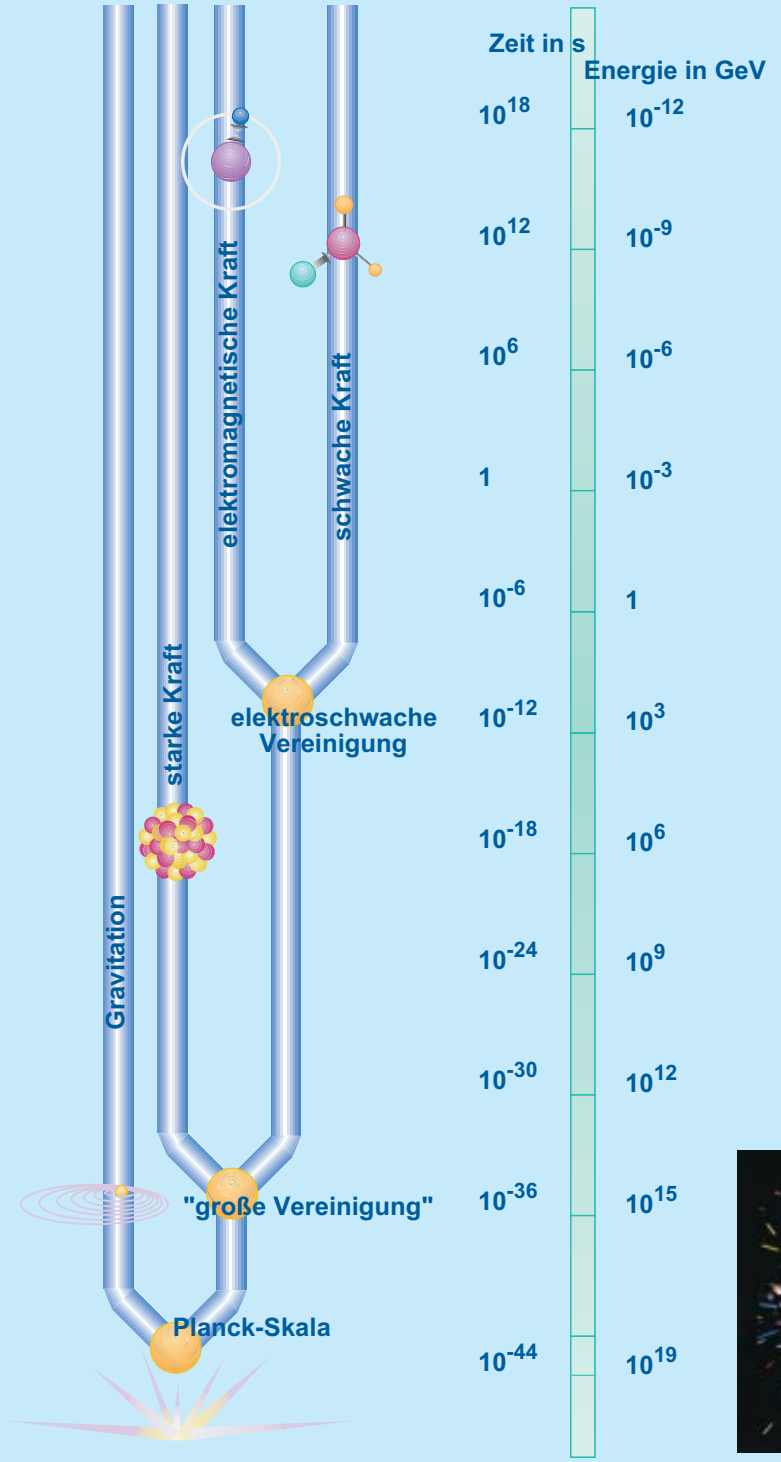
35 Eisjagd nach Neutrinos

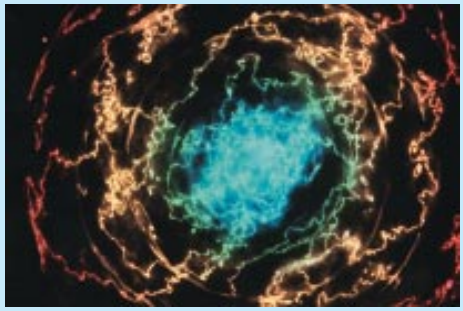
40 Superrechner simulieren die Realität

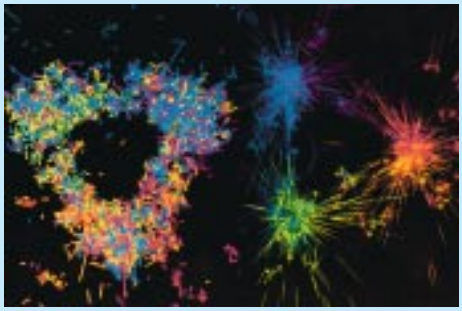
42 Die Zukunft

44 DESY auf einen Blick

45 G Glossar







Die linke Skala zeigt das Alter des Universums vom Urknall bis heute (in Sekunden), die rechte die mittlere Energie (in GeV) der Strahlung und Materieteilchen.

Teilchenphysik -
Entdeckungsreise ins Innerste der Materie

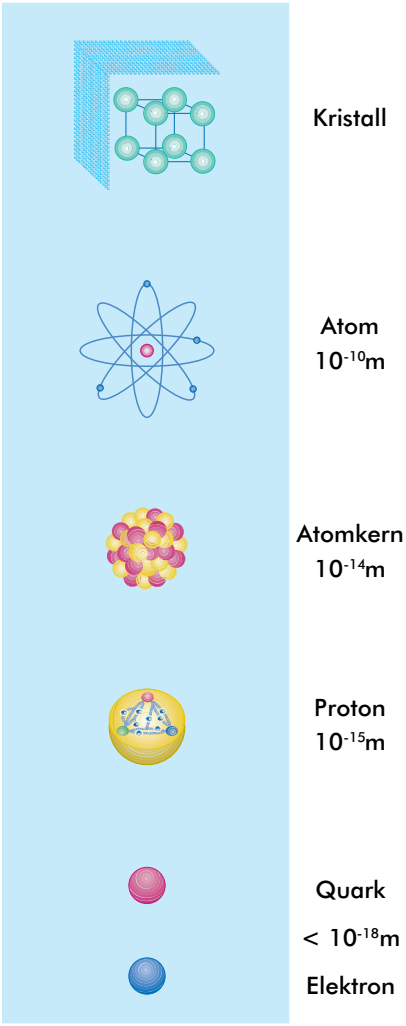
Bausteine und Kräfte der Welt

Seit jeher versuchten die Menschen, den Stoff zu erkunden, aus dem sie selbst und ihre Umgebung bestehen. Die Griechen der Antike, allen voran der Philosoph Demokrit (ca. 460-370 vor Christus), behaupteten: Alles in der Welt läßt sich teilen, bis kleinste elementare Teilchen übrigbleiben. Solche Teilchen nannten sie *Atome*, nach ατομοσ - das Unteilbare. Der Ausspruch Demokrits *„Nur durch Übereinkunft gibt es Süßes, Bitteres, Warmes, Kaltes und Farbiges, in Wirklichkeit gibt es nur Atome und das Leere“* kann heute noch als Leitsatz der Elementarteilchenphysik gelten. Er drückt die Überzeugung und den Wunsch der Physiker aus, mit Hilfe von unteilbaren Bausteinen den Aufbau unserer Welt zu erklären.

Das „teilbare“ Atom

Die Auffassung der antiken Griechen blieb sehr lange nur eine unbewiesene Vermutung. Erst mit dem Aufschwung der Experimentiertechnik im vorigen Jahrhundert - der Grundlage zur Entwicklung der modernen Naturwissenschaften - ließen sich überlieferte Lehren überprüfen.

Die Chemiker erkannten, daß alle uns umgebenden Stoffe aus wenigen Grundsubstanzen, aus etwas mehr als hundert chemischen Elementen, zusammengesetzt sind. Die kleinstmögliche Menge eines Elements ist das Atom - ein positiv geladener Kern, der von negativ geladenen Elektronen umgeben ist. Die von den Physikern entwickelten Methoden zeigten aber, daß der Atomkern nicht „elementar“ ist. Er besteht aus Protonen und Neutronen, die gemeinsam als Nukleonen oder Hadronen bezeichnet werden.



Von der Kristallstruktur zu den Quarks: Mit modernen Beschleunigern lassen sich Strukturen untersuchen, die nur ein Hundertmillionstel eines Atomdurchmessers betragen. Veranschaulicht ist die Hierarchie der Strukturen, durch die sich die Forschung bei ihrem Vorstoß ins Innere der Materie in unserem Jahrhundert vorgearbeitet hat.

Die entgegengesetzten Ladungen von Atomkern und Elektronenhülle verursachen elektrische Kräfte, die das Atom zusammenhalten. Elektrische Kräfte wirken auch zwischen den Atomen. Sie sind die Ursache dafür, daß die Atome sich miteinander verbinden und nach bestimmten Regeln charakteristische Anordnungen - Moleküle und Kristallgitter - aufbauen. Praktisch alle Substanzen unserer Umwelt sind ein Netzwerk von Molekülen; wir selbst eingeschlossen. Und elektrische Kräfte sind verantwortlich für die Reaktionen zwischen den Molekülen; sie bilden die Erklärung für die chemischen Prozesse.

Physiker ordnen das Teilchenchaos

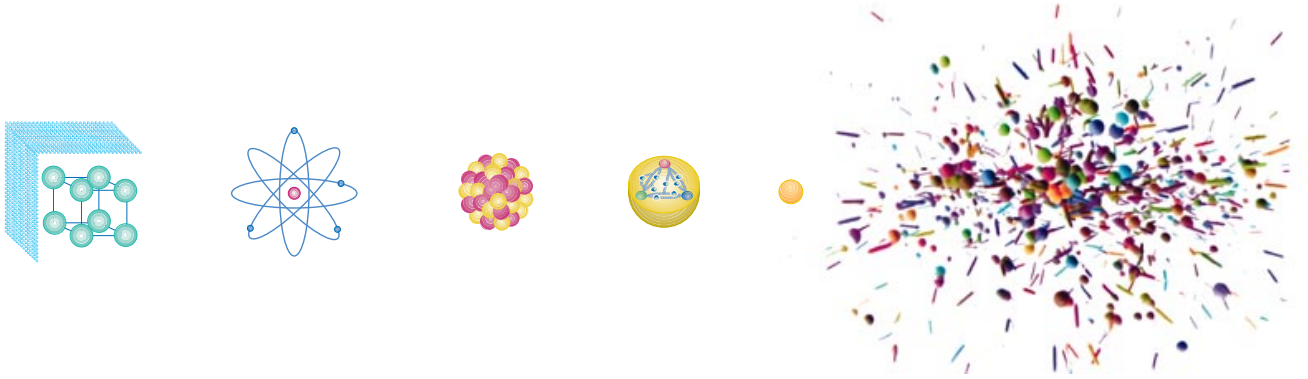
In den Jahren nach 1950 wurden bei Untersuchungen der kosmischen Strahlung und bei Experimenten an Teilchenbeschleunigern viele neue Teilchen entdeckt - weit mehr als hundert. Die Annahme, es handle sich um elementare Bausteine, wurde wegen der hohen Anzahl verworfen. Murray Gell-Mann und George Zweig ordneten das Teilchenchaos (1964) und führten zu diesem Zweck hypothetische Teilchen ein. Sie interpretierten sowohl die Kernbausteine aller Atome, die Nukleonen, als auch die meisten der bis dahin „elementar" genannten, an Beschleunigern erzeugten Teilchen als Bindungszustände dreier fundamentaler Bausteine - der Quarks. Ende der 60er Jahre wurden diese hypothetischen Quarks als punktförmige Objekte im Inneren des Protons tatsächlich nachgewiesen.

Nach der Entdeckung der Struktur der Atome (Rutherford, 1911) und des Aufbaus der Atomkerne (Chadwick, 1931) war die Identifizierung der Quarks als Bausteine der Nukleonen einer der Meilensteine des 20. Jahrhunderts in der Erforschung der innersten Struktur der Materie. Heute weiß man, daß es sechs Arten von Quarks gibt, die sich in drei Gruppen, auch Familien genannt, einteilen lassen. Außer den Quarks existiert in der Natur eine weitere Urkomponente - die Leptonen. Auch die Leptonen treten in sechs unterschiedlichen Formen auf, wiederum einteilbar in drei Familien. Das bekannteste Lepton ist das Elektron - der Träger des elektrischen Stroms.

Für die Beschreibung unserer Umwelt mit ihren vielfältigen Erscheinungsformen genügen drei Grundbausteine: das Up-Quark, das Down-Quark und das Elektron. Von einem vierten Teilchen hängt das biologische Leben auf der Erde ab - das Neutrino. Denn ohne Neutrinos würde die Sonne nicht leuchten. Die übrigen Quarks und Leptonen existierten in der Natur nur unmittelbar nach dem Urknall gleichberechtigt neben den anderen. Sie können heute für kurze Zeit in leistungsstarken Beschleunigern wieder erzeugt werden.

Urknall

Die gesamte Materie des Universums entstand nach heutiger Kenntnis vor etwa 15 Milliarden Jahren. Ein Ball (kleiner als ein Atom) mit einer unvorstellbar großen Energiedichte glühte auf und explodierte - der Urknall (englisch „Big Bang"). Die Materie breitete sich mit unglaublicher Geschwindigkeit in allen Richtungen aus - ein kosmischer Vorgang, der Galaxien, Sonnen, Planeten und schließlich die Menschen hervorbrachte. Die Physiker sind heute in der Lage, mit großen Teilchenbeschleunigern Materie unter ähnlichen Bedingungen zu untersuchen, wie sie unmittelbar nach dem Urknall herrschten. Die Entdeckungsreise in das Innere der Materie zu deren winzigen Strukturen ist daher ebenso eine Reise zurück in der Zeit, zurück zum Beginn unserer Welt und Zeit.



Leptonen

Elektron
Masse 0,0005 GeV

Elektron-Neutrino
Masse unbekannt

Myon
Masse 0,1 GeV

Myon-Neutrino
Masse unbekannt

Tau
Masse 1,8 GeV

Tau-Neutrino
Masse unbekannt

Quarks

Up
Masse 0,004 GeV

Down
Masse 0,007 GeV

Charm
Masse 1,5 GeV

Strange
Masse 0,15 GeV

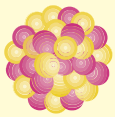
Top
Masse 174 GeV

Bottom
Masse 4,7 GeV

Materieteilchen und Kräfte:

Als Bausteine der Materie kennen wir heute 12 Materieteilchen: 6 Quarks und 6 Leptonen. Außerdem gibt es Kraftteilchen: das Photon, das Gluon, das Z-Teilchen und zwei W-Teilchen. Sie halten die Welt in ihrem Innersten zusammen, indem sie die elektromagnetische, die starke und die schwache Kraft zwischen den Bausteinen der Materie vermitteln. Die bekannteste aller Kräfte, die Gravitation, wird durch das bisher noch nicht nachgewiesene Graviton übertragen.

Atomkern



Atom

Radioaktivität

Sonnensystem

Maßgebliches Kraftteilchen:

Gluon	Photon	W- und Z-Boson	Graviton
	Lichtteilchen		
Masse 0	Masse 0	Masse 80,3 GeV (W) 91,2 GeV (Z)	Masse 0

Zu jedem der als elementar angenommenen zwölf verschiedenen Teilchen gehört ein Antiteilchen. Diese unterscheiden sich im Vorzeichen ihrer Quantenzahlen. Das Antiteilchen eines geladenen Teilchens zum Beispiel hat die entgegengesetzte Ladung; ansonsten sind die Eigenschaften identisch. Antipode des negativ geladenen Elektrons ist das positiv geladene Positron. In der Natur kommen Antiteilchen so gut wie nicht vor, weil sie beim Zusammentreffen mit normaler Materie zerstrahlen. Sie lassen sich aber künstlich erzeugen.

Die geheimnisvollen Kräfte

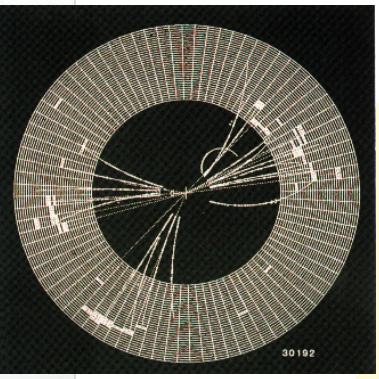
Die Erforschung der Elementarteilchen führte dazu, daß viele offene Fragen rund um die Kräfte, die zwischen den Bausteinen der Welt herrschen, beantwortet werden konnten. Die moderne Physik kennt vier unterschiedliche elementare Kräfte: die elektromagnetische, die schwache und die starke Kraft sowie die Gravitation. Sie unterscheiden sich durch ihre Stärke und in ihrer Ursache, die auf speziellen Eigenschaften der Teilchen beruht. Am bekanntesten ist die elektrische Ladung als Ursache der elektromagnetischen Kraft.

Die Kräfte - man spricht allgemeiner auch von Wechselwirkungen - werden durch für jede Kraftart spezifische Austauschteilchen, Bosonen genannt, übertragen: Die elektromagnetische Kraft durch die als Lichtquanten bekannten Photonen; die zwischen den Quarks wirkende starke Kraft durch die Gluonen; die schwache Kraft durch das neutrale Z-Teilchen, das negativ geladene W- und das positiv geladene W-Teilchen; die Gravitation durch das masselose, allerdings noch nicht beobachtete Graviton.

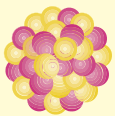
Der experimentelle Nachweis des Gluons, die bisher bedeutendste Entdekkung beim Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY, gelang im Juni 1979 am Speicherring PETRA in sogenannten 3-Jet-Ereignissen. Bei einer Elektron-Positron-Vernichtung wurden drei Teilchenstrahlen („Jets") beobachtet; zwei stammen von einem Quark-Antiquark-Paar und der dritte von einem Gluon. Diese 3 Teilchen zerstrahlten sogleich in Bündel von Hadronen.

Die Gravitation, welche die gegenseitige Anziehung aller Teilchen verursacht, ist unter den vier Elementarkräften die schwächste. Wir spüren sie als Schwerkraft nur deshalb, weil alle Teilchen der ganzen Erde uns gleichzeitig herunterziehen. Die nächststärkere ist die schwache Kraft. Sie ist verantwortlich für die Prozesse, die in der Sonne Energie erzeugen, und für bestimmte Formen des radioaktiven Zerfalls. Dann folgt die elektromagnetische Kraft, die für das Leben auf der Erde so wichtig ist: Sie baut die Elektronenhüllen der Atome auf, auf ihr beruhen die chemischen Bindungen und Prozesse, durch sie funktionieren Elektromotoren, die unzählige Maschinen antreiben, und Telefon, Fernseher und vieles andere mehr.

Die vierte und stärkste Kraft ist die starke Kraft; sie bestimmt den Aufbau der Atomkerne. Der Kern eines Goldatoms enthält beispielsweise auf engstem Raum neben 118 ungeladenen Neutronen 79 positiv geladene Protonen, die sich aufgrund ihrer gleichen Ladungen gegenseitig abstoßen. Trotzdem bilden sie einen stabilen Atomkern. Die Ursache dafür ist die bedeutend stärkere, die Protonen und Neutronen zusammenhaltende starke Kraft.

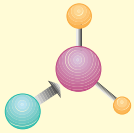


Gluonen-Spuren-Nachweis in einem Detektor am DESY

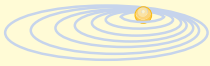


Gluon

Photon
Lichtteilchen



W- und Z-Boson



Graviton

Träger der:			
starken Kraft	elektromagnetischen Kraft	schwachen Kraft	Gravitationskraft
Wirkt auf:			
Quarks	Quarks und geladene Leptonen	Quarks und Leptonen	alle Teilchen
Verantwortlich für:			
Zusammenhalt der Atomkerne	Chemie, Elektrizität und Magnetismus	Radioaktivität Sonnenenergie	Zusammenhalt der Erde, der Sonne, des Planetensystems ...

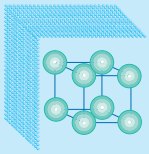
Auf der Suche nach der Weltformel

Seit Albert Einstein versuchen die Physiker, die elementaren Kräfte auf eine alles umfassende Urkraft zurückzuführen. Mehr noch: Man sucht das grundlegende Prinzip, das sämtliche Materie und Kräfte im Universum erklärt.

Den Weg dahin wies schon vor 100 Jahren James Clerk Maxwell. Er vereinigte mit einem genialen mathematischen Trick die elektrische mit der magnetischen Kraft zur elektromagnetischen Kraft. Dieser Schritt war die Grundlage für die Elektrotechnik. Für die anderen Kräfte - die schwache und die starke Kraft, ganz zu schweigen von der Gravitationskraft - ist eine Vereinheitlichung schwieriger: Jede dieser Kräfte wird durch andere Ladungen erzeugt, ihre Stärken sind verschieden, und sie variieren mit dem Abstand der elementaren Materieteilchen ganz unterschiedlich.

Die Elementarteilchenforscher entwickelten ein „Standardmodell", das sämtliche Materieteilchen und Kräfte, aus denen die Welt nach dem heutigen Kenntnisstand aufgebaut ist, theoretisch beschreibt. Mit Hilfe dieses Modells ist es den Physikern gelungen, die schwache Kraft mit der elektromagnetischen Kraft so zu verknüpfen, daß sie sich aus einer einheitlichen, der elektroschwachen Kraft herleiten lassen. Die Theorie der elektroschwachen Kraft wurde bereits durch zahlreiche Experimente an verschiedenen Teilchenbeschleunigern untermauert.

Bei der Vereinheitlichung der übrigen Kräfte („große" Vereinigung) sind die Physiker hauptsächlich auf theoretische Modelle und Berechnungen angewiesen, denn sie kann nie direkt gemessen werden. Selbst die leistungsstärksten Teilchenbeschleuniger können nicht die dafür erforderliche, außerordentlich starke Konzentration von Energie, wie sie nur kurz nach dem Urknall bestand, jemals erreichen. Die meisten Physiker sind heute - wie auch Albert Einstein es war - davon überzeugt, daß es am Anfang eine einzige perfekte symmetrische Urkraft gegeben hat. Bei der Abkühlung des Universums nach dem „Big Bang" wurde aber die Symmetrie der Urkraft mehrfach gebrochen. In der Folge kristallisierten sich die heute bekannten vier elementaren Grundkräfte heraus - vergleichbar mit einer heißen Dampfwolke, die sich abkühlt, kondensiert und aus der sich schließlich vielfach gebrochene Eiskristall-Strukturen bilden.

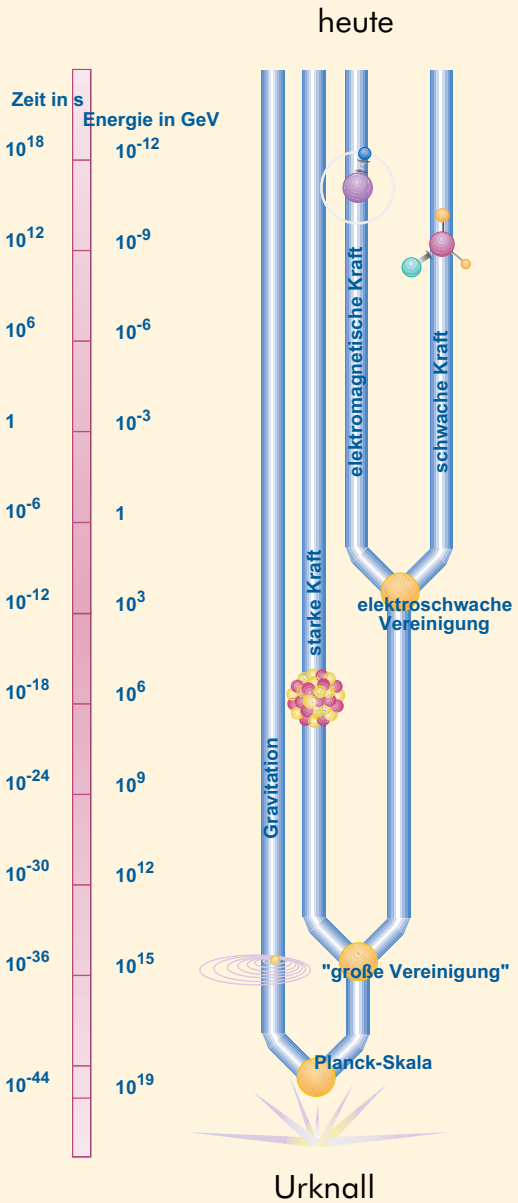


Offene Fragen

Mit dem Standardmodell wurden viele Erscheinungen und Prozesse in der Teilchenphysik genau berechnet. Die daraus getroffenen Voraussagen stehen bisher mit keiner Messung in einem wesentlichen Widerspruch. Trotz dieser Erfolge gibt es Phänomene, die sich die Physiker bislang nicht erklären können.

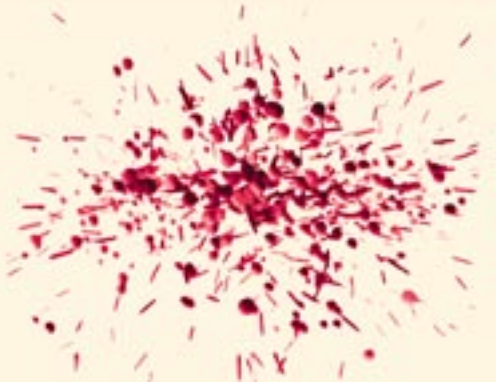
Dazu gehört die Tatsache, daß alle Grundbausteine sehr ähnlich und eng miteinander verwandt sein müssen. Zum Beispiel: Da ein Atom elektrisch neutral ist, muß die elektrische Ladung eines Elektrons in der Atomhülle mit sehr hoher Genauigkeit ebenso groß sein wie die Summe der Quarkladungen eines Protons im Atomkern. Doch warum ist das so, was steckt dahinter?

Der genaue Zusammenhang zwischen den Ladungen von Quarks und Leptonen hätte eine natürliche Erklärung, wenn beide aus einheitlichen Bausteinen aufgebaut sind. Quarks und Leptonen sind aber so klein, daß ihre Größe noch unbekannt ist. Man weiß nicht einmal, ob sie überhaupt eine endliche Größe besitzen. Ihre Massen, die bestimmt werden konnten, zeigen erhebliche Unterschiede. Einige sind sehr leicht, aber das Top-Quark ist fast so schwer wie ein Goldatom. Dahinter steckt vermutlich eine Systematik, die wir noch nicht durchschauen. Wie die elementaren Bausteine eine Masse erhalten, ist somit eine der zentralen Fragen der Teilchenphysik.



Zur Vereinheitlichung der Kräfte:

Bei sehr kleinen Abständen der Teilchen, oder sehr hohen Energien, sind die 4 elementaren Kräfte gleich stark. Dieser Fall existierte unmittelbar nach dem Urknall. Heute ist dieses Szenario an Beschleunigern bis zu gewissen Grenzen nachstellbar. Experimentell bestätigt wurde die elektroschwache Vereinigung. Sie faßt die schwache und die elektromagnetische Kraft bei Energien von einigen hundert GeV in einer einheitlichen „elektroschwachen Kraft" zusammen.



Noch anderes ist rätselhaft:

- Weshalb besteht sowohl die Quark- als auch die Leptonen-Gruppe gerade aus sechs Mitgliedern, aus sechs Teilchen also, und welcher Zusammenhang existiert zwischen ihnen?

- Weshalb gibt es im Weltall fast nur Materie und nahezu keine Antimaterie? Die Experimente, die den Urknall simulieren, erzeugen Materie und Antimaterie gleich häufig. Das heißt, ursprünglich dürfte ebensoviel Antimaterie wie Materie entstanden sein. Aber wo ist die Antimaterie geblieben?

- Im Standardmodell lassen sich bisher nur die elektromagnetische und die schwache Kraft mathematisch aus einer gemeinsamen Kraft ableiten. Wie aber lassen sich diese beiden mit der starken Kraft und der Gravitation unter einen Hut bringen? Der Lösung dieser Frage nähert man sich vermutlich nur dann, wenn das Standardmodell in eine umfassendere Beschreibung aller Teilchen und ihrer Wechselwirkungen eingebettet werden kann. Nach diesem universellen Modell suchten bereits Einstein und Heissenberg, und die Teilchenphysiker von heute suchen weiter danach.

Wie werden Teilchen untersucht?

Mit hochenergetischen kleinsten Teilchen

Eine Reihe der wichtigsten Entdeckungen machten die Teilchenphysiker in Experimenten, in denen sie energetische Teilchen auf Materie schossen und aus der beobachteten Ablenkung deren innere Struktur ermittelten.

Erstmals wurde dieses Meßverfahren zu Beginn unseres Jahrhunderts von Rutherford, Geiger und Marsden angewandt. Ihr bahnbrechendes Experiment zeigte, daß das Atom im wesentlichen leer ist. Die gesamte Masse des Atoms ist in einem winzigen Bruchteil des Gesamtvolumens konzentriert - im Atomkern. Rutherford erkannte, daß genauere Informationen über den Aufbau des Atomkerns nur mit Teilchen höherer Energie zu erreichen sind. Er leitete damit die Entwicklung von Teilchenbeschleunigern ein.

Die Riesenmikroskope der Physiker

Mit einem Lichtmikroskop können Strukturen untersucht werden, deren Abmessungen von der Größenordnung der Lichtwellenlänge ist - einige zehntausendstel Millimeter. Eine derartige Wellenlänge ist aber zu groß, um kleinere Objekte beobachten zu können. Hierfür werden Elektronenmikroskope eingesetzt. Sie verwenden statt Licht Elektronen, die - wie De Broglie herausfand - ebenfalls Welleneigenschaften besitzen. Im Unterschied zum Licht lassen sich geladene Teilchen wie Elektronen und Protonen durch elektrische Felder beschleunigen. Je stärker sie beschleunigt werden, desto höher ist ihre Energie, um so kürzer wird ihre Wellenlänge und um so kleinere Strukturen können abgebildet werden.

Beschleuniger bringen Teilchen auf Trab

Nahezu in jedem bundesdeutschen Haushalt steht ein kleiner Teilchenbeschleuniger - der Fernseher. Ein Fernseher arbeitet nach den gleichen Prinzipien wie die riesigen Beschleuniger der Teilchenphysiker: Geladene Teilchen werden auf ganz bestimmte Bahnen geführt, elektrische Felder beschleunigen die Teilchen, und magnetische Felder ändern die Richtung ihrer Bahn und bündeln sie.

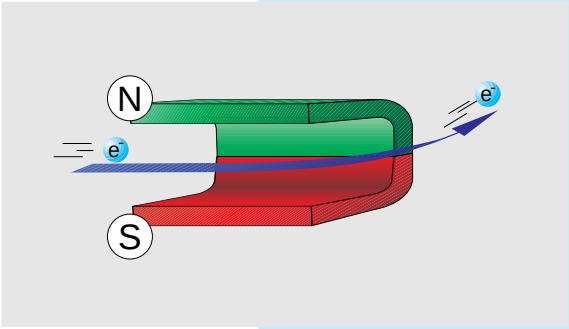
Der HERA-Tunnel

Komponenten eines Beschleunigers

Teilchenquellen: Die zur Beschleunigung benötigten Elektronen werden durch Erhitzen eines Wolframdrahtes freigesetzt. Die Protonen kommen, gebunden im Wasserstoffatom, aus einer Gasflasche. Die Erzeugung ihrer Antipartner wird gezielt durch bekannte physikalische Prozesse ausgelöst. Sind die elektrisch geladenen Teilchen freigesetzt, werden sie zunächst mit magnetischen Feldern eingefangen und gebündelt, um dann eine erste Beschleunigung zu erfahren .

Vakuumrohr: Damit möglichst wenige der beschleunigten Teilchen durch Zusammenstöße mit Luftmolekülen verlorengehen, müssen sie in Rohren mit Ultrahochvakuum fliegen. In Vakuumkammern moderner Beschleuniger herrscht typischerweise ein Druck von einigen hundertmillionstel (10^{-8}) Millibar.

Durchläuft ein Elektron eine Spannungsdifferenz von 20 Kilovolt (kV), wie dies zum Beispiel beim Fernseher der Fall ist, dann hat es am Ende eine Energie von 20 keV. Um höhere Energien zu erzielen, werden mehrere Beschleunigungsstrecken hintereinander angeordnet.



Führungsmagnete: Unbeeinflußt von äußeren Kräften fliegen beschleunigte Teilchen geradeaus. Um sie innerhalb eines Ringes oder zwischen zwei Beschleunigern auf dem richtigen Weg zu halten, werden spezielle Magnete, Dipolmagnete, eingesetzt. Ihr Magnetfeld wirkt senkrecht zur Flugrichtung der Teilchen und zwingt sie so auf eine gekrümmte Bahn.

Fokussierungsmagnete: Ein Teilchenstrahl ist ungleichmäßig zusammengesetzt; er besteht aus mehreren kleinen „Paketen" von möglichst vielen Teilchen in möglichst kleinem Volumen. Da die Teilchen eines Pakets nicht alle exakt die gleiche Richtung haben und sich gleichzeitig auch gegenseitig anstoßen, streben sie allmählich auseinander. Durchfliegen sie aber in regelmäßigen Abständen spezielle Magnetfeldanordnungen, Quadrupolmagnete genannt, so werden sie durch magnetische Felder wieder fokussiert, ähnlich wie optische Linsen die Lichtstrahlen vereinigen.

Beschleunigungsstrecken: Die Teilchen werden in elektrischen Wechselfeldern beschleunigt, wobei die Spannungsdifferenz zwischen dem Start- und dem Endpunkt der Strecke entscheidend ist. In Linearbeschleunigern sind viele solche Strecken hintereinandergeschaltet. In Ringbeschleunigern dagegen werden die Beschleunigungsstrecken im Kreis angeordnet, so daß die Teilchen das System mehrmals - viele tausendmal in der Sekunde - durchlaufen können. Seit zwanzig Jahren werden vorwiegend Speicherring-Collider genutzt. In diesen Teilchenbeschleunigern kreisen zwei Teilchenstrahlen in entgegengesetzter Richtung. Sie werden so gesteuert, daß sie an dafür vorgesehenen Kreuzungsstellen kollidieren. Durch diese Frontalzusammenstöße wird die Kollisionsenergie besonders groß.

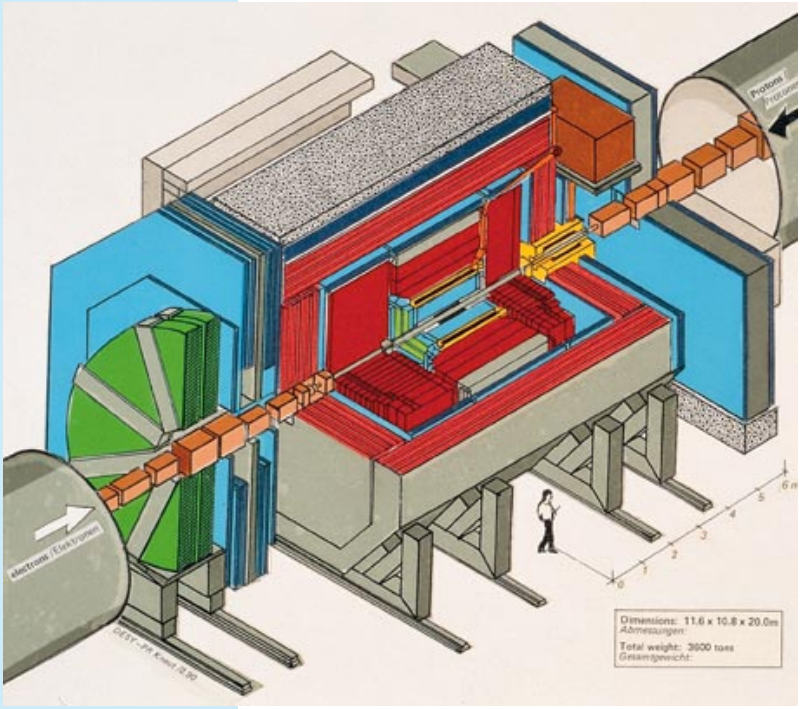
Kollisionen auf engstem Raum

Bei Zusammenstößen zwischen Teilchen in Beschleunigern oder bei ihrem Aufprall auf Ziele außerhalb des Beschleunigers entstehen oft auch neue Teilchen. Dies geschieht, indem Materie sich in Energie und diese sich wieder zurück in Materie verwandelt; es gilt Einsteins berühmte Gleichung $E = mc^2$, wobei E für Energie, m für Masse steht und c die Lichtgeschwindigkeit angibt.

Aus $E = mc^2$ folgt, daß ein Gramm Materie erstaunliche 20 Billionen Kalorien enthält. Die Teilchen, die in Beschleunigern untersucht werden, sind so winzig, daß die in ihnen enthaltene Energie nur etwa ein Milliardstel einer Kalorie beträgt. In Teilchenkollisionen wird diese Energie auf einen äußerst kleinen Raum konzentriert. Unter solch hohen Energiekonzentrationen können neue Teilchen entstehen, deren Untersuchung uns faszinierende Einblicke in die Geheimnisse der Natur ermöglicht.

Detektoren - Giganten mit Feingefühl

Teilchenkollisionen herbeizuführen ist eine Sache, sie aber nachzuweisen eine andere. Diese Aufgabe übernehmen Teilchendetektoren - das sind Meßanordnungen so groß wie mehrstökkige Häuser. Sie werden um den Kollisionspunkt errichtet und zeichnen alles auf, was sich dort ereignet. Mit ihrer Hilfe versuchen die Wissenschaftler, alle herausfliegenden Teilchen aufzuspüren, ihre Identität und Herkunft festzustellen und die Flugbahnen zu bestimmen. Um das zu erreichen, werden die Detektoren schalenförmig aufgebaut.



Schematische Darstellung des 10 m hohen ZEUS-Detektors am HERA-Beschleuniger in Hamburg. Er ist aus verschiedenen um den Kollisionsbereich angeordneten Schichten aufgebaut. Von innen nach außen:

Spurenkammern (blau, dunkelblau), supraleitende Spule (orange), Kalorimeter (rot/grau), mit Myon-Kammern ausgestattetes Eisenjoch (rot mit blauen Streifen), Myon-Kammern (blau), Myon-Toroid (grün/gelb). Durch das Zentrum des Detektors läuft das Strahlrohr, das mit Quadrupolen (orange) zur Fokussierung der Teilchenpakete ausgestattet ist. Die Protonen kommen von rechts durch das Strahlrohr, die Elektronen von links.

Die innersten Schalen dienen dazu, die Teilchenspuren sichtbar zu machen. Dafür verwendet man Drift- und Proportionalkammern. In ihnen hinterlassen geladene Teilchen Ionisationsspuren, die mit Hilfe von Signaldrähten rekonstruiert werden können. Gleichzeitig krümmt ein Magnetfeld die Bahn der Teilchen. Dadurch können der Impuls, die Ladung und bei Kenntnis der Masse die Energie der Teilchen sowie ihr gemeinsamer Entstehungsort genau bestimmt werden. Neben Driftkammern werden im Inneren solcher Detektoren auch Anordnungen aus dünnen Halbleiter-Plättchen eingesetzt, die eine noch genauere Ortsbestimmung liefern.

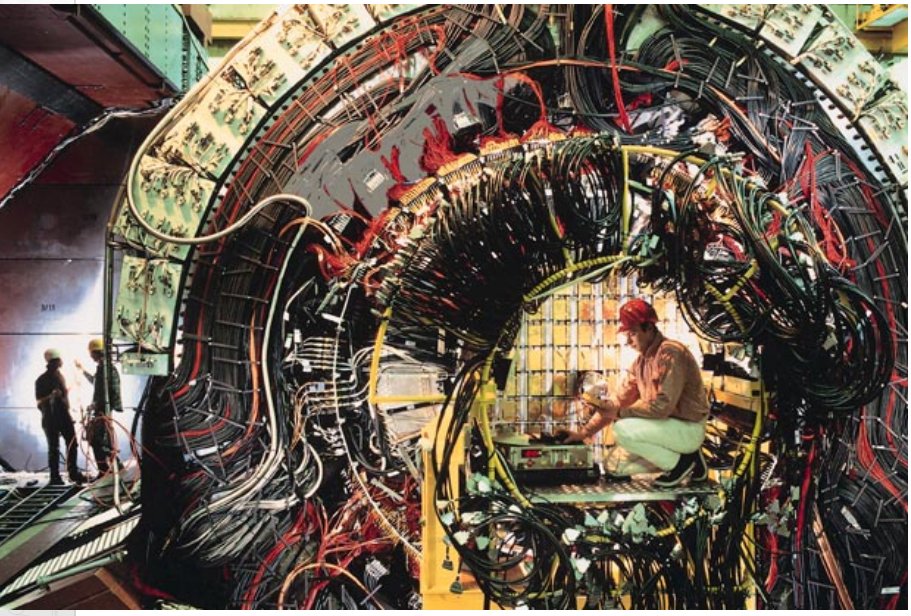
In der nächsten Schalenanordnung befinden sich die Kalorimeter. Das sind Geräte zur Ermittlung von Wärmemengen. In ihnen wird ein Großteil der Teilchen absorbiert und ihre Energie kann dadurch gemesssen werden.

Weitere Detektorteile ergänzen die Informationen, beispielsweise über die Myonen, die schweren Partner der Elektronen. Myonen durchdringen dicke Materieschichten, ohne absorbiert zu werden. Dadurch sind sie von anderen Teilchen leicht zu unterscheiden. Die Spuren von Myonen lassen sich in einem Eisenjoch verfolgen, das man ohnehin für die Spurenkammern zur Rückführung des Magnetfeldes benötigt. Um die Myonen aufzuspüren, werden hinter und zwischen den Eisenplatten des tonnenschweren Jochs großflächige Nachweisgeräte angebracht.

Reaktionsprodukte, die den Detektor durch das Strahlrohr verlassen, sind von besonderem Interesse. Spezialdetektoren überwachen deshalb die kleinen Winkel entlang des Strahls. Dies ist auch wichtig zur Bestimmung der Zusammenstoßrate der gespeicherten Teilchen - der „Luminosität" des Speicherring-Colliders.

Die vier HERA-Detektoren H1, HERA-B, HERMES und ZEUS sind das Ergebnis der Arbeit internationaler Forschungsgruppen, die aus mehreren hundert Wissenschaftlern bestehen. Auf diesem Bild ist ein Teil der ZEUS-Arbeitsgruppe vor dem geöffneten Detektor zu sehen.

Einen anschaulichen Eindruck von der Komplexität der heute in der Teilchenphysik eingesetzten Nachweisgeräte vermittelt dieses Bild des geöffneten H1-Detektors. Das Foto von P. Ginter entstand während der Winterunterbrechung 1994/95, als in den Detektor ein zusätzliches Kalorimeter eingebaut wurde (man sieht dessen gold-scheinende, etwas zurückliegende Fläche im Zentrum). Mit ihm lassen sich Elektronen, die in kleinen Winkeln gestreut werden, mit verbesserter Auflösung messen.



Elektronische Entscheidungen in kürzester Zeit

An einen typischen Collider-Detektor können bis zu 100 000 Kabel angeschlossen sein, von denen jedes einzelne Informationen vom Detektor zum Datenerfassungssystem überträgt. Alle einlaufenden Informationen müssen systematisch ausgewertet, überprüft und schließlich weiterverarbeitet werden; eine schnelle Elektronik oder ein Rechner entscheidet, ob das jeweilige Ereignis auf Magnetband gespeichert oder verworfen werden soll. Da im Mittel nur eines von mehreren zehntausend oder sogar Millionen Ereignissen interessiert, das heißt wissenschaftlich neu ist, andererseits für jedes interessante Ereignis eine gewaltige Datenmenge abgespeichert werden muß, spielen elektronische Entscheidungen bei der Funktion von Detektoren eine wichtige Rolle.

Teilchenphysik - Warum?

Erkenntnisorientierte Grundlagenforschung

Forschung kostet Geld. Die dafür zur Verfügung stehenden Mittel sind beschränkt. Damit stellt sich die Frage, wieviel und welche Forschung sich unsere Gesellschaft leisten kann und leisten will. Welchen Nutzen bringt das Wissen über die elementaren Zusammenhänge im Mikrokosmos? Und werden nicht Geld und menschliche Ressourcen an etwas verschwendet, das letztlich nur der Befriedigung, der Neugier einiger weniger Forscher dient ?

„Ökonomen haben nachgewiesen, daß in den USA rund 23 Prozent des Bruttosozialproduktes auf den wissenschaftlichen Durchbruch zur Quantenmechanik in der Physik zurückgehen. Bei uns dürfte die Zahl ähnlich hoch liegen. Transistoren beruhen zwar nicht nur auf der Quantenmechanik, aber sie sind ohne sie nicht denkbar.
Ich bin sicher, daß auch auf anderen Gebieten ungeahnte Potentiale brachliegen. Sie zu mobilisieren, ist wirtschaftliche Überlebensfrage.“

Bundespräsident Roman Herzog
in einer Rede anläßlich des Röntgenjubiläums

... als intellektueller Generationenvertrag

Die Entwicklungsgeschichte von Naturwissenschaft und Technik legt den Schluß nahe, daß sich alles Wissen über die Natur irgendwann auszahlt. Auch wenn zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht erkennbar ist, welchen verwertbaren Nutzen eine bestimmte Entdeckung oder Forschungsrichtung mit sich bringt, so können spätere Generationen oft auf unerwartete Weise die Früchte dieser Arbeit ernten. Es gibt dafür mannigfache Beispiele in der Geschichte - wenngleich sich im Einzelfall immer darüber streiten läßt, ob und wie weit sich solche Beispiele auf unsere heutige Zeit übertragen lassen. Letztendlich ist Grundlagenforschung als eine Investition in die Zukunft zu betrachten.

... als Ausbildung für junge Wissenschaftler und Ingenieure

Durch die enge Zusammenarbeit mit vielen Universitäten leistet DESY einen wichtigen Beitrag zur Ausbildung junger Wissenschaftler und Ingenieure. Ihnen wird hier die Gelegenheit geboten, in einem internationalen Team an der Front der Forschung mitzuarbeiten und mit modernsten Einrichtungen und neuesten Techniken vertraut zu werden, so daß sie für ihr späteres Berufsleben bestens qualifiziert sind. Bei DESY in Hamburg und Zeuthen verbringen etwa 1000 junge Wissenschaftler als Diplomanden, Doktoranden oder Nachwuchswissenschaftler zusammen mit mehr als 3000 Forschern aus 35 Ländern ihre prägenden Jahre in internationaler Atmosphäre. Jährlich werden durchschnittlich 300 Doktor- und Diplomarbeiten mit bei DESY erzielten Forschungsergebnissen abgeschlossen.

Die vielen Studenten und jungen Wissenschaftler, die in der Forschung mitarbeiten und später in der Industrie oder als akademische Lehrer wirken, sorgen dafür, daß die Begeisterung für die Forschung und die Erfahrungen und Ergebnisse aus der Forschung weitergegeben und an anderen Stellen fruchtbar werden können.

Mit dem Bau von HERA wurde in industriellem Maßstab von der Supraleitung Gebrauch gemacht. Dadurch konnte sich eine Reihe von europäischen Firmen in dieser Basistechnologie qualifizieren. Neben den supraleitenden Magneten für die Protonen verwendet der Elektronenring von HERA in einem geraden Tunnelabschnitt auch eine Reihe supraleitender Hochfrequenz-Resonatoren. Bei 500 MHz schaffen diese eine Beschleunigungsspannung von 6 Megavolt pro Meter (MV/m). Normalleitende Kupfer-Resonatoren erreichen nur etwa 1 MV/m.

... als Motor für neue Einsatzmöglichkeiten

Heute sind die ursprünglich allein zur Erforschung des Mikrokosmos entwickelten Teilchenbeschleuniger zu Tausenden in Kliniken zur Therapie und Diagnose im Einsatz - eine Anwendung, die niemand vorausgeahnt hatte. Ein anderer Spin-off der Teilchenphysik ist die Synchrotronstrahlung, deren einzigartige Eigenschaften ohne den Bau von Teilchenbeschleunigern unentdeckt geblieben wären.

... als innovative Herausforderung für die Industrie

Einen unmittelbaren Nutzen der Grundlagenforschung stellt die Innovationsmotivation dar, die von den experimentellen Fragestellungen ausgeht. Die Instrumente, die die Elementarteilchen-Forschung benötigt und die zusammen mit der Industrie entwickelt und gebaut werden, wie beispielsweise die verschiedenen Komponenten der Teilchenbeschleuniger und Detektoren, stellen meist technologische Herausforderungen ersten Ranges dar.

So stößt man mit den Detektoren für die Beschleuniger HERA in Hamburg und LEP am CERN bei Genf an die Grenze des derzeit technisch Möglichen. Da bekannte Standardlösungen meist nicht leistungsfähig genug oder zu teuer sind, spielt die Elementarteilchen-Forschung eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung neuer, empfindlicher und präziser Nachweismethoden und -instrumente für alle Arten von Strahlung und Teilchen.

So fließt ein großer Teil der bei DESY eingesetzten Mittel in Innovationen für die Industrie, etwa für die Halbleiter-, die Magnet- und Kältetechnik, die Hochfrequenz- und Vakuumtechnik sowie die schnelle Elektronik und Datenverarbeitung. Die unter diesen Anforderungen entwickelten und erprobten Innovationen lassen sich später häufig in anderen, volkswirtschaftlich wichtigen Bereichen nutzen.

Ein Beispiel aus der jüngsten Zeit für den Technologietransfer zwischen Großforschungseinrichtungen der Teilchenphysik und Einrichtungen des öffentlichen Lebens sei hier genannt: das World Wide Web. Es wurde als interaktives Hypertextsystem für den Informationsaustausch zwischen Forschergruppen der Elementarteilchenphysik entwickelt und hat mittlerweile das Internet und die allgemeine Medienlandschaft tiefgreifend revolutioniert.

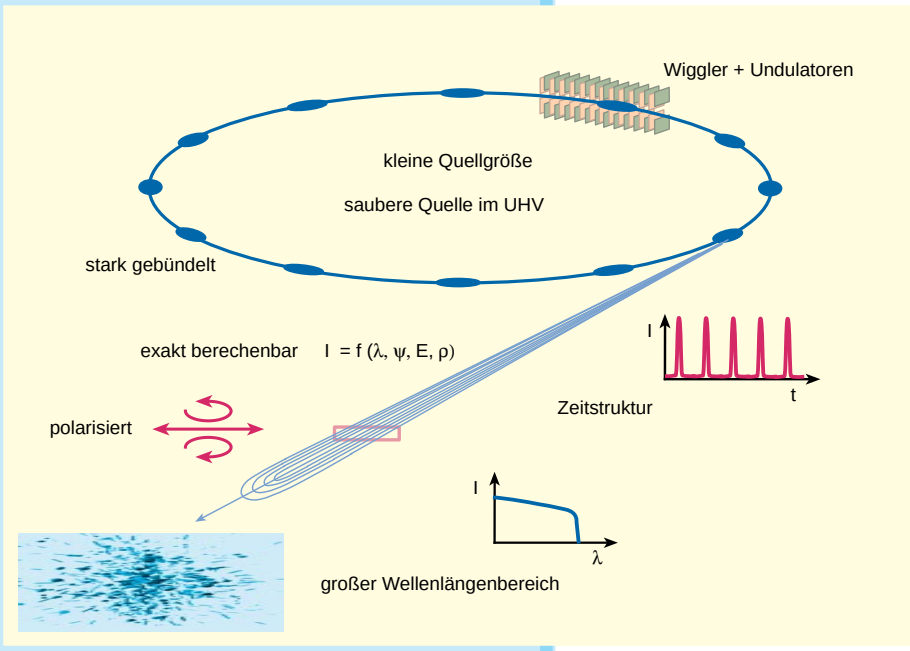
... als kultureller Wert an sich

Letztlich liegt aber die wesentliche Motivation für die Elementarteilchen-Forschung in dem Wunsch, das Funktionieren der Natur zu verstehen. Wollte man den Wert dieser erkenntnisorientierten Forschung allein am kurzfristigen praktischen Nutzen messen und sie danach ausrichten, wäre ein unerläßliches Element menschlichen Suchens und Erkenntnisstrebens ausgeschaltet, und gerade dieses Suchen und Streben ist ja ein grundlegender Teil dessen, was den Menschen letzten Endes ausmacht.

Teilchenbeschleuniger als Quelle für Synchrotronstrahlung

Die Synchrotronstrahlung ist eine außerordentlich intensive elektromagnetische Strahlung. Sie entsteht, wenn geladene Teilchen von sehr hoher Geschwindigkeit durch ein äußeres magnetisches Feld abgelenkt werden. Bei den heute erreichbaren Elektronenenergien wird in den Speicherringen ein sehr intensives, kontinuierliches, elektromagnetisches Spektrum abgestrahlt, welches sich vom Infraroten über den sichtbaren Bereich bis zur harten Röntgenstrahlung erstreckt. Aufgrund ihrer einzigartigen Eigenschaften findet die Synchrotronstrahlung in den verschiedensten Bereichen konkrete Anwendung, von der Physik über die Chemie, die Materialwissenschaften, die Geophysik und die Molekularbiologie bis hin zur medizinischen Diagnostik.

Anfangs wurde die Synchrotronstrahlung nur als ein störendes Nebenprodukt angesehen, da die abgestrahlte Leistung die erreichbare Elektronenenergie der Synchrotron-Beschleuniger begrenzte. Heutzutage werden dagegen weltweit Beschleuniger ausschließlich zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung gebaut, um die steigende Nachfrage nach dieser außergewöhnlichen Strahlung zu befriedigen. Solche Beschleuniger enthalten zur Erzeugung besonders intensiver Synchrotronstrahlung eines bestimmten Wellenlängenbereiches spezielle Magnetstrukturen, die aus periodischen Folgen von kurzen Ablenkmagneten bestehen. Diese Strukturen nennt man Wiggler und Undulatoren.



Die Möglichkeit, bestimmte Wellenlängenbereiche auszuwählen, nutzt zum Beispiel die nichtinvasive Koronar-Angiographie. Als besonders schonendes Röntgenverfahren wurde sie beim DESY in Zusammenarbeit mit Ärzten des Universitätskrankenhauses Hamburg-Eppendorf entwickelt. Die Abbildung der Herzkranzgefäße mit Synchrotronstrahlung beruht bei dieser Diagnose-Methode auf dem besonderen Absorptionsverhalten des Kontrastmittels Jod für Röntgenstrahlung. Dadurch lassen sich Verengungen der Herzkranzgefäße, die für die Blut-Versorgung des Herzens zuständig sind, in frühem Stadium ohne Verwendung eines Herzkatheters diagnostizieren. Drohende Herzinfarkte könnten so in Zukunft frühzeitig erkannt werden.

Die Elektronen oder Positronen kreisen in „Paketen“ auf geschlossenen Bahnen. Demzufolge tritt die Strahlung in Form von Blitzen auf; sie besitzt also eine Zeitstruktur und eignet sich damit hervorragend für Momentaufnahmen. Außerdem ist die Synchrotronstrahlung sehr intensiv, laserartig scharf gebündelt und polarisiert.

DESY-Zeuthen

Im Bundesland Brandenburg, südöstlich von Berlin, liegt DESY-Zeuthen. Das ehemalige „Institut für Hochenergiephysik“ der Akademie der Wissenschaften der DDR wurde auf Empfehlung des Wissenschaftsrates in seinem Bestand im wesentlichen erhalten und ab Januar 1992 als Teilinstitut in die Großforschungseinrichtung (jetzt Helmholtz-Zentrum) DESY eingegliedert.

Blick auf DESY-Zeuthen, gelegen am Zeuthener See südöstlich von Berlin. Für Wissenschaftler und Studenten, vor allem aus Berlin und Brandenburg, bietet das Institut attraktive Möglichkeiten zur Forschung und Ausbildung.

DESY-Zeuthen beschäftigt sich mit experimenteller und theoretischer Elementarteilchenphysik. Dabei steht es in enger Zusammenarbeit vor allem mit dem Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg, aber auch mit der Humboldt-Universität zu Berlin, dem Europäischen Zentrum CERN in Genf sowie zahlreichen Universitäten und Instituten im In- und Ausland, darunter - aufbauend auf alten Verbindungen - mit russischen Instituten.

Das Teilinstitut in Zeuthen ist in die Bereiche Forschung, Zentrale Dienste und Verwaltung unterteilt. Diese sind Teile der entsprechenden Bereiche von DESY-Hamburg. Zu den zentralen Diensten gehört die Konstruktionsabteilung und die Elektronik-Entwicklung, das Rechenzentrum sowie die Gruppe „Technische Infrastruktur“. Die Planung und Durchführung der einzelnen experimentellen Vorhaben im Forschungsbereich geschieht in Projektgruppen.

DESY

Das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY ist ein mit öffentlichen Mitteln finanziertes nationales Forschungszentrum mit Sitz in Hamburg und dem Teilinstitut DESY-Zeuthen in Brandenburg. Der Auftrag von DESY ist die naturwissenschaftliche Grundlagenforschung mit den beiden Schwerpunkten:

- Untersuchung der fundamentalen Eigenschaften der Materie in der Elementarteilchenphysik
- Interdisziplinäre Nutzung der Synchrotronstrahlung in Oberflächenphysik, Materialwissenschaften, Chemie, Molekularbiologie, Geophysik und Medizin.

DESY betreibt dazu die beiden Teilchenbeschleuniger HERA und DORIS, an denen über 3000 Wissenschaftler aus etwa 280 Instituten in 35 Ländern arbeiten. Mit der sich so ergebenden natürlichen Symbiose von Grundlagenforschung und angewandter Forschung bis hin zu gemeinsamen Arbeiten mit der Industrie zeichnet sich DESY durch ein breites interdisziplinäres Forschungsspektrum aus.

DESY ist Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF).

Infrastruktur

Mit der Integration des Zeuthener Instituts in das DESY begannen umfangreiche Baumaßnahmen zur Bewahrung der erhaltenswerten Bausubstanz und zur Schaffung einer für den zeitgemäßen Forschungsbetrieb erforderlichen Infrastruktur. Ein Großteil der bestehenden Gebäude wurde saniert und erweitert, so die Montagehalle, das Gästewohnhaus, die Kantinenküche, die mechanische Werkstatt sowie der Seminarraum- und Hörsaalkomplex. Andere Teile des Instituts wie die Ausbildungswerkstätten, die Elektronikwerkstatt, diverse Labors und die Cafeteria wurden komplett neu eingerichtet.

Historie

In der DDR war die experimentelle Elementarteilchenphysik - im Gegensatz zur Bundesrepublik und anderen Ländern, wo sie primär ein Forschungsgebiet der Universitäten ist - im „Institut für Hochenergiephysik“ der Akademie der Wissenschaften der DDR in Zeuthen konzentriert, einem Institut mit damals etwa 220 Mitarbeitern. Es war 1962 nach der Ausgliederung der Kernphysik aus dem 1950 errichteten „Institut Miersdorf für Atom- und Kernphysik der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin“ hervorgegangen.

Das Institut war auf dem Gelände und in den Gebäuden der früheren Forschungsanstalt der Deutschen Reichspost eingerichtet worden. Hier hatte im Zweiten Weltkrieg Reichspostminister Ohnesorge auf eigene Faust und abseits der anderen atomtechnisch-physikalischen Bemühungen des Deutschen Reichs mit dem Bau eines großen Zyklotrons und einer Pilotanlage zur Isotopentrennung begonnen.

In der DDR wurde kein eigener Hochenergiebeschleuniger gebaut, so daß man für die Experimente auf auswärtige Einrichtungen angewiesen war. In enger Zusammenarbeit mit sowjetischen Forschergruppen beteiligte man sich an den Projekten des Vereinigten Instituts für Kernforschung in Dubna in der Nähe von Moskau; dazu gehörten vor allem Experimente am Beschleuniger des Instituts für Hochenergiephysik in Protvino. Darüber hinaus beteiligte sich das Institut an Forschungsversuchen am CERN in Genf. In den ersten Jahren arbeitete es auch am Experimentierprogramm des damals beim DESY gerade fertiggestellten Elektronen-Synchrotrons mit.

Von 1969 an konzentrierte sich das Zeuthener Akademieinstitut stärker auf die Experimente in Rußland. Als in den 80er Jahren die Entwicklung der Teilchenbeschleuniger und Detektoren in Rußland ins Stocken geriet, intensivierte das Institut seine Beteiligung an Experimenten am CERN. Ab 1985 wurde dem Institut wieder die Zusammenarbeit mit dem DESY in Hamburg erlaubt. Eine Zeuthener Gruppe konnte nun am Bau des HERA-Detektors H1 teilnehmen. Gleichzeitig begann die gemeinsame Arbeit mit russischen Forschergruppen an der Entwicklung und an dem Bau eines Neutrino-Teleskops im Baikalsee.

Als der Wissenschaftsrat nach der Vereinigung Deutschlands im Auftrag der Bundesregierung die Institute der DDR begutachtete, gelangte er für das Zeuthener Institut rasch zu einer positiven Empfehlung. Wegen der bereits bestehenden Zusammenarbeit naheliegend, wurde 1992 das Institut in das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY (Sitz Hamburg) integriert.

Unterzeichnung des Staatsvertrages (1991) zur Integration des Instituts für Hochenergiephysik in das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY durch den Senator für Wissenschaft und Forschung der Freien und Hansestadt Hamburg, Prof. Dr. Leonhard Hajen, den Bundesminister für Forschung und Technologie, Dr. Heinz Riesenhuber, und den Minister für Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Brandenburg, Hinrich Enderlein. Daneben Prof. Paul Söding, Institutsleiter in Zeuthen.

Das Bild links zeigt die Max-Planck-Bronzeplastik von Bernhard Heiliger vor dem Laborgebäude des DESY-Zeuthen.

Forschung in internationaler Zusammenarbeit

Das langfristig angelegte Forschungsprogramm in Zeuthen, vor allem die Beteiligung an Experimenten am DESY und CERN, wird kontinuierlich fortgeführt und konnte in den letzten Jahren dank der verbesserten Infrastruktur beträchtlich erweitert werden. DESY-Zeuthen ist an allen vier HERA-Experimenten beim DESY in Hamburg sowie am L3-Experiment des Elektron-Positron-Speicherrings LEP am CERN beteiligt. Die Beiträge erstrecken sich sowohl auf den Entwurf, Test und Bau einzelner Komponenten der Experimente und Detektoren als auch auf die Analyse der Meßdaten und ihre physikalische und phänomenologische Interpretation.

Zeuthener Forschungsgruppe beim Einbau eines Detektors in den HERA-Beschleuniger

Auf der Suche nach Neutrinos am Baikalsee

Ein mit russischen Instituten begonnenes Forschungsprojekt zur Entwicklung eines Neutrino-Teleskops, mit dem kosmische Quellen von Neutrinos aufgespürt werden sollen, wird in einem amerikanisch-deutsch-schwedischen Projekt am Südpol, AMANDA-Projekt genannt, fortgesetzt. AMANDA soll uns Vorgänge und Objekte im fernen Weltall erschließen, von denen wir kein sichtbares Licht empfangen, und so ein neues Fenster in den Kosmos öffnen.

Ein neuer Schwerpunkt für DESY-Zeuthen wird die rechnergestützte theoretische Elementarteilchen-Forschung. Hierzu werden speziell auf die anstehenden Probleme ausgerichtete massiv-parallele Rechner genutzt.

Ein großer Teil der wissenschaftlichen Arbeit spielt sich am Rechner ab

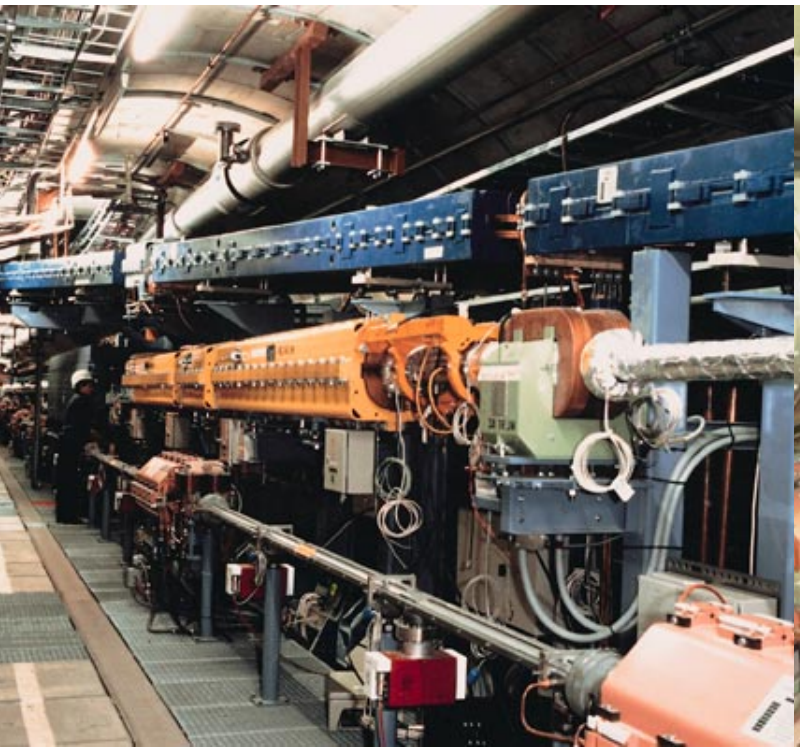
Lehrlinge an einer numerisch gesteuerten Fräsmaschine in Zeuthen

Ausbildung in Zeuthen

Ein besonderes Anliegen von DESY-Zeuthen ist die enge Zusammenarbeit mit Hochschulen, unter anderem mit der benachbarten Fachhochschule Wildau, den 3 Berliner Universitäten und der Universität Leipzig. Außerdem bietet DESY-Zeuthen Ausbildungsplätze für Industriemechaniker und -elektroniker an; dazu wurden eigene Lehrwerkstätten eingerichtet. Für Physiklehrer werden Weiterbildungskurse angeboten, um sie mit dem neuesten Stand der Forschung vertraut zu machen.

Das Luftbild von DESY-Hamburg mit dem eingezeichneten HERA-Ringverlauf vermittelt einen Eindruck von den gewaltigen Ausmaßen der unterirdischen Beschleuniger-Anlage.

Ein Blick in den HERA-Tunnel unter der Erde (links: HERA-West; rechts der östliche Teil)



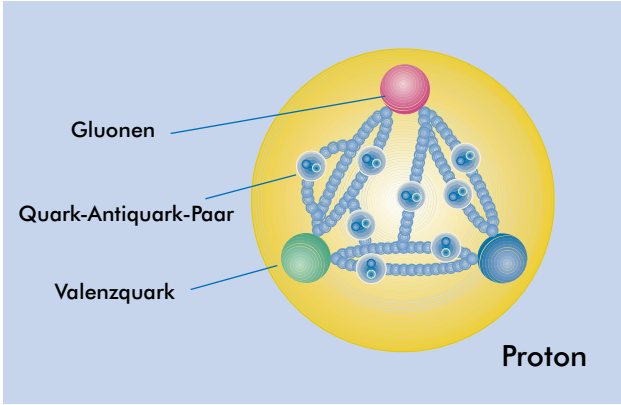
HERA - Das „Super-Mikroskop“

Mit **HERA** in den Sub-Mikrokosmos

Mit dem Teilchenbeschleuniger HERA (Hadron-Elektron-Ring-Anlage) bei DESY in Hamburg, einer der größten und kompliziertesten Maschine, die Menschen je gebaut haben, wollen die Forscher noch weiter in das Innere der subatomaren Welt vordringen. Grundlegende Fragen der Elementarteilchenphysik bedürfen der Klärung: Wie sind Protonen wirklich aufgebaut? Enthalten die Quarks noch kleinere Teilchen? Gibt es Phänomene, die nicht ins Standardmodell der Teilchenphysik passen? Erste Ergebnisse zeigen, daß sich im Proton sehr viel mehr Teilchen tummeln als bisher vermutet; hier werden wir wahrscheinlich noch einige Überraschungen erleben.

Das Geheimnis des Protons

Seit einigen Jahren ist bekannt, daß die Eigenschaften des Protons vor allem durch drei Quarks, sie werden als Valenzquarks bezeichnet, in seinem Inneren bestimmt werden. Die Träger der starken Kraft, die Gluonen, halten sie zusammen. Die Gluonen sind dabei so zahlreich, daß sie gleichsam einen See darstellen, in dem die Valenzquarks schwimmen. Aufgrund der quantenmechanischen Unschärfe-Relation können sich die Gluonen für extrem kurze Zeit in Quark-Antiquark-Paare verwandeln. Das bedeutet, daß bei den Elektron-Proton-Kollisionen, wie sie mit HERA erzeugt werden, die aufprallenden Elektronen nicht nur die Valenzquarks abtasten, sondern ebenso den See von Materie und Antimaterie im Innern des Protons - und damit, wenn auch eher indirekt, die Gluonen.



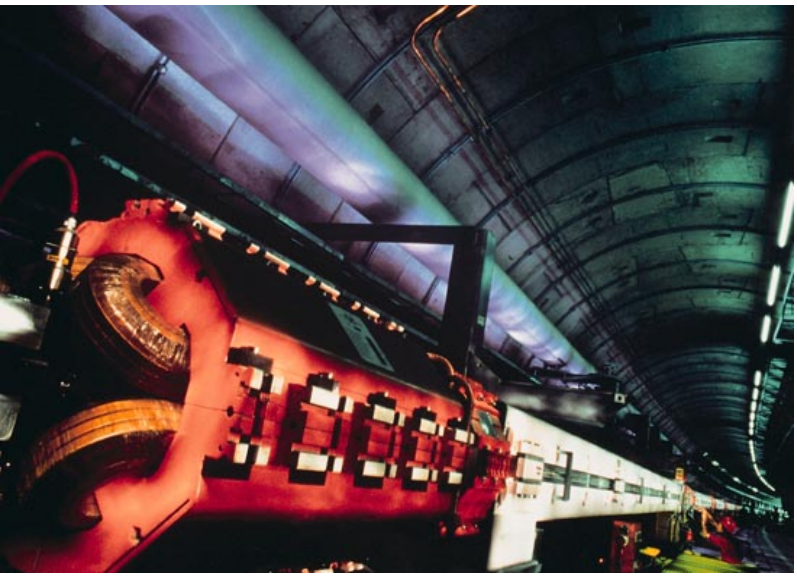
Momentaufnahme vom Innenleben des Protons (stark schematisiert):

Im Proton gibt es drei „Valenzquarks“, die durch den Austausch von Gluonen aneinander gebunden sind. Die Quantentheorie erlaubt den Gluonen, sich für kurze Zeit in Quark-Antiquark-Paare zu verwandeln. Das Proton enthält somit Valenzquarks, Gluonen und zusätzlich sehr viele, kurzlebige Quark-Antiquark-Paare.

Das Auge HERA

HERA stößt in ein neues Territorium der Physik vor. Zum ersten Mal werden Elektronen und Protonen in zwei verschiedenen Ringen gespeichert und zur Kollision gebracht. Auf diese Weise läßt sich eine Schwerpunktsenergie von 300 GeV erreichen - über 10mal mehr als bisher. Mit HERA erkennt man Strukturen von weniger als 10^{-16} cm - das ist ein Tausendstel des Protonendurchmessers. Außerdem wird ein neuer Bereich der „kleinen x-Werte“ erschlossen; x gibt den Impulsanteil eines getroffenen Quarks oder Gluons am Gesamtimpuls des Protons an. Gegenüber früheren Experimenten kann HERA den erforschbaren Bereich von x um den Faktor 1000 auf 10^{-5} verkleinern.

Damit ist es möglich, die Quantenchromodynamik (QCD) in ganz neuen kinematischen Bereichen zu testen. Die QCD ist die Theorie der starken Wechselwirkung und beschreibt das Zusammenspiel der Quarks und Gluonen, die Kräfte zwischen ihnen und auch die Kräfte innerhalb des Atomkerns. Die QCD ist aber bei weitem noch nicht so gut erforscht wie etwa die elektromagnetische Theorie. Die Messungen an HERA überprüfen einen neuen Aspekt der QCD und sind deshalb von größtem Interesse für die Physik.



Blick in den HERA-Tunnel. Deutlich zu erkennen sind die hellen supraleitenden Ablenkmagnete des Protonenbeschleunigers. Links daneben liegt die Heliumtransferleitung, welche die supraleitenden Komponenten von HERA mit -268,7°C kaltem Helium versorgt. Unterhalb des Protonenbeschleunigers steht der Elektronenbeschleuniger. Seine rötlichen Ablenk- und Fokussierungsmagnete sind normalleitend.

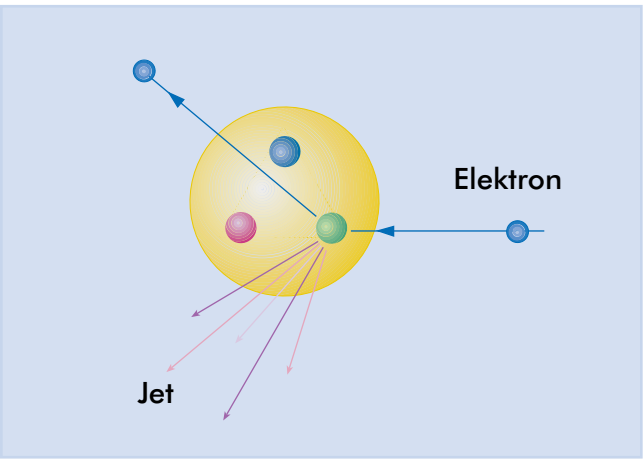
H1 und ZEUS - die Kollisionsforscher

An zwei Stellen im HERA-Ring kreuzen sich der Elektronen- und der Protonenstrahl. In den meisten Fällen passiert dabei so gut wie nichts. Wie zwei aufeinandertreffende Mückenschwärme durchdringen sich die Teilchenpakete. Nur bei jeder zehnmillionsten Begegnung gibt es einen Volltreffer: Ein Elektron stößt frontal auf ein Quark (oder Antiquark) im Proton.

Zur genaueren Untersuchung der Teilchenkollisionen haben Forscherteams aus insgesamt 19 Ländern zwei Experimentieranlagen für HERA entwickelt und aufgebaut. Diese beiden häusergroßen Detektoren H1 und ZEUS messen nahezu alles, was man über die auseinanderfliegenden Reaktionsprodukte der Kollisionen erfahren kann: Wohin ist das Elektron mit welcher Energie gestreut worden? Welche Energie haben die Teilchen, die aus den getroffenen Quarks entstanden sind? In welche Richtung bewegt sich der Strahl von neuen Teilchen?

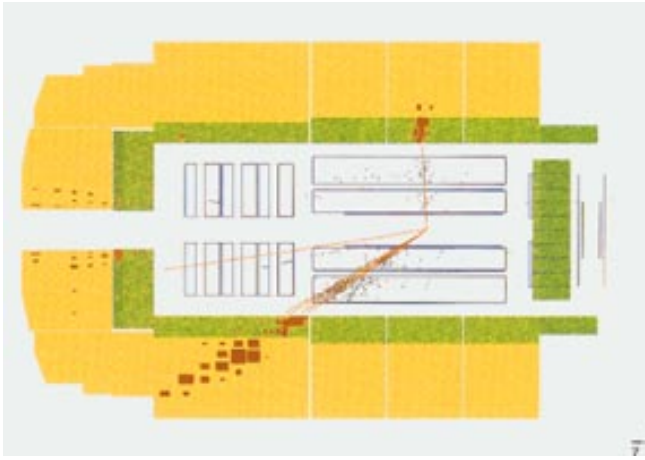
Das Forschungsprogramm am Teilchenbeschleuniger HERA hat verschiedene, sich ergänzende Schwerpunkte:

- Die Untersuchung der inneren Struktur des Protons.
- Die Erweiterung unseres Verständnisses der fundamentalen Kräfte und damit der Wechselwirkung zwischen den Bausteinen der Materie.
- Die Aufklärung des Mechanismus für die Verletzung der Raum-Zeit- und Teilchen-Antiteilchen-Spiegelungssymmetrien der Naturkräfte („CP-Verletzung“).
- Die Suche nach noch unbekannten Teilchen und /oder neuen fundamentalen Kräften.



In einem frontalen Stoß schlägt das Elektron ein Quark aus dem Proton. Dabei wird das Elektron abgelenkt.

Die aus der übertragenen Energie neu gebildeten Teilchen fliegen in Richtung des gestoßenen Quarks.

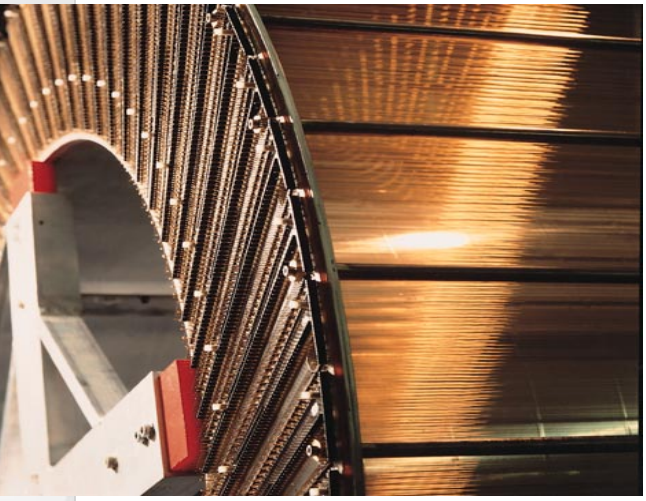


Ein „Ereignisbild“ eines Elektron-Proton-Zusammenstoßes bei HERA

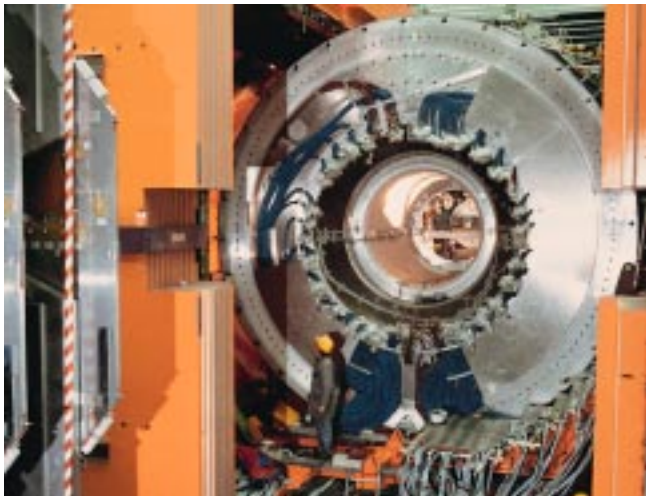
High-Tech aus Zeuthen

Die Experimente an dem HERA-Ringbeschleuniger in Hamburg spielen im Forschungsprogramm von DESY-Zeuthen eine zentrale Rolle. Arbeitsgruppen aus Zeuthen sind an den vier gegenwärtig in Hamburg laufenden Experimentierprogrammen beteiligt. Die aufgezeichneten Meßdaten werden aufbereitet, analysiert, statistisch ausgewertet und mit Unterstützung der theoretischen Physiker auf ihre physikalischen Aussagen hin untersucht und interpretiert.

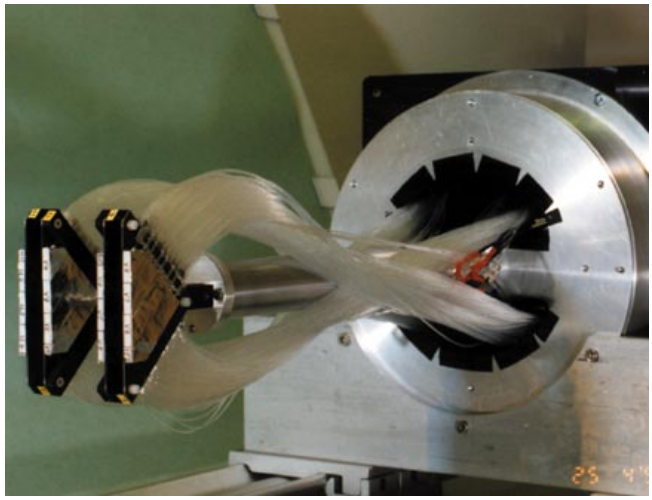
Seit Beginn des Forschungsprogramms mit den Experimenten H1 und ZEUS im Sommer 1992 wurde die Leistung der Detektoren und der Speicherringe von HERA stetig verbessert. Um die Effizienz und die Meßgenauigkeit zu erhöhen, aber auch um weitere, im Laufe der Forschungsarbeiten neu aufgeworfene Fragestellungen zu untersuchen, werden immer wieder Ergänzungen und Verbesserungen der Detektoren notwendig.



So entschloß man sich im Fall des H1- Detektors zum Bau eines besonderen Spektrometers für Teilchen in Vorwärtsrichtung, das heißt in Richtung des Protonenstrahls. Dieses Vorwärts-Spektrometer erlaubt die genaue Untersuchung der „Trümmer" eines Protons, die übrigbleiben, nachdem durch das auftreffende Elektron ein Quark aus dem Proton herausgestoßen worden ist.



Gewaltige Ausmaße nimmt der ZEUS-Detektor von HERA an (rechts)



Szintillations-Faser-Detektor für das Vorwärts-Spektrometer des H1-Detektors

Zylindrische Driftkammer eines Detektors

Für den Bau eines solchen Spektrometers war das Zeuthener Institut aufgrund seines seit 1988 bestehenden Forschungsprogramms zur Entwicklung von räumlich und zeitlich hochauflösenden Detektoren aus szintillierenden Fasern besonders prädestiniert. Bei dieser Detektor-Technologie werden in lichtleitende Kunststofffasern Substanzen eingebracht, die in extrem kurzer Zeit nach dem Durchgang eines Teilchens Licht aussenden. Hochempfindliche Nachweisgeräte, Elektronenvervielfacher oder Photosensoren genannt, fangen die schwachen Lichtblitze auf und wandeln sie in elektrische Signale um. Auf diese Weise wird der Ort und die Zeit eines Teilchendurchgangs mit großer Genauigkeit bestimmt. Die Eigenschaften szintillierender Fasern sind auch für andere Forschungsbereiche interessant. So halfen die bisher erzielten Erkenntnisse aus der Teilchenphysik schon bei Entwicklungen und ersten Anwendungen in der Therapie von Tumoren des Auges.

Ein Blick in das Innere des Kalorimetergehäuses von H1(oben)

Der Blick in das Innere des ZEUS-Detektors zeigt einen Ausschnitt der gesamten Apparatur, die die Größe eines Zweifamilienhauses hat. Im Zentrum des Zylinders prallen Elektronen mit sehr hoher Energie auf Protonen. Dabei entstehen neue Teilchen, die im Innern des Zylinders mit empfindlichen Sonden sichtbar gemacht werden. (rechtes Bild)

Der H1-Detektor während des Zusammenbaus (linkes Bild)

Halbleitertechnologie

Zur weiteren Verbesserung der Meßgenauigkeit und Erschließung neuer Beobachtungsmöglichkeiten wurde für den Detektor H1 zusätzlich ein Silizium-Spurdetektor in Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt und gebaut. Silizium (Si) ist das Halbleitermaterial, aus dem Transistoren und integrierte Schaltungen hergestellt werden. Für die Herstellung der Si-Strukturen des Detektors, in denen beim Durchgang eines Teilchens ein elektrisches Signal entsteht, wird die gleiche Technologie verwendet wie für die Fertigung von integrierten Schaltungen. Auf diese Weise lassen sich äußerst feine, beispielsweise streifenförmige Strukturen auf Si-Scheiben herstellen, mit denen die Bahnen hindurchfliegender Teilchen sehr exakt - etwa 0,01mm genau, das ist ein Fünftel eines Haardurchmessers - bestimmt werden können.

Außer den Arbeiten zur Detektorentwicklung befassen sich die Wissenschaftler in Zeuthen intensiv mit der Analyse der in den Messungen an HERA aufgezeichneten Daten. Das Ziel ist, den Aufbau der Nukleonen aus den Quarks und Gluonen im einzelnen „auszuleuchten" und herauszufinden, ob er sich im Rahmen der QCD-Theorie verstehen läßt. Möglicherweise stößt man dabei auf etwas ganz Unerwartetes.

Erste Ergebnisse der HERA-Experimente H1 und ZEUS

Das Proton hat eine sehr komplexe innere Struktur: Die drei Valenzquarks sind von einer großen Zahl niederenergetischer Gluonen und ständig entstehender und wieder vergehender Quark-Antiquark-Paare umgeben.

Außerdem entdeckte man das „Doppel-Gesicht" der Photonen. Zum einen besitzen sie die Eigenschaften von Lichtquanten, zum anderen können sie sich mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auch wie eine Wolke von Quarks und Gluonen verhalten.

Schließlich wurde der schon lange ausstehende direkte Nachweis erbracht, daß die bisher stets als punktförmig erscheinende schwache Wechselwirkung, eine der vier fundamentalen Naturkräfte, tatsächlich eine endliche Reichweite hat und sich damit in den Rahmen der übrigen Naturkräfte einfügt.

HERMES
und das Spinrätsel des Protons

Der Bau von Driftkammern zur Erkennung der Teilchenspuren und der Messung der Teilchenimpulse für das HERMES-Spektrometer war ein höchst diffiziles Geschäft. Im Lichtkegel der Taschenlampe reflektieren nur die dickeren Drähte; die feineren sind mit bloßem Auge kaum zu sehen.

Jede Driftkammer wird sorgfältig getestet, bevor sie in den HERMES-Detektor eingebaut wird.

Für das Verhalten der Elementarteilchen ist ihr Eigendrehimpuls, den man auch Spin nennt, von grundlegender Bedeutung. Alle Bausteine der Materie sind damit ausgestattet. Mit der Kernspinresonanz-Tomographie findet der Spin des Protons bereits eine praktische Anwendung in der medizinischen Diagnostik. Aber wie er zustande kommt, ist ungeklärt.

Bis vor einigen Jahren glaubte man verstanden zu haben, wie sich der Spin aus den Drehimpulsen der drei Valenzquarks, die die Eigenschaften des Protons und Neutrons im wesentlichen festlegen, zusammensetzt. Doch neuere Experimente haben daran Zweifel aufkommen lassen: Die drei Quarks tragen nur etwa 30 % des Spins. Woher der Rest des Eigendrehimpulses des Protons und Neutrons stammt, ist plötzlich wieder rätselhaft geworden.

Das HERMES-Experiment

Seit 1995 arbeitet an HERA ein neuer Detektor. Er soll das Rätsel lösen, wie der Spin des Protons auf die einzelnen Konstituenten verteilt ist, welchen Anteil die Gluonen und die Quark-Antiquark-Paare übernehmen. Das Experiment beruht auf folgendem Prinzip: Die Wucht eines Elektron-Quark-Stoßes hängt davon ab, ob ihre Spins parallel oder antiparallel zueinander gerichtet sind. Dieser Unterschied sollte mit HERA besonders gut herauszufinden sein, da die Elektronen in HERA durch die Abstrahlung von Synchrotronlicht transversal polarisiert werden; bei bis zu 70 % der Elektronen lassen sich die Spins alle in dieselbe Richtung drehen. Im HERMES-Detektor trifft dieser Strahl dann auf eine Gaszelle, die polarisiertes Helium oder Wasserstoff enthält. Die Spins der beiden Reaktionspartner sind damit parallel oder antiparallel zueinander ausgerichtet. Nun kann untersucht werden, inwieweit die Spinrichtung jedes getroffenen Quarks mit derjenigen des Helium- oder Wasserstoffkerns übereinstimmt. Dieser Versuch könnte so schließlich das Geheimnis um den Protonenspin lüften.

Driftkammern aus Zeuthen

Zeuthener Wissenschaftler sind seit Anbeginn am HERMES-Experiment dabei. Heute beteiligen sich 29 Gruppen von Instituten und Universitäten aus 10 Ländern. Zusammen mit Forschern der Universität Erlangen-Nürnberg und des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg übernahm Zeuthen den Entwurf, Bau, Test, Einbau und Betrieb der Driftkammern, einer der größten Teile des HERMES-Detektors.

Vorsichtig wird ein Driftkammermodul in den HERMES-Detektor eingesetzt.

Mit diesen Driftkammern werden die nach der Kollision mit den ausgerichteten Atomkernen des Targets abgelenkten HERA-Elektronen aufgespürt; ihre Ablenkwinkel und Impulse können bestimmt werden. Dazu wird die Flugbahn vor und nach dem Passieren eines starken Magnetfelds exakt vermessen.

Ein Kranz von jeweils 12 doppelten Szintillationszählern, die in Photonenelektronenvervielfacher münden. Er gehört zum Testaufbau eines HERA-Experiments.

Im Prinzip ist die Driftkammer ein dünnwandiger Kasten, ca. 4 m lang, 1 m breit und 20 cm tief, der ein spezielles Gasgemisch und einige tausend haarfeine, in verschiedenen Richtungen gespannte Drähte enthält. Die Drähte sind abwechselnd mit einer Hochspannungsquelle und mit Verstärkern und Meßelementen verbunden. Durchquert ein elektrisch geladenes Teilchen diese Kammer, so kollidiert es mit Gasatomen. Die dabei freigesetzten schwachen elektrischen Ladungen „driften“ - gelenkt von Hochspannungsfeldern - zu den mit der Meßelektronik verbundenen Drähten, wobei ihre Ankunftszeit und ihre Stärke exakt registriert werden. Alle Signale zusammen werden von schnellen Rechnern ausgewertet. So ist die Flugbahn jedes Teilchens auf etwa 0,1 mm genau rekonstruierbar - und dies viele tausendmal in der Sekunde. Damit ist die Kammer das wesentliche Instrument für die präzise Rekonstruktion der Bahn eines gestreuten Elektrons.

Parallel zur Entwicklung und zu den Tests der Driftkammern mußten natürlich auch betriebsgerechte Rechnerprogramme entwickelt werden, die eine äußerst genaue Auswertung der Daten erlauben.

Wo stehen wir?

Die bisherigen Messungen im Rahmen des HERMES-Experiments haben den geringen Anteil der Quarks am Spin des Protons und des Neutrons bestätigt. Es gelang jedoch bislang nicht zu klären, wie der Rest des Drehimpulses entsteht. Haben möglicherweise die Gluonen einen sehr großen Beitrag daran? Oder gibt es größere Rotationsbewegungen im Innern des Protons und Neutrons? Weitere, sehr schwierige Messungen sind nötig, um diese Fragen befriedigend zu beantworten.

HERA-B
Wie symmetrisch ist die Welt?

Die Tatsache, daß das Universum nahezu ausschließlich aus Materie besteht und Antimaterie so gut wie nicht vorkommt, stellt die Elementarteilchenphysik vor eines ihrer größten Probleme. Denn alle Simulationen des Urknalls an den Teilchenbeschleunigern führten stets zur exakt gleichen Anzahl von Teilchen und Antiteilchen. Diese Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie hängt eng mit der Symmetrie zwischen rechts und links und der Umkehr der Zeitrichtung zusammen; die Physiker nennen sie „CP-Symmetrie".

Erstmals 1964 wurde eine ganz kleine Verletzung der Teilchen-Antiteilchen- oder CP-Symmetrie (damit implizit auch der T(Zeit)-Symmetrie) beobachtet; und zwar bei Experimenten mit K-Mesonen. Weshalb aber nur bei diesen, relativ seltenen und seltsamen Teilchen? Enthalten sie etwa den Schlüssel zur Entstehung der Materie? Um die CP-Verletzung zu verstehen, ist es unumgänglich, dieses Phänomen auch in anderen Teilchenzerfällen zu suchen. Den Schlüssel zum Verständnis der CP- und damit der Materie-Antimaterie-Asymmetrie vermutet man heute in der heißen Anfangszeit des Universums. Das war die Zeit, als die schweren Quarks der zweiten und dritten Familie einen wesentlichen Teil der Materie stellten. Bei den zweitschwersten Quarks, den b-Quarks, sollte man dann eine signifikante Abweichung von der Quark-Antiquark-Symmetrie finden.

Eine Driftkammer für das HERA-B-Experiment wird gebaut.

Die Suche nach einer CP-Verletzung bei den b-Quarks wird deshalb weltweit mit großem Nachdruck verfolgt. In den USA und in Japan werden neue Beschleuniger eigens zur Klärung dieser Fragen gebaut. HERA ist hierfür ebenfalls geeignet, da sich mit Protonenbeschleunigern wie HERA b-Quarks und B-Mesonen, die aus b-Quarks aufgebaut sind, erzeugen lassen.

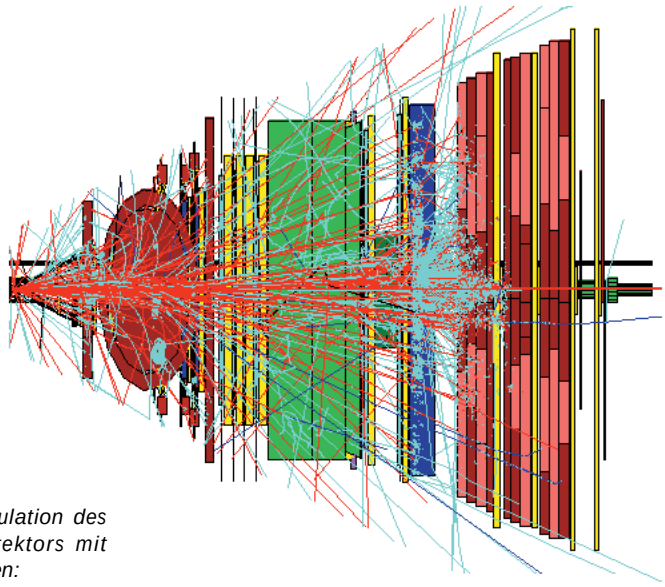
In dem geplanten „HERA-B-Experiment" sollen die B-Mesonen durch Wechselwirkung von Protonen mit einem Target in großer Zahl erzeugt und in einem Spektrometer nachgewiesen werden. Die Schwierigkeit hierbei liegt in den enormen Anforderungen an den Detektor. Denn er muß in der Lage sein, die B-Mesonen wirksam aus einem milliardenfach höheren Untergrund anderer Teilchen herauszufiltern.

CP- und T- Symmetrie

Symmetrien (Invarianzen) gehören in den Konzepten und Theorien der Physik zu den Grundprinzipien. Vor allem die Invarianz unter der „Ladungskonjugation“ C (Änderung aller Teilchen in Aniteilchen und umgekehrt), die Invarianz unter der „Paritätsoperation“ P (Spiegelung aller Raumkoordinaten) und die Invarianz bei der Umkehr der Zeit (T-Symmetrie) sind hier zu nennen. Ein allgemeines Theorem der Quantenfeldtheorie besagt, daß alle Wechselwirkungen invariant sind unter der sukzessiven Anwendung der drei Symmetrieoperationen C, P und T.

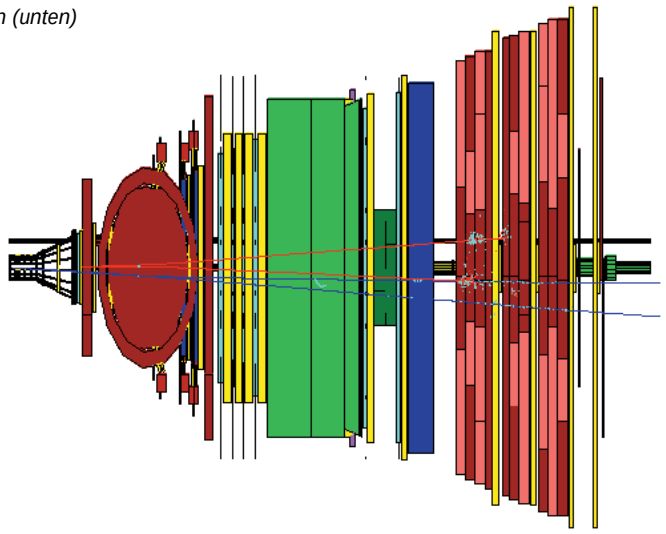
CP-Symmetrie ist deshalb im wesentlichen gleichbedeutend mit Zeitumkehr (T)-Symmetrie, welche besagt, daß physikalische Prozesse grundsätzlich ebenso vorwärts wie rückwärts laufen können. Das heißt, die Richtung der Zeit im Mikrokosmos ist nicht festgelegt.

Wäre die CP-Symmetrie exakt gültig, so hätte sich die gesamte Materie und Antimaterie im Weltall gegenseitig vernichtet - statt Materie gäbe es nur Strahlung.



Rechner-Simulation des HERA-B-Detektors mit Teilchenspuren:

HERA-B-Anlage mit voller Teilchenproduktion (oben) und nach der Selektion der interessierenden Teilchen (unten)



Was tut sich in Zeuthen?

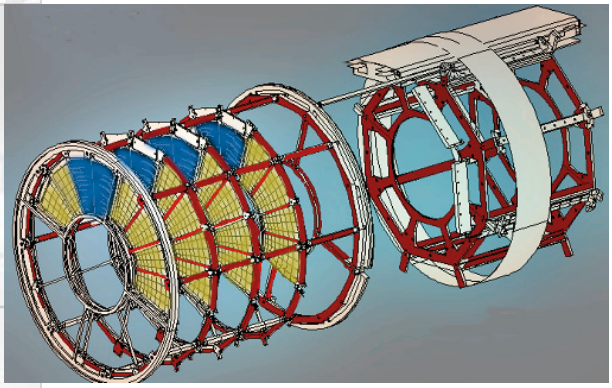
Wissenschaftler und Ingenieure von DESY-Zeuthen arbeiten seit 1992 an der Konzeption und Vorbereitung des HERA-B-Experiments. Für sie stehen dabei, gemeinsam mit der Berliner Humboldt-Universität, verschiedene diffizile Aufgaben an:

- Die Entwicklung und der Bau von vielen Quadratmeter großen Driftkammern, um die Spuren der B-Mesonen aufzufinden (zusammen mit DESY-Hamburg und Instituten in Holland, Rußland und China).
- Die Entwicklung einer „Prozessorfarm“, das heißt eines speziellen Rechnersystems aus 100 oder mehr leistungsfähigen Prozessoren, das die sehr schnelle Rekonstruktion und Filterung von Ereignissen im Echtzeitbetrieb erlaubt.
- Die Erstellung umfangreicher Rechnerprogramme, die die interessanten B-Mesonen-Spuren aus einer Unzahl störender Teilchen herausfiltern. Dabei spielen simulierte Experimente zur Erprobung dieses Vorhabens eine wesentliche Rolle. All dies erfordert jahrelange Vorbereitungen.

High-Tech im Detektorbau

Die Beschleunigerexperimente werfen immer wieder Fragestellungen auf, die neue technologische Anforderungen an die erforderlichen Instrumente stellen. Die häusergroßen Detektoren müssen daher ständig erweitert, umgebaut und den neuen Zielen angepaßt werden.

Beispielsweise wurde im H1-Experiment am Hamburger Speicherring HERA ein Detektorteil mit sehr hoher Orts- und Zeitauflösung benötigt. Zum einen sollte die Meßgenauigkeit verbessert werden, zum anderen waren ganz neue Beobachtungsgelegenheiten möglichst nahe am Wechselwirkungspunkt bei der Elektronen-Protonen-Kollision zu schaffen.



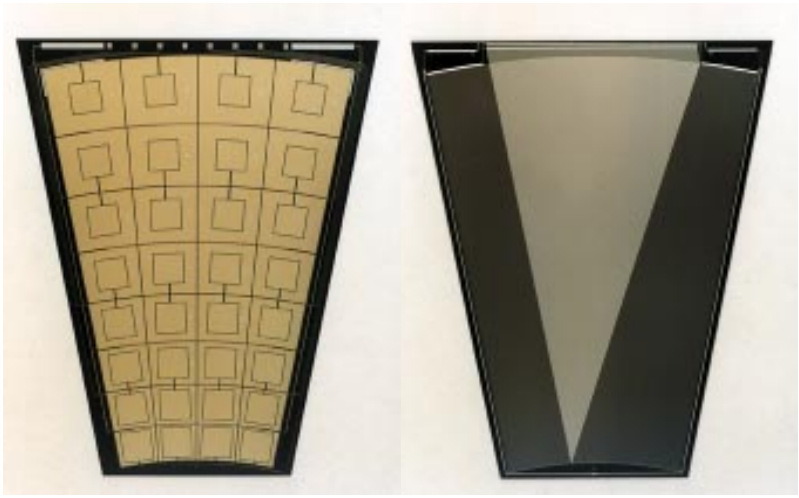
Die Sensoranordnung - eine perspektivische Konstruktionsübersicht. Der Innendurchmesser beträgt etwa 10 cm, der Außendurchmesser 30 cm.

Die Entwicklung eines geeigneten Detektorteils bot vielfältige technologische Herausforderungen, die in enger Zusammenarbeit mit der Industrie und mit Forschungsinstituten in Deutschland, England und Tschechien bewältigt werden konnten.

Eine der Sensor-Ebenen vor dem Einbau in die Trägerstruktur. Das Modul besteht aus Streifen-Sensoren und Hybriden; letztere sind mit elektronischen Bauelementen bestückte Miniatur-Leiterplatten. Die ganze Scheibe soll das Strahlrohr umschließen; sie kann zur Montage in zwei Teile zerlegt werden.

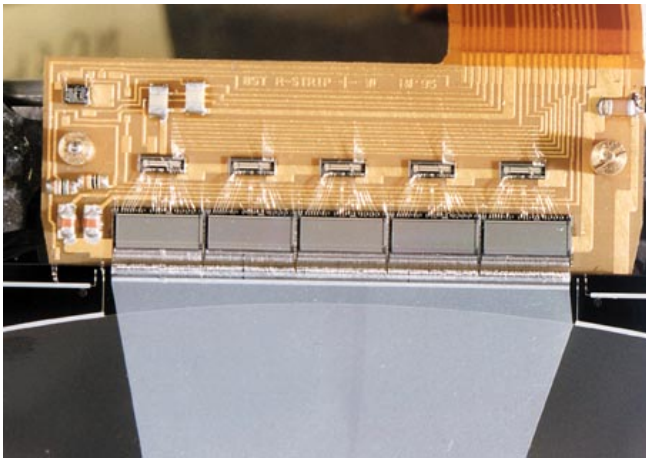
Das neue, das Strahlrohr umschließende Detektorteil besteht aus vier ringförmigen, senkrecht zum Strahlrohr angeordneten Ebenen von Siliziumhalbleitern. Jede Ebene ist mit trapezförmigen, unterschiedlich strukturierten Siliziumscheiben besetzt; dabei unterscheidet man zwischen Flächen-Sensoren (im Bild kariert) und Streifen-Sensoren (schraffiert). Die Flächen-Sensoren zeigen an, wann ein Teilchen durch den Detektor geht. Mit den Streifen-Sensoren wird die Spur des Elektrons, die vom Wechselwirkungspunkt des H1-Detektors kommt, sehr genau vermessen.

Das untere Bild zeigt links die Siliziumscheiben eines Flächen-Sensors; rechts die Oberfläche eines Streifen-Sensors.



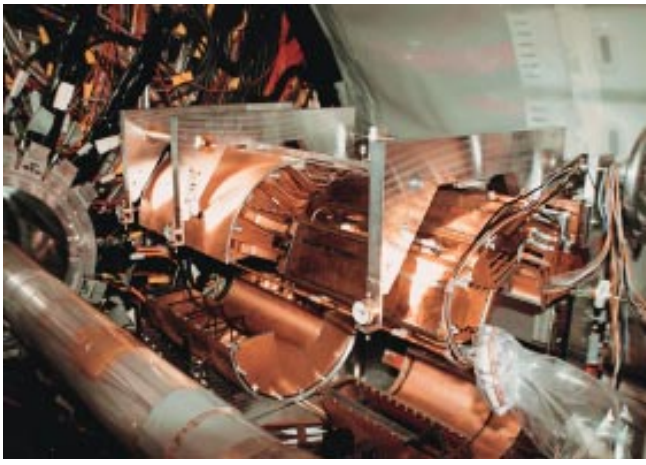
Die Silizium-Scheiben jedes Flächen-Sensors sind in 8 Reihen und 4 Spalten, also 32 Felder unterteilt. Durchquert ein elektrisch geladenes Teilchen diese Scheiben, so wird ein Signal ausgelöst; dieses startet die eigentliche Messung. Auf der Oberfläche der Streifen-Sensoren befinden sich1281 konzentrisch angeordnete, streifenförmige Dioden-Strukturen mit einer Breite von 12 µm (wegen ihrer Feinheit im Bild nicht erkennbar). Jede zweite von ihnen ist mit einer Ausleseelektronik verbunden. Sobald der H1-Detektor den Durchgang eines geladenen Teilchens signalisiert, werden in allen Ebenen die Durchstoßpunkte der Teilchen durch die getroffenen Streifen registriert. Aus deren Koordinaten können dann die Spuren der hindurchgeflogenen Teilchen rekonstruiert werden.

Die erste Auswertung der von einem Streifen-Sensor kommenden Signale erfolgt unmittelbar bei den Dioden-Strukturen in speziellen elektronischen Schaltkreisen, die die ankommenden Signale verstärken, zwischenspeichern und die zeitlich passenden Signale zur Weiterverarbeitung freigeben. Jeder der fünf in dem oberen Bild sichtbaren Halbleiterchips enthält Vorverstärker zur seriellen Auslese von 128 Streifen und mißt nur 3,2 mm mal 6,2 mm. Nachdem die Siliziumstrukturen der Streifen-Sensoren mit speziellen Leiterplatten, den Hybriden, verklebt wurden, muß die Verbindung zwischen den einzelnen Auslesestreifen und der Leiterplatte hergestellt werden. Das geschieht unter dem Mikroskop mit einem „Bonder", einer speziellen Apparatur, die die nur 25 µm dicken Aluminiumdrähte in einem Abstand von 48 µm auf zwei Reihen mit Ultraschall anschweißt.



Streifensensor mit elektronischen Auslese-Chips

Verkleben der Siliziumstrukturen mit dem „Bonder" unter einem Mikroskop



Die Silizium-Sensoranordnung vor dem Einbau in den H1-Detektor. Der untere, hier noch leere Teil der Sensorstruktur ist abgesenkt, so daß sie über das links zu erkennende Strahlrohr gefahren werden kann. Wieder geschlossen wurde sie später in den H1-Detektor geschoben - natürlich ohne die im Bild sichtbare silberfarbige Montagekonstruktion.

Der Mini-Urknall

Der HERA-Beschleuniger ist ein Supermikroskop für das Innerste der Materie. Der Elektron-Positron-Collider LEP des Europäischen Teilchenforschungszentrums CERN bei Genf dagegen ist ein Instrument, mit dem sich die Umwandlung von Energie in Materie und umgekehrt bis zu sehr hohen Energien besonders gut untersuchen läßt. Man kann damit gewissermaßen einen Mini-Urknall erzeugen.

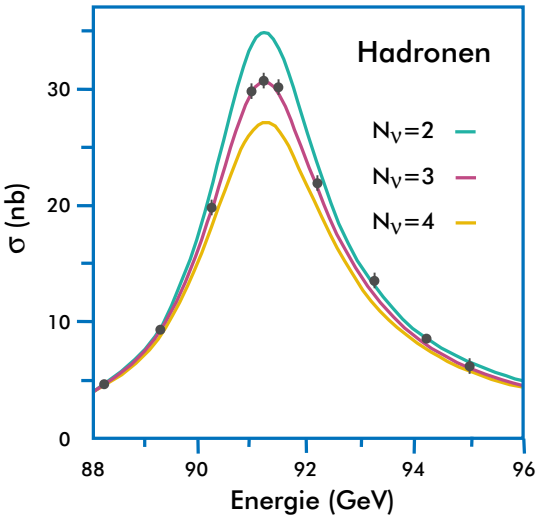
Der LEP-Ring hat einen Umfang von 27 Kilometern. Gebaut wurde er, um eine der fundamentalen Kräfte näher zu erforschen - die schwache Kraft. Diese für die Energieproduktion der Sonne und bestimmte Formen der Radioaktivität verantwortliche Kraft wird wie die anderen Naturkräfte durch sogenannte Austauschteilchen, in diesem Fall sind es die W^+-, W^-- und Z- Bosonen, vermittelt.

Energie und Masse sind äquivalent

Ein GeV, oder Giga-Elektronenvolt, ist eine Energieeinheit, die von Teilchenphysikern auch als Masseeinheit benutzt wird. Nach Einsteins Formel $E = mc^2$ sind Masse (m) und Energie (E) äquivalent (c ist die Geschwindigkeit des Lichts). Teilchenphysiker geben darum die Masse eines Teilchens in Giga-Elektronenvolt (GeV) an. Ein GeV ist die Energie, die man auf sehr kleinem Raum konzentrieren muß, um ein Proton zu erzeugen; sie beträgt etwa 1/1000 der kinetischen Energie einer Fliege.

Wenn Teilchen mit hoher Energie miteinander kollidieren, kann ein Teil dieser Energie in Masse umgewandelt werden, so daß neue Teilchen entstehen. Nach diesem Prinzip ist es bei LEP möglich, die sehr masse- und energiereichen W- und Z-Bosonen zu erzeugen.

Die Punkte des Graphen zeigen die Zahl der Z-Bosonen, die bei unterschiedlichen Energien erzeugt wurden. Die verschiedenen Kurven sind Vorhersagen für zwei, drei und vier Familien von Materieteilchen. Es zeigt sich, daß die rote Kurve als Vorhersage für drei Familien den Daten genau entspricht.



Aus drei Familien entstand die Welt

In einer ersten Phase bis Herbst 1995 wurden mit LEP Elektronen- und Positronenstrahlen gegenläufig auf etwa 45 GeV beschleunigt und zur Kollision gebracht. Diese Energie ist gerade hoch genug, um Z-Bosonen zu erzeugen.

Ende 1995, nachdem über 15 Millionen Z-Teilchen beobachtet worden waren, konnte die Masse des Z-Teilchens zu 91,1884 ± 0,0022 GeV - ungefähr so viel wie 97 Wasserstoffatome - bestimmt werden, eine der genauesten Messungen der Elementarteilchenphysik.

Die mit LEP gewonnenen Daten ließen eine sehr interessante Aussage zu: Die Natur scheint genau drei Familien von Quarks und Leptonen vorgesehen zu haben, nicht mehr und nicht weniger. Allerdings bestehen alle Dinge, die uns umgeben, wir selbst natürlich eingeschlossen, aus Teilchen, die ausschließlich der ersten der drei Familien angehören. Offenbar waren die zwei anderen Familien, schwerere Kopien der ersten, nur am Anfang des Universums dabei. Warum es aber zu Anfang genau drei Familien gab statt einer einzigen, ist bisher ein Rätsel.

Hoffen auf SUSY

Jede Energieerhöhung eines Teilchenbeschleunigers bringt uns tiefer in den Mikrokosmos und näher zur Entstehung der Welt. Das Standardmodell repräsentiert unseren gegenwärtigen Stand auf der Suche nach einer universellen Theorie. Ein nächster Schritt könnte uns zur „Supersymmetrie“ führen - einer vielversprechenden Idee zur Vereinheitlichung der Kräfte. Hiernach müßte für jede bekannte Teilchenart ein „supersymmetrischer“ Partner existieren. Bisher konnten diese allerdings noch nicht entdeckt werden.

Wie erhalten Teilchen ihre Masse?

Es mag überraschen, daß der so häufig gebrauchte physikalische Begriff Masse bisher überhaupt nicht verstanden ist. Eine mögliche Erklärung gibt der sogenannte Higgs-Mechanismus, benannt nach seinem Erfinder, einem englischen Physiker. Danach ist unser gesamter Raum stets von einem Energiefeld erfüllt. Dieses Energiefeld bremst die Teilchen, wodurch sie Trägheit erhalten und damit Masse. Diejenigen Teilchen, die stärker mit ihm wechselwirken, sind schwerer als die anderen. Denkbar ist, daß so die unterschiedlichen Massen der Quarks und Leptonen erklärt werden können. Mit dem Higgs-Feld sollte ein neues Teilchen, das Higgs-Teilchen, verbunden sein - eine Art Energieschwingung des Vakuums. Doch für ein solches Teilchen konnte bisher noch kein Anzeichen gefunden werden.

Bei einem Empfang stehen viele Personen - das Higgs-Feld - gelangweilt herum. Dies ist der „leere“ Raum. Plötzlich betritt eine bekannte Persönlichkeit - ein Teilchen - den Raum. Sofort scharen sich die Anwesenden um den Prominenten, behindern ihn beim Vorankommen ... und verleihen ihm dadurch träge Masse.

Das Higgs-Feld und die träge Masse - anschaulich gemacht

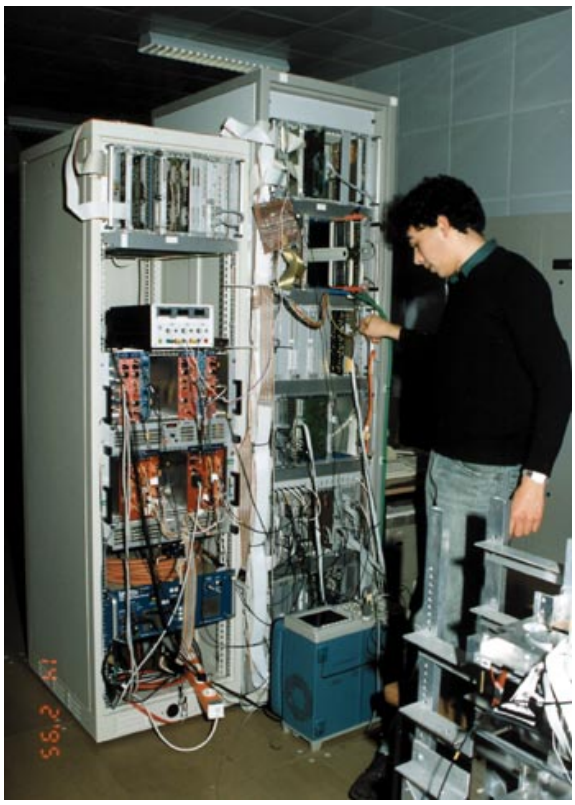
Wie kann man sich die Entstehung eines Higgs-Teilchens vorstellen? Ein Störenfried - die Energie einer Teilchenkollision - ruft eine überraschende Neuigkeit in den Raum. Sofort bilden sich angeregte Diskussionsrunden - die Higgs-Teilchen.

(Quelle: CERN)

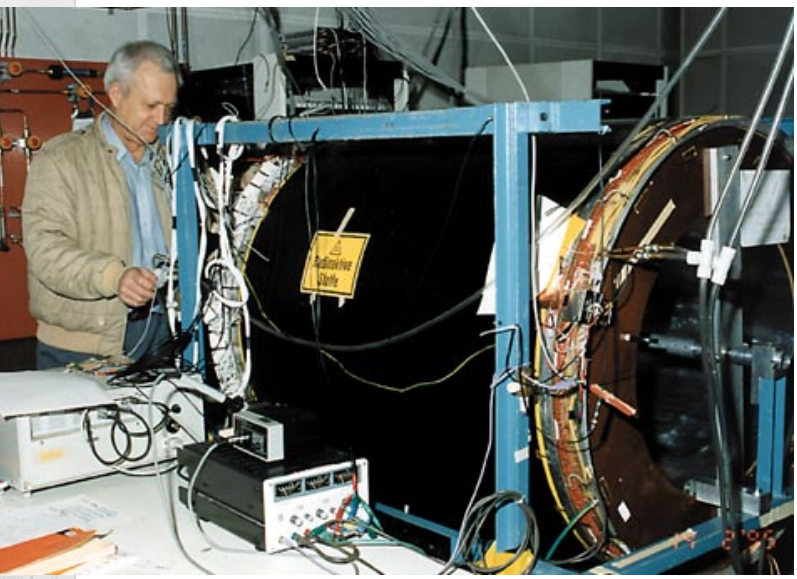
Arbeiten der Zeuthener Gruppe

In der L3-Forschungsgruppe arbeiten nahezu 50 Institute aus verschiedenen europäischen Ländern sowie aus China, Indien und den USA an einem der vier Detektoren des Speicherrings LEP am CERN zusammen, darunter eine Team aus Zeuthen.

Für den Detektor des L3-Projekts kam mit der z-Kammer ein wichtiger Teil des zentralen Spurkammer-Systems aus Zeuthen. Es ist eine zweilagige, zylindrische Drahtkammer mit Elektroden aus 4 mm breiten, ring- und helixförmigen Streifen. Diese werden elektronisch ausgelesen und geben die Koordinaten der Teilchenbahnen in Richtung der Strahlachse. Die Kammer, die Ausleseelektronik mit zugehöriger Software und die Programme zur geometrischen Rekonstruktion der Teilchenspuren wurden in Zeuthen entwickelt.



Die Elektronik für ein neues Detektorteil im L3-Experiment wird in Zeuthen entwickelt und getestet.



Die zylinderförmige Drahtkammer zum Nachweis der Teilchenspuren im L3-Experiment vor dem Einbau in den Detektor.

Um neue Beobachtungsmöglichkeiten für Experimente bei noch höheren Energien zu erschließen, mußten am L3-Detektor Erweiterungen vorgenommen werden. Dazu war der Einbau eines Präzisions-Koordinatendetektors auf der Basis von Silizium-Halbleiter-Material erforderlich. Die Elektronik und die Software für das Datenaufnahmesystem des neuen Detektors wurden in Zeuthen entwickelt.

Eine Hauptaufgabe der Experimente an LEP, wie auch an zukünftigen Beschleunigern, ist die Suche nach den Higgs-Teilchen, dem wichtigsten fehlenden Stück im Elementarteilchen-Puzzle des Standarmodells. Zur Entwicklung optimaler Suchstrategien werden zusammen mit russischen Gastwissenschaftlern sehr detaillierte Berechnungen der Higgs-Teilchen-Erzeugung und der möglichen Störreaktionen über einen weiten Energiebereich durchgeführt. Doch bis heute ist die Suche erfolglos geblieben.

Eisjagd nach Neutrinos

Auf dem Weg zum Neutrino-Teleskop

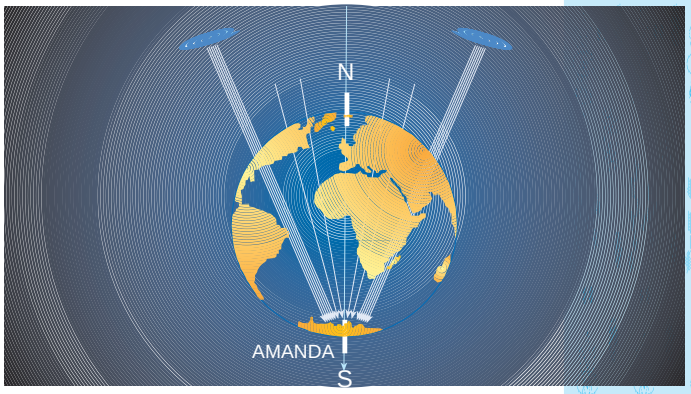
Eines der wichtigen ungelösten Probleme der Astrophysik betrifft den Ursprung der höchstenergetischen kosmischen Strahlen.

Bis in die 50er Jahre spielte die aus dem fernen Kosmos ständig auf uns einfallende Strahlung eine führende Rolle bei der Erforschung der Elementarteilchen - bei wachsender Konkurrenz der Beschleuniger. Viele neue Teilchen wurden in der kosmischen Strahlung entdeckt, so auch das Positron, das Antiteilchen des Elektrons. Die Eigenschaften dieser Teilchen ließen sich jedoch wesentlich genauer untersuchen, als man nicht mehr auf das zufällige Eintreffen von Teilchen aus dem Kosmos warten mußte, sondern die Teilchen an den Beschleunigern in gezielten Experimenten zu beobachten lernte.

Astrophysik in Zeuthen

Die kosmische Strahlung ist für die Teilchenphysik dennoch interessant geblieben. So entwickeln Zeuthener Forscher heute ein Instrument zur Beobachtung der von kosmischen Beschleunigern erzeugten Neutrinos. Diese Untersuchungen heben sich aus dem übrigen Forschungsrahmen bei DESY heraus; sie unterstreichen die enge Beziehung zwischen Elementarteilchenphysik und Astrophysik.

Zeuthener Forscher des „AMANDA"-Projekts am Südpol



Das Prinzip des Neutrinoteleskops mit der Erde als „Filter"

Boten aus dem Kosmos

Zum Auffinden der kosmischen Beschleuniger, viel gewaltiger als die irdischen, bedarf es der Suche nach Teilchen, die in den galaktischen Magnetfeldern nicht abgelenkt werden. Diese Teilchen müssen deshalb elektrisch neutral sein. Die Photonen, die Träger der elektromagnetischen Strahlung, besitzen diese Eigenschaft, aber sie werden leicht absorbiert: durch kompakte Materieansammlungen, die viele kosmische Objekte umgeben, durch Staubwolken, die sich zwischen uns und dem betreffenden Objekt befinden, oder - bei hohen Energien - durch die vom Urknall übriggebliebene Radiostrahlung, in der die kosmische Materie wie in einem Meer schwimmt. Photonen geben uns daher nur ein lückenhaftes Bild. Dieses ließe sich vervollständigen, wenn auch die von kosmischen Beschleunigern erzeugten Neutrinos, ebenso elektrisch neutral, untersucht werden könnten. Die Neutrinos geben Zeugnis von Vorgängen im Universum, die weder mit normalen Fernrohren noch mit Radioteleskopen oder Satelliten zugänglich sind.

Kosmische Strahlung

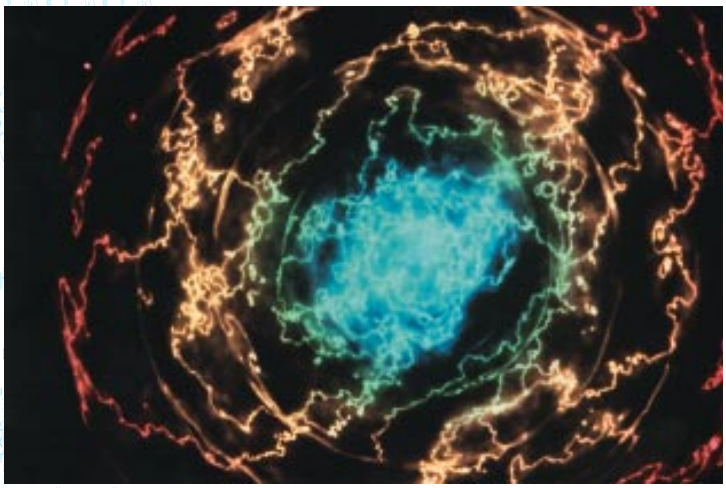
Höchstenergetische kosmische Strahlung besteht aus Protonen, leichten und schweren Atomkernen, deren Energien bis zu 10^{12} GeV reichen. Die größten Teilchenbeschleuniger auf der Erde, in Hamburg, Genf und bei Chicago, katapultieren Protonen auf gerade ein Milliardstel dieser Energie, auf ca. 1 TeV (=1000 GeV).

Kosmische Beschleuniger als Teilchenquellen

Die Quellen von Teilchen mit Energien bis zu 100 TeV können zum Beispiel die Pulsare sein. Sie sind schnell rotierende kompakte Neutronensterne, die eine expandierende Supernovahülle von innen mit Protonen bombardieren.

Zu den kosmischen Teilchenbeschleunigern gehören ebenso Doppelsternsysteme aus einem Neutronenstern und einem Normalstern. In solchen Systemen wird Materie vom Normalstern abgesaugt und in Form einer riesigen Scheibe um den Neutronenstern gewirbelt. In den gigantischen elektromagnetischen Feldern in der Nähe des Neutronensterns werden die Teilchen auf höchste Energien gejagt.

Noch gewaltiger sind die Wirbel, die sich um die kompakten Kerne „aktiver" Galaxien aufbauen. In ihnen, oder in einem der von solchen Kernen häufig ausgehenden gigantischen Jets, können Teilchen bis auf höchste Energien beschleunigt werden.



Was sind Neutrinos?

Neutrinos sind elektrisch neutrale Elementarteilchen aus der Gruppe der Leptonen. Sie sind möglicherweise ebenso masselos wie Photonen. Ihre bemerkenswerteste Eigenschaft besteht jedoch in ihrer geringen Neigung, mit der Umgebung in Wechselwirkung zu treten.

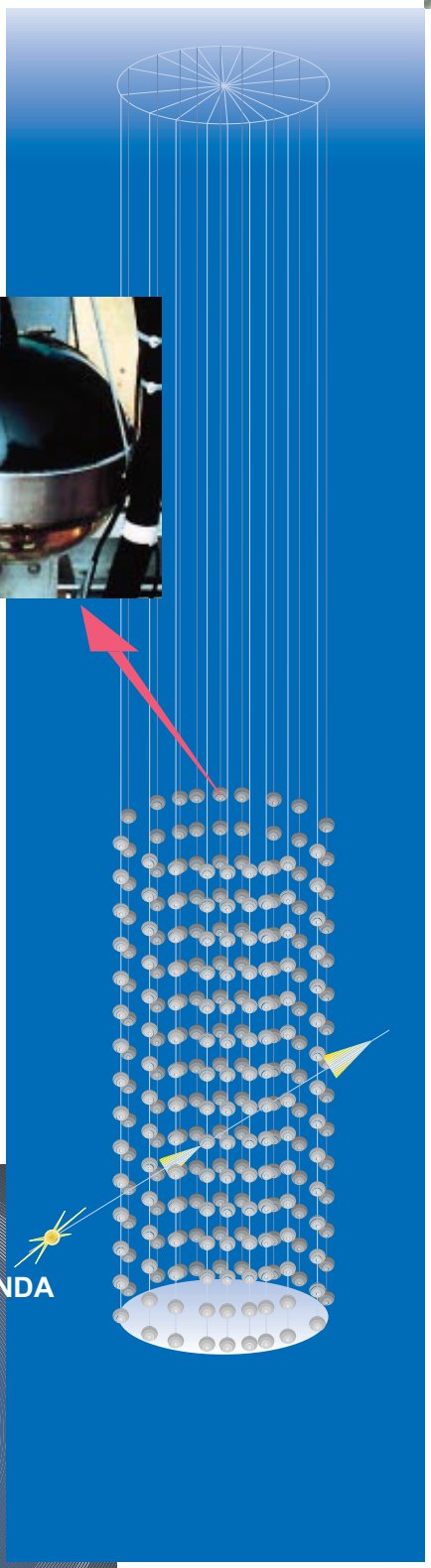
Man schätzt, daß auf der Erde eine Fläche von der Größe einer Fingerkuppe in jeder Sekunde von etwa 65 Milliarden Neutrinos, die bei den energieerzeugenden Prozessen der Sonne entstehen, durchdrungen wird. Der Mensch ist also pausenlos einem unvorstellbaren Bombardement dieser Teilchen ausgesetzt. Allerdings scheinen die Neutrinos weder Mensch noch die gesamte Erdkugel überhaupt wahrzunehmen - deshalb sind sie auch völlig harmlos. Erst eine Wand von 1000 Lichtjahren (rund 10 000 000 000 000 000 km) Blei könnte ein solches Neutrino wirksam aufhalten.

Wie fängt man Neutrinos?

Die Reaktionsfreudigkeit der Neutrinos nimmt zu, so wie ihre Energie wächst. Im Energiebereich von ungefähr 1TeV prallt schon jedes hundertste Neutrino, das die Erde durchquert, mit einem Atomkern der Erde zusammen.

Bei einer solchen Kollision verwandelt sich das Neutrino häufig in ein Myon, eine Art schweres Elektron. Dieses Myon übernimmt den größten Teil der Energie des Neutrinos und fliegt in die nahezu gleiche Richtung weiter. Die Myonen werden relativ wenig von Materie abgebremst, viel weniger als ihr leichter Bruder, das Elektron, das schon nach wenigen Metern steckenbleibt. Wenn ein Myon seine Bahn durch Wasser oder Eis zieht, strahlt es einen Lichtkegel ab, ähnlich dem Überschallkegel eines Düsenflugzeugs. Auf dieses schwache bläuliche Leuchten - nach seinem Entdecker Cherenkov-Licht genannt - lauern die Lichtsensoren der Forscher.

Die geplanten Neutrino-Teleskope sollen aus einer Vielzahl von Lichtsensoren, sogenannten Photovervielfacherröhren, bestehen. Sie fangen das Cherenkov-Licht auf und wandeln die winzigen Lichtblitze in elektrische Signale um. Die Photosensoren befinden sich in druckfesten, 25-60 cm großen Glaskugeln. Sie überspannen im Eis oder Wasser gitterförmig ein möglichst großes Volumen. Die Sensoren registrieren die relative Ankunftszeit und die Stärke eines Lichtblitzes. Aus dem Vergleich der Ankunftszeiten an den verschiedenen Sensoren berechnet man zunächst die Lage des Lichtkegels, daraus die Bahn des Myons und aus dieser schließlich die Richtung des Neutrinos. Die Position der Neutrinoquelle am Himmel ist damit gefunden.



Das Prinzip des Neutrino-Teleskops: Ein Neutrino durchdringt die Erdkugel und gelangt von unten in die km-dicke Eiskappe des Südpols. Bei der Kollision mit einem Atom verwandelt es sich in ein Myon, das fast die gleiche Flugrichtung beibehält. Bei seinem Weg durch das Eis bleibt ein Lichtkegel, das Cherenkov-Licht zurück. Photosensoren, die wie Perlen an Schnüren im Eis hängen, erfassen das Licht und wandeln es in elektrische Signale um.

Obiges Detail: Eine der Glaskugeln, die die Lichtsensoren enthalten. Die obere Kugelhälfte ist undurchsichtig, um unerwünschte Signale abzublocken.

Erde & Neutrinoteleskop: Nur Neutrinos können die Erdkugel durchqueren und im Sensor einen Lichtblitz auslösen. Das Neutrinoteleskop beobachtet den Kosmos durch die Erde hindurch.

Die Erde als Filter

Um störende Myonen und andere Teilchen aus Reaktionen der kosmischen Strahlung mit der Erdatmosphäre auszusortieren, fiel den Forschern ein raffinierter Filter ein: Sie berücksichtigen einfach nur Myonen, die von unten kommen. Kein Teilchen außer dem Neutrino ist fähig, die Erdkugel zu durchqueren. Dringt ein Myon von unten in den Detektor ein, dann muß es mit nahezu absoluter Sicherheit von einem Neutrino erzeugt worden sein.

Der Zeuthener Forschungsbeitrag

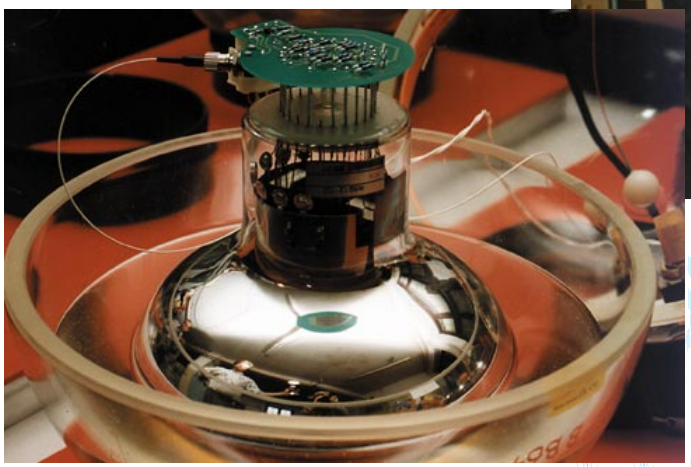
Weltweit gibt es mehrere Vorhaben für den Bau eines letztlich etwa 1 km^3 umspannenden Neutrino-Teleskops. Am weitesten fortgeschritten sind bisher die Projekte BAIKAL und AMANDA, an denen DESY-Zeuthen beteiligt ist.

Der Baikalsee bietet mehrere Vorteile für ein solches Vorhaben. Sein Wasser ist sehr klar. Durch die große Tiefe ist die von oben einfallende kosmische Strahlung auf ein Hunderttausendstel geschwächt. Und im Winter ist er mit einer Eisschicht bedeckt, die als natürliche Plattform die Vormontage und das Verankern der Instrumente im See wesentlich erleichtert.

Russische und Zeuthener Wissenschaftler auf dem zugefrorenen Baikalsee. Sie präparieren einen der ca. 200 Photosensoren, die in den See eingebracht worden sind.

Im Jahr 1993 installierte das Zeuthener Institut zusammen mit russischen Partnerinstituten im Baikalsee das weltweit erste funktionsfähige Teilstück eines zukünftigen Unterwasserteleskops. Diese Anlage enthält inzwischen fast 200 an Trossen befestigte Photosensoren.

Die schwierige wirtschaftliche und politische Lage Rußlands führte allerdings zu Verzögerungen und Unwägbarkeiten beim weiteren Ausbau der Baikalsee-Anordnung. Deshalb hat sich die Zeuthener Gruppe seit 1995 dem AMANDA-Projekt zugewandt.

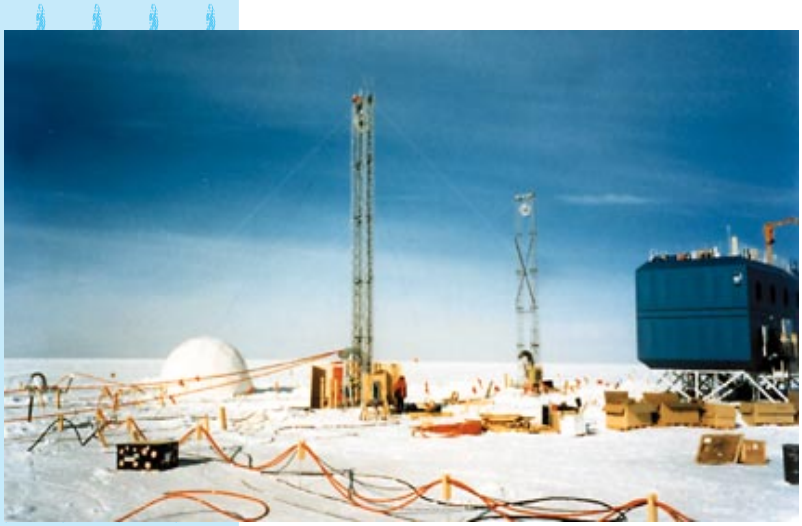


Eine Zeuthener Forschergruppe mit einsatzbereiten Glaskugeln, in denen sich die Photosensoren (linkes Bild) befinden.

AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array) ist ein Projekt, welches das Eis über dem Südpol als Medium für ein zukünftiges großes Neutrino-Teleskop nutzen will. Bereits 1994 installierten die amerikanischen und schwedischen Partner eine Testanordnung in einer Tiefe von 800-1000 m. Hier beeinträchtigen jedoch Luftblasen die Durchsichtigkeit des

Eises. Deshalb wurde 1996 eine neue Testanordnung aus 86 Lichtsensoren, befestigt an vier Trossen, in die Tiefe von 1520-2000 m hinabgelassen. Dies war ein voller Erfolg, denn hier ist die Eisqualität viel besser - Fazit: Ein Neutrino-Teleskop am Südpol ist damit realisierbar. Daraufhin wurde die Anlage 1997 um 216 Photosensoren erweitert. Man hofft, sie über mehrere Jahre schrittweise bis auf ein Gesamtvolumen von etwa 1 km^3 ausbauen zu können.

Die Zeuthener Forscher befassen sich hierbei mit der Entwicklung, dem Bau und dem Test von Lichtsensoren-Anordnungen, von Laserlichtquellen zur Zeiteichung und mit speziellen elektronischen Einrichtungen zur Suche nach Supernova-Ausbrüchen, außerdem mit Simulationen der Detektoren und natürlich mit der Auswertung der Meßdaten.



Die Bohranlage zum Einbringen der Photosensoren in das Südpolareis; im Hintergrund ist die Versorgungsstation zu erkennen.

Montage der optischen Sensoren am Südpol

Die benötigten kilometertiefen Löcher in der antarktischen Eiskappe erzielt man mit Bohrvorrichtungen, die heißes Wasser verwenden. In diese Löcher werden dann die Lichtsensoren an Trossen heruntergelassen. Eine ausgefeilte Bohrtechnologie sorgt dafür, daß beim späteren Einfrieren die Sensoren nicht durch den Eisdruck beschädigt werden.

Was kann ein Neutrino-Teleskop sonst noch?

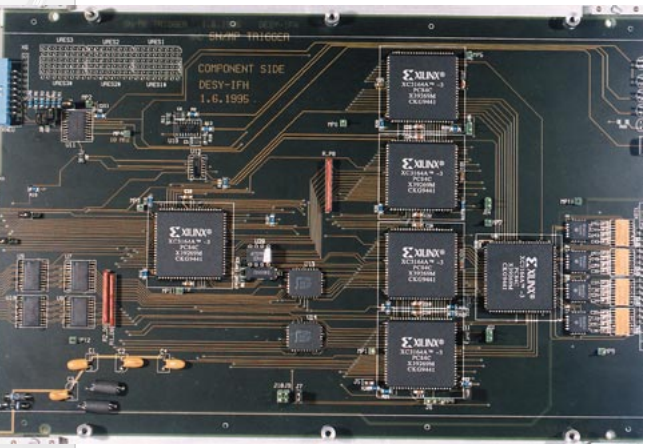
Ein zukünftiges Neutrino-Teleskop verspricht über die astrophysikalische Fragestellung hinaus noch anderweitigen Nutzen. Ein Beispiel ist die Suche nach der kosmischen Dunkelmaterie. Dies ist der Stoff, aus dem vermutlich über neun Zehntel der kosmischen Materie besteht, den aber noch nie jemand direkt nachgewiesen hat. Phänomenal wäre auch das Aufspüren magnetischer Monopole oder von Quarkbällen, bei denen es sich um Relikte aus der Frühphase des Universums handeln könnte. Mit Neutrino-Teleskopen kann man ferner die in der Erdatmosphäre erzeugten Myonen ultrahoher Energie und die Eigenschaften der Neutrinos selbst untersuchen. Außerdem ist denkbar, mit hochenergetischen Neutrinostrahlen aus einem Beschleuniger, die man mit Unterwasserteleskopen nachweist, die Erde wie bei einer Computertomographie zu durchleuchten.

Schließlich gibt es noch einen ökologischen Aspekt: Unterwasserteleskope messen automatisch das Eigenleuchten des Sees oder Ozeans, in dem sie angeordnet sind. Sie eröffnen damit hochinteressante Möglichkeiten, das langfristige Verhalten von Biolumineszenz, Wasserverschmutzung und der Wasserdynamik zu studieren. Die im Eis des Südpols befindlichen Nachweisgeräte können darüber hinaus wichtige Erkenntnisse zur Glaziologie beitragen.

Superrechner simulieren die Realität

Unentbehrliche Werkzeuge der theoretischen Teilchenphysik

Immer kompliziertere Rechnungen sind erforderlich, um die komplexen Prozesse im Mikrokosmos zu verstehen. Wie sieht die starke Kraft aus, die zwischen den Quarks wirkt? Warum treten Quarks nie einzeln in der Natur auf?



Wo herkömmliche mathematische Verfahren versagen, helfen Simulationsrechnungen. Die Modellierung von äußerst vielschichtigen Vorgängen durch Rechenoperationen wird heute in vielen Forschungsbereichen eingesetzt. Mit ihrer Hilfe kann man nicht nur das Wettergeschehen, sondern auch die Reaktionen einzelner Elementarteilchen theoretisch nachbilden. Dieser vielversprechende und bereits erfolgreich beschrittene Weg trägt immer mehr dazu bei, die Prozesse in der Elementarteilchenwelt zu untersuchen und zu verstehen.

Für die umfangreichen, sich gleichartig wiederholenden Rechenarbeiten, wie sie bei numerischen Simulationen von Elementarteilchen auftreten, wurden von Teilchenforschern des Istituto Nazionale di Fisica Nucleare in Rom spezielle Rechner entwickelt. Sie werden von der Firma Quadrics Supercomputing World (QSW) in Rom hergestellt. Diese Parallelrechner arbeiten mit bis zu 512 Prozessoren nach dem SIMD (single instruction multiple data)-Prinzip; sie können in jeder Sekunde mehr als 20 Milliarden Rechenschritte ausführen.

Der brandenburgische Minister für Wissenschaft, Forschung und Kultur, Steffen Reiche, läßt sich von Dr. Peter Wegner, Leiter der Gruppe „Rechnen“ (im Bild vorne links) die Funktionsabläufe der neuen Höchstleistungsrechner erklären. Im Hintergrund verfolgen Ministerialrätin Dr. Ursula Kleinhans, Vertreterin des Landes Brandenburg im DESY-Verwaltungsrat, sowie Prof. Paul Söding, Leiter des Bereichs „Forschung“ in Zeuthen, die Präsentation.

Bei einem Rechner mit SIMD-Architektur läuft jeweils das gleiche Programm auf allen Prozessoren vollständig synchron ab. Jeder Prozessor bearbeitet die gleichen Befehle im gleichen Zeittakt, und er kann mit seinen nächsten Nachbarn sehr schnell Daten austauschen.

Einsatz in Zeuthen

Im Zeuthener Rechenzentrum sind mehrere solcher vergleichsweise preiswerten, äußerst leistungsfähigen Quadrics-Spezialrechner im Einsatz. Damit besitzt DESY-Zeuthen eine der leistungsstärksten Rechenanlagen Deutschlands zur Lösung theoretischer Probleme der Elementarteilchenphysik. Die Rechner stehen in enger Abstimmung mit dem Höchstleistungsrechenzentrum (HLRZ) in Jülich, an dem DESY als Partner beteiligt ist, auch Nutzern universitärer Gruppen zur Verfügung. Die international zusammengesetzten Benutzergruppen haben dabei über Datenleitungen von ihren Heimatinstituten Zugang zu den Quadrics-Rechnern. Mehrere umfangreiche Projekte der Elementarteilchentheorie wurden auf diese Weise bearbeitet.

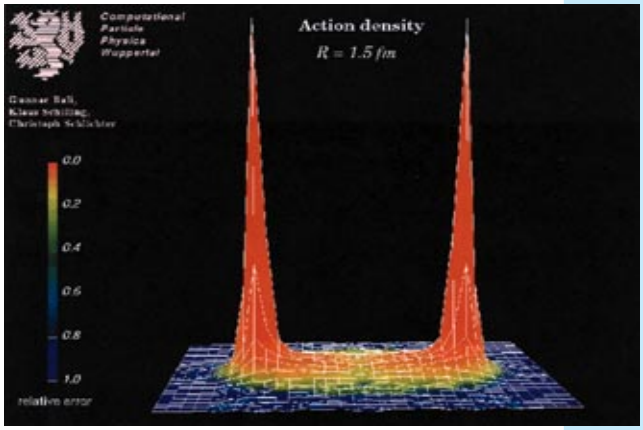
Projekte und Anwendungen

Projekte in der theoretischen Elementarteilchenphysik sind numerische Simulationen

- der Stärke der Kraft zwischen Quarks und Gluonen als Funktion der Energie
- des Aufbaus des Protons aus Quarks und Gluonen
- der Umwandlungen verschiedener Quarks ineinander
- der Phasenübergänge im Universum kurz nach dem Urknall

und die Entwicklung von Algorithmen für die

- schnelle Erzeugung von Zufallszahlen
- effiziente Berechnung von Eigenwerten.



Die genaue Beschreibung der für den Aufbau der Nukleonen und damit des Kerns wichtigen starken Kraft - also der Kraft, die zwischen den Quarks wirkt - erfolgt durch die Quantenchromodynamik, abgekürzt QCD. Nach dieser Theorie kann man sich die starke Kraft als eine Art Gummiband vorstellen. Beim Auseinanderziehen - die Abstände sind groß - spannt sich das Band: Die anziehende Kraft ist stark. Bei sehr kleinen Abständen dagegen hängt das Band durch: die Kraft ist schwach. Die Simulationsrechnungen haben gezeigt:

Die Kraft zwischen Quark und Antiquark wurde mit Hilfe numerischer Simulationen der QCD für verschiedene Abstände berechnet. Bei einem für Quarkverbindungen großen Abstand von 1,5 Femtometer wurde die Anziehung der beiden Quarks so groß wie die Gewichtskraft eines 10 t(!) schweren Gegenstandes.

Einem modernen Hochleistungsrechner - das Bild zeigt einige der Superrechner in Zeuthen - sieht man seine immense Leistungskraft nicht an.

Sind die Abstände in der Größenordnung eines Femtometers (1 fm = 0,000 000 000 001 mm), so nimmt die Kraft derart hohe Werte an, daß sich die Quarks in einer Quarkverbindung nicht mehr als etwa einen bis zwei Femtometer voneinander entfernen können. Deshalb kann ein Quark nie einzeln, sondern immer nur im Verbund mit anderen beobachtet werden.

Gemeinsam zum Teraflop

Wegen des großen Potentials für die Wissenschaft und der guten Erfahrungen mit den Parallelrechnern wird ihre Entwicklung in enger Zusammenarbeit mit den Forschern in Rom weiter vorangetrieben. Das Ziel ist, in einigen Jahren eine Leistung von mehreren 100 Milliarden bis zu einer Billion Rechenschritte pro Sekunde (man nennt es 1 Teraflops) zu erreichen. Damit würden der rechnergestützten Physik bei DESY und an den Universitäten vielversprechende neue Möglichkeiten eröffnet. Auch außerhalb der Elementarteilchenphysik zeichnen sich interessante Anwendungsmöglichkeiten für derartige Höchstleistungsrechner ab.

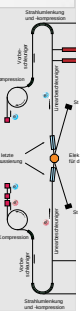
Die Zukunft

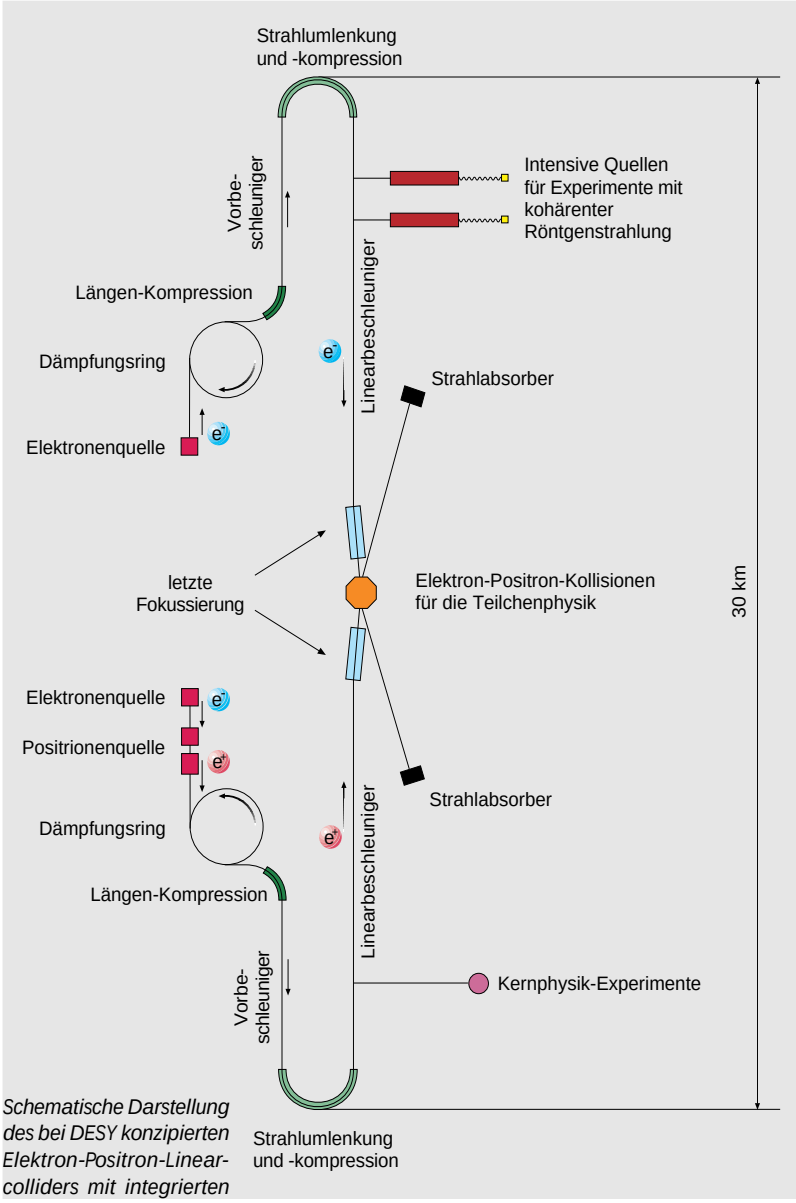
Mit HERA für die Elementarteilchenphysik und DORIS/PETRA für Forschungen mit Synchrotronstrahlung verfügt DESY über moderne, weltweit einmalige Anlagen. Sie dürften zumindest bis zum Jahr 2010 interessante, aufschlußreiche physikalische Ergebnisse liefern. Eine verantwortungsvolle Planung der Forschung denkt jedoch schon heute an die Zeit danach. Wohin geht die Entwicklung von Elementarteilchenphysik und Synchrotronstrahlung? Welche Fragestellungen erwarten neue Forschergenerationen? Mit welchen Experimentieranlagen wird es möglich sein, die Antworten zu finden?

Zwischen der konzeptionellen Planung, den ersten technischen Voruntersuchungen und der Realisierung einer großen Beschleunigeranlage liegt erfahrungsgemäß eine Zeitspanne von 15 bis 20 Jahren. Deshalb müssen schon jetzt Maßnahmen ergriffen werden, um Entscheidungen über ein künftiges Projekt vorzubereiten.

Ein Linearcollider als Folgeprojekt

Um die erforderlichen Entscheidungsgrundlagen zu schaffen, hat DESY im Rahmen eines internationalen Forschungsverbunds bereits mit den Untersuchungen zur konkreten Planung für ein Folgeprojekt begonnen: einen 30 km langen Elektron-Positron-Linearcollider mit integrierten Röntgenlasern. Außerdem ließe sich hierin ein moderner Beschleuniger für die kernphysikalische Forschung einbeziehen. In dem Linearcollider werden zwei Strahlen, ein Positronen- und ein Elektronenstrahl, in zwei gegeneinandergerichteten linearen Strecken auf 250 GeV beschleunigt und zur Kollision gebracht. Es entsteht hierbei eine Art Mini-Urknall, dessen Energie weit über das bisher Erreichte hinausgeht. Die Wissenschaftler kommen damit noch näher an den Anfang des Universums heran - auf weniger als eine Billionstel Sekunde!





Schematische Darstellung des bei DESY konzipierten Elektron-Positron-Linearcolliders mit integrierten Quellen für kohärente Synchrotronstrahlung im Röntgenbereich. Gemeinsam mit 26 Instituten aus acht Ländern werden Entwicklungsarbeiten für einen Linearcollider mit supraleitenden Resonatoren durchgeführt. Hierzu wird eine Testanlage im Hamburg gebaut. Sie soll nach abgeschlossenen Beschleunigertests zu einer kohärenten Synchrotronstrahlungsquelle im vakuum-ultravioletten Wellenlängenbereich erweitert werden.

Aus dem Beschleuniger kann man einen extrem gut gebündelten Elektronenstrahl herauslenken und ihn durch ein spezielles Magnetsystem führen. Auf diese Weise läßt sich höchst intensive, laserähnlich fokussierte Röntgenstrahlung erzeugen.

Der Testaufbau des supraleitenden Linearbeschleunigers bei DESY-Hamburg.

Für Weiterentwicklung und Konkurrenzfähigkeit

In der Elementarteilchenforschung setzt DESY damit die Tradition fort, sein Forschungsprogramm komplementär zum Europäischen Zentrum CERN anzulegen. Die Experimente an dem Linearcollider werden sich mit denen an dem zukünftigen Proton-Proton-Speicherring LHC beim CERN (Fertigstellung im Jahr 2005) ergänzen. Die beiden Anlagen würden auf dem Weg zu einer alles umfassenden Theorie der Materie und zur Weiterentwicklung der Kosmologie ideal zusammenwirken. Da der Linearcollider mehrere Röntgenlaser treiben kann, wird die fruchtbare Symbiose zwischen Teilchenphysik und Forschung mit Synchrotronstrahlung bei DESY fortgeführt und auf ein qualitativ neues Niveau gehoben. Ein Röntgenlaser könnte molekulare Strukturen mit atomarer Auflösung räumlich abtasten und zugleich den Ablauf chemisch-biologischer Prozesse zeitlich in den feinsten Details zeigen. Die technologischen Entwicklungen der Teilchenphysik könnten so in der Chemie, Medizin, Biologie und Festkörperphysik neue Wege öffnen.

Wegen der weltweit erkannten wissenschaftlichen Chancen, die durch einen Linearcollider eröffnet werden, soll die Anlage in internationaler Zusammenarbeit geplant, entwickelt, errichtet und betrieben werden. Um dies zu realisieren, könnte ein projektbezogenes internationales Forschungszentrum auf Zeit in Deutschland geschaffen werden.

Technologische Grenzen hinausschieben

Für die Beschleunigungsstrecke des DESY-Linearcollider sollen supraleitende Hohlraumresonatoren verwendet werden. Dies hat große technische Vorteile, spart Energie und führt zu besseren physikalischen Parametern als bei Beschleunigern in konventioneller, normalleitender Technologie, wie sie in den USA und in Japan geplant sind. Jedoch erfordert ein supraleitender Linearcollider die Entwicklung einer sehr anspruchsvollen neue Technologie und stellt deshalb ein ehrgeiziges Innovationsprojekt dar.

Know-how aus Zeuthen

Für den Bau des Collider-Prototyps in Hamburg werden in Zeuthen, in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Berlin (Institut für Theoretische Elektrotechnik), die Monitore zur exakten Überwachung der Lage der Strahlen in den Beschleunigern entwickelt und gefertigt. Ferner arbeitet DESY-Zeuthen an der Konzeption eines zukünftigen Detektors für Experimente an einem Linearcollider. Dazu werden physikalische Prozesse, die man voraussichtlich an dem Linearcollider wird beobachten können, auf Rechnern simuliert. So erhält man schon jetzt ein Bild davon, was die Wissenschaftler von den Experimenten der Zukunft erwarten können. Solche Vorarbeiten sind wichtig: Durch sie findet man die optimalen Strategien für die Konzeption des Beschleunigers, des Detektors und der durchzuführenden Experimente, um zu neuen wissenschaftlichen Ergebnissen zu kommen und auch in 10 bis 20 Jahren zum Fortschreiten der Erkenntnisse von Aufbau der Materie und der Entstehung des Universums weiter beitragen zu können.

DESY auf einen Blick

Gründung, Rechtsform, Mitgliedschaft

DESY wurde am 18. Dezember 1959 in Hamburg als selbständige Stiftung bürgerlichen Rechts gegründet.

In der Satzung heißt es: „Zweck der Stiftung ist die Förderung der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung vor allem durch den Bau und Betrieb von Hochenergiebeschleunigern und deren wissenschaftliche Nutzung, insbesondere die Forschung mit Teilchen und Synchrotronstrahlung, sowie Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die damit im Zusammenhang stehen.“

Seit dem 1. Januar 1992 ist das frühere Institut für Hochenergiephysik der Akademie der Wissenschaften der DDR in Zeuthen ein Teilinstitut von DESY. - DESY ist Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF).

Etat und Finanzierung

Die jährlichen Zuwendungen betragen für DESY-Hamburg ca. 250 Mio DM bei 1050 Planstellen, für DESY-Zeuthen ca. 25 Mio DM bei 127 Planstellen. Sie werden gemäß der für Großforschungseinrichtungen üblichen Regelung zu 90% vom Bund (Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie) und zu 10% vom Land Hamburg bzw. Brandenburg getragen.

Lehre und Ausbildung

An der bei DESY durchgeführten Forschung in Hamburg und Zeuthen sind ständig etwa 1000 Diplomanden, Doktoranden und Nachwuchswissenschaftler beteiligt. Fast die Hälfte von ihnen kommt aus dem Ausland. Darüber hinaus bildet DESY in Hamburg 60 und in Zeuthen 20 Lehrlinge in gewerblich-technischen Berufen aus.

DESY-Hamburg mit dem HERA-Ringverlauf

Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen

Bei DESY angestellt (Doktoranden, Auszubildende und Nachwuchswissenschaftler mitgerechnet) sind:

- In Hamburg:
  1390 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, davon 300 Wissenschaftler
- In Zeuthen:
  Etwa 160 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, davon 65 Wissenschaftler.

DESYs Organisation

Glossar

A

AMANDA
Antarctic **M**uon **A**nd **N**eutrino **D**etector **A**rray: Ein amerikanisch-schwedisch-deutsches Projekt zum Bau eines großen Neutrino-Teleskops am Südpol.

Antiteilchen/Antimaterie
Zu jedem Teilchen gehört ein Antiteilchen: Masse, Spin und Lebensdauer sind gleich, Ladungsvorzeichen und magnetisches Moment entgegengesetzt. Das Photon ist mit seinem Antiteilchen identisch. Trifft ein Teilchen auf sein Antiteilchen, so werden beide vernichtet; die Energie wird in Quarks, Leptonen oder Photonen umgesetzt. Deshalb existieren innerhalb der normalen Materie keine Antiteilchen. Sie lassen sich kurzzeitig mittels hoher Energie erzeugen und sichtbar machen. Gekennzeichnet sind sie durch das Symbol des Teilchens mit einem Querstrich darüber.

Austauschteilchen
Spezielle Teilchen, auch Bosonen genannt, welche die Wechselwirkungen zwischen den Materieteilchen vermitteln. Zu jeder Grundkraft gehören ein oder mehrere spezifische Bosonen.

B

B-Mesonen
Mesonen, bei denen entweder das Quark oder das Antiquark ein schweres b- (oder $\bar{b}$)-Quark ist.

Beschleuniger
Anlagen, in denen elektrisch geladene Teilchen wie Elektronen oder Protonen durch elektrische Felder auf hohe Energien gebracht werden. Man benötigt sie zur Untersuchung von Teilchen und deren Wechselwirkungen. Zugleich dienen sie als Quelle von intensiver elektromagnetischer Strahlung - der Synchrotronstrahlung.

Bosonen
→ Austauschteilchen

C

CERN
Europäisches Forschungszentrum für Teilchenphysik in Genf (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*).

Cherenkov-Strahlung (-Licht)
Diese Strahlung tritt auf, wenn ein geladenes Teilchen in einem Medium schneller ist als das Licht; es entsteht ein Lichtkegel ähnlich dem Machschen Kegel beim Flug eines Geschoßes mit Überschallgeschwindigkeit.

Collider
→ Linearcollider

CP-Symmetrie
Prozesse laufen gleicherweise ab, wenn alle Raumkoordinaten gespiegelt (Paritätsoperation P) und die Ladungsvorzeichen und magnetischen Momente der beteiligten Teilchen umgedreht werden (Ladungskonjugation C). Diese Symmetrie ist eng mit der Symmetrie der Richtung der Zeit verbunden. Einfacher: Im Mikrokosmos ist es unwesentlich, ob ein Prozeß vor- oder rückwärts, links oder rechts herum oder mit Materie- oder Antimaterieteilchen abläuft. In der Teilchenphysik scheint diese Symmetrie universell zu gelten; einzige bisher gefundene Ausnahme - der Zerfall der K-Mesonen. Nur durch eine Verletzung der CP-Symmetrie läßt sich erklären, weshalb der Kosmos überwiegend aus Materie und nicht allein aus Strahlung besteht.

D

DESY
Deutsches **E**lektronen-**Sy**nchrotron, das Forschungszentrum für Teilchenphysik und Untersuchungen mit Synchrotronstrahlung mit Sitz in Hamburg und einem Teilinstitut in Zeuthen.

Detektor
In der Teilchenphysik ein zumeist komplexes Instrument aus verschiedenen Einzelgeräten zum Nachweis von Elementarteilchen und ihren Reaktionen, durch elektronische Aufzeichnung ihrer Spuren und Messung ihrer Energie.

Dimensionen

10^{-15}	f(femto)	1 Billiardstel
10^{-12}	p(pico)	1 Billionstel
10^{-9}	n(nano)	1 Milliardstel
10^{-6}	µ(mikro)	1 Millionstel
10^{-3}	m(milli)	1 Tausendstel
1		
10^{3}	k(kilo)	Tausend
10^{6}	M(Mega)	Million
10^{9}	G(Giga)	Milliarde
10^{12}	T(Tera)	Billion
10^{15}	P(Peta)	Billiarde

Driftkammer
Spezielle Detektorkomponente zum Nachweis der Spuren geladener Teilchen.

E

Elektron
Stabiles, elektrisch negativ geladenes Elementarteilchen aus der Gruppe der Leptonen; Träger des elektrischen Stromes; zusammen mit Proton und Neutron ein Grundbaustein der Atome.

Elektronenvolt (eV)
Maßeinheit für die Energie und für die Masse von Teilchen. 1eV ist die Energie, die ein Elektron aufnimmt, wenn es durch eine elektrische Potentialdifferenz von 1 Volt beschleunigt wird. Die Masse des Elektrons beträgt 0,5 MeV ($=10^{-27}$ Gramm). Das Proton, der Kern des Wasserstoffatoms, hat eine Masse von ca.1 Milliarde eV (=1GeV).

Elementarteilchenphysik
Gebiet der Physik, das sich mit den fundamentalen Bausteinen der Materie und den diese zusammenhaltenden Kräften befaßt. Die wichtigsten instrumentellen Hilfsmittel sind Teilchenbeschleuniger, in denen elektrisch geladene Teilchen hoher Energie zur Kollision gebracht werden. Die dabei ablaufenden Prozesse werden mit Detektoren untersucht.

Elementarteilchen
Man unterscheidet Materie- und Kraftteilchen. Erstere bilden die kleinsten Einheiten der Materie. Sie sind im Urknall entstanden, der gößere Teil von ihnen ist nach Bruchteilen von Sekunden wieder zerfallen. Von den wenigen ver

bliebenen stabilen Teilchen bilden 2 Arten von Quarks und die Elektronen die gesamte beständige Materie. Die „ausgestorbenen" Teilchenarten lassen sich im Beschleuniger für kurze Zeit erzeugen.

F

Farbladung
Eine Eigenschaft von Quarks und Gluonen. Die Farbladung ist die Quelle der starken Kraft. Leptonen besitzen keine Farbladung.

G

GeV
Energieeinheit; → Elektronenvolt

Gluonen
Austauschteilchen der starkenKraft (von „glue", engl. für „Leim"). Die Gluonen übertragen die Kraft aufgrund ihrer Farbladungen. Sie wurden 1979 bei DESY erstmals direkt beobachtet.

H

H1
Name eines Elektron-Proton-Kollisionsdetektors an der Speicherringanlage HERA. Forschungsschwerpunkte am H1-Detektor sind: Die Aufklärung der inneren Struktur des Protons, die Erweiterung des Verständnisses der fundamentalen Kräfte und die Suche nach neuen Teilchen.

Hadronen
Sammelbegriff für aus Quarks und Antiquarks bestehende Teilchen wie Protonen, Neutronen oder Mesonen.

HERA
Hadron-**E**lektron-**R**ing-**A**nlage: die erste und weltweit einzige Elektron-Proton-Kollisionsanlage. Sie wurde bei DESY entwickelt, gebaut und 1991 in Betrieb genommen. HERA ist das gegenwärtig stärkste „Mikroskop" für das Innere der Materie. Das mit HERA durchgeführte Forschungsprogramm zur Untersuchung des Innenlebens des Protons und der Natur der es zusamenhaltenden Kräfte begann 1992 und wird gewiß bis ca. 2010 interessante Fragestellungen bereithalten.

HERA-B
Ein HERA-Experimenteprojekt zur Untersuchung der CP-Verletzung im System von Teilchen, die ein schweres b-Quark enthalten (B-Mesonen).

Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF)
Dachverband von 16 nationalen Forschungszentren in Deutschland. Die HGF-Zentren verfolgen langfristige Forschungsziele des Staates in wissenschaftlicher Autonomie. Dazu betreiben sie große Anlagen oder bearbeiten komplexe Projekte, gemeinsam mit Universitäten, Forschungseinrichtungen und der Industrie. HGF-Grundfinanzierung: 90% vom Bund, 10% von den jeweiligen Sitzländern.

HERMES
Ein HERA-Experimenteprojekt zur Untersuchung der Herkunft des Drehimpulses (Spins) der Nukleonen.

Higgs-Teilchen
Hypothetisches Teilchen (benannt nach dem englischen Physiker Higgs), das im Standardmodell der Elementarteilchen erwartet wird. Es würde die Herkunft der Masse der verschiedenen Teilchen erklären: Die Teilchen erhalten ihre Masse unter dem Einfluß des zum Higgs-Teilchen gehörenden Higgs-Feldes, das unseren gesamten Raum gleichmäßig erfüllt.

K

Kraft, fundamentale
Es gibt 4 Arten von Grundkräften: die Schwerkraft, die schwache, die elektromagnetische und die starke Kraft. Die Kräfte entstehen durch den Austausch der sogenannten Austauschteilchen zwischen den Materieteilchen.

L

Ladung
In der Teilchenphysik diejenige Eigenschaft von Elementarteilchen, die die Quelle für ihre Wechselwirkungen darstellt. Es gibt 3 Arten: die schwache, die elektrische Ladung und die Farbladung.

L3
Name für einen Elektron-Positron-Kollisionsdetektor an der Speicherringanlage LEP am CERN.

LEP
Kürzel für **L**arge **E**lectron **P**ositron Collider, den weltweit größten Elektron-Positron-Speicherring am CERN (Genf) mit einem Umfang von 27 km.

Leptonen
Sie bilden zusammen mit den Quarks die Grundbausteine der Materie. Man unterscheidet 3 Paare (je ein elektrisch geladenes Teilchen und ein Neutrino): Elektron und Elektron-Neutrino, Myon und Myon-Neutrino, Tau und Tau-Neutrino.

Linearbeschleuniger
Lineare Struktur von Vakuumkammern und Beschleunigungsstrecken mit elektrischen Feldern; sie bündeln und beschleunigen elektrisch geladene Teilchen wie Elektronen und Protonen.

Linearcollider
Zwei gegeneinandergerichtete, lineare Beschleuniger, die höchstenergetische Elektron-Positron-Kollisionen erzeugen. Als internationales Projekt wird bei DESY ein Linearcollider von 30 km Länge und einer Kollisionsenergie von 500 bis 800 GeV entworfen.

Luminosität
Maß für die Trefferrate zwischen den beschleunigten Teilchen und damit für die neben der Energie wichtigste Qualität eines Beschleunigers. Sie wird um so größer, je mehr Teilchen in einem „Paket" gespeichert und je dichter sie gepackt sind. Je höher die Luminosität ist, um so mehr Teilchenkollisionen können von den Detektoren registriert werden.

M

Materie
Alle bisher bekannte Materie besteht aus den Grundbausteinen Quarks und Leptonen (wovon es je 6 verschiedene Arten gibt). Die Materie unserer Erde ist hauptsächlich aus Protonen, Neutronen und Elektronen aufgebaut, den Bausteinen aller Atome; die Protonen und Neutronen ihrerseits bestehen aus u- und d-Quarks.

Meson
Ein Teilchen, das aus einem Quark und einem Antiquark besteht. Die Mesonen sind Reaktionsprodukte hochenergetischer Prozesse; sie zerfallen innerhalb von Millionstelsekunden; dennoch können sie in Detektoren beobachtet werden.

Mikrokosmos
Bezeichnung für die Strukturen innerhalb sehr kleiner Zellen des Universums; die Welt im Innern der Atome und damit im Innern der Materie; die Welt der Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen.

N

Neutrino
Elementarteilchen aus der Gruppe der Leptonen. Zu jeder elektrisch geladenen Leptonen-Spezies gehört eine Neutrino-Spezies. Nach heutiger Kenntnis sind Neutrinos masselos, elektrisch neutral und schwach wechselwirkend. Deswegen können sie Materie ungehindert passieren. Milliarden von Neutrinos durchdringen uns in jeder Sekunde.

Neutrino-Teleskop
Großräumige Meßanordnung zum Nachweis kosmischer Neutrinos, die bei Elementarteilchenprozessen im fernen Universum entstehen, und zur Bestimmung ihrer Herkunftsrichtung.

Neutron
Elektrisch nicht geladenes Teilchen, das aus drei Quarks (udd) zusammengesetzt ist. Die Neutronen bilden zusammen mit den Protonen die Atomkerne.

Nukleon
Oberbegriff für die Bausteine des Atomkerns: Protonen und Neutronen, die selbst aus Quarks aufgebaut sind.

P

Parallelrechner
Ein Rechner, bei dem ein Programm durch mehrere Prozessoren gleichzeitig abgearbeitet wird; die Rechenzeit kann dadurch erheblich verkürzt werden.

Photon (Lichtquant)
Austauschteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung. Das Photon ist masselos und elektrisch neutral.

Photovervielfacher
Hochempfindliches Nachweisgerät für sehr schwache Lichtimpulse, die in elektrische Impulse umgewandelt und gleichzeitig verstärkt werden.

Polarisation
Man spricht von Polarisation, wenn die Drehimpulse(Spins) von Teilchen in eine bestimmte Richtung eingestellt sind.

Positron
Das Antiteilchen zum Elektron; daher elektrisch positiv geladen.

Proton
Positiv geladenes Teilchen, das aus Quarks(uud) zusammengesetzt ist. Protonen bilden zusammen mit den Neutronen den Atomkern.

Q

Quantenchromodynamik (QCD)
Die Theorie der starken Wechselwirkung, d.h. der Kraft zwischen Quarks, die durch Austausch von Gluonen entsteht.

Quarks
Fundamentale Bausteine der Materie. Wie bei den Leptonen gibt es sechs verschiedene Quarks, zusammengefaßt zu 3 Paaren: das Up- und Down-, das Charm- und Strange- und das Top- und Bottom-Quark (Kürzel: u-, d-, c-, s-, t- und b-Quark). Quarks treten stets entweder als Quark-Antiquark-Paare oder als Dreierkombination aus 3 Quarks oder 3 Antiquarks auf. Sie sind Bausteine der Protonen, Neutronen und Mesonen.

R

Resonator
Wichtige Komponente von Beschleunigern; es sind metallische Hohlkörper, in denen elektromagnetische Felder schwingen, die der Beschleunigung des Teilchenstrahls dienen. Gewöhnlich werden Resonatoren aus Kupfer hergestellt und sind normalleitend; neuerdings baut man aber auch supraleitende Resonatoren, die aus Niob bestehen.

S

Schwache Wechselwirkung
Eine der fundamentalen Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen. Sie ermöglicht die Kernfusion in Sternen und damit das Leuchten der Sonne und verursacht den Zerfall mancher Atomkerne. Sie wird durch Austausch von W- und Z-Bosonen übertragen.

Speicherring
Anlage mit einer ringförmigen evakuierten Röhre, in der auf hohe Energien beschleunigte Elektronen oder Protonen über mehrere Stunden umlaufen können. Speicherringe werden in den Beschleunigeranlagen der Teilchenphysik und zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung eingesetzt.

Spektrometer
Eine Nachweisapparatur, mit der die bei einem Prozeß erzeugten Teilchen in bestimmten räumlichen Richtungen registriert und in der ihre Energien gemessen werden können.

Spin
Eigendrehimpuls von Elementarteilchen, die sich wie ein Kreisel um sich selbst zu drehen scheinen. Der Spin kann nur bestimmte „gequantelte" Werte annehmen. Bei Materieteilchen (Quarks, Leptonen) hat er den festen Wert $h/4\pi$ (h=Plancksche Konstante).

Standardmodell
Die heutige, sehr gut bestätigte, wenngleich vorläufige Theorie der Elementarteilchen - das heißt ihrer schwachen, elektromagnetischen und starken Wechselwirkungen. Sie beschreibt diese zwar sehr genau, läßt aber viele grundlegende Fragen der Elementarteilchenphysik unbeantwortet.

Streuung/Streuprozeß
Vorgang bei der Kollision von Teilchen in Speicherringen. Das „gestreute", also abgelenkte Teilchen (z.B. ein Elektron) überträgt einen Teil seines Impulses und seiner Energie auf das streuende Teilchen (z.B. ein Proton), wobei zugleich neue Teilchen erzeugt werden können.

Supraleitung
Eigenschaft einiger Metalle bei sehr tiefen Temperaturen: Der elektrische Widerstand wird Null; d.h. elektrischer Strom fließt verlustfrei ohne Energieverbrauch. Moderne Beschleuniger nutzen supraleitende Magnete und Hochfrequenzresonatoren, die bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt arbeiten.

Synchrotron
Die moderne Version der Ringbeschleuniger. Die Bahn des umlaufenden Teilchenstrahls bleibt während der Beschleunigung nahezu unverändert. Dies erfordert ein Magnetfeld (es hält die Teilchen auf ihrer Bahn), das synchron mit der Energiezunahme anwächst.

Synchrotronstrahlung
Intensive, gebündelte und breitbandige elektromagnetische Strahlung, die an den Synchrotrons der Elementarteilchenforscher anfänglich als Störeffekt entdeckt wurde. Sie entsteht, wenn geladene Teilchen mit sehr hohen Geschwindigkeiten durch ein magnetisches Feld abgelenkt werden. Ihre einzigartigen Eigenschaften ermöglichen vielfältige Anwendungen in der Materialforschung, der Oberflächenphysik, der Chemie, Biologie, medizinischen Diagnostik u.a. Auch DESY verfolgt ein breites Forschungsprogramm mit der Synchrotronstrahlung.

Szintillator
Durchsichtige Festkörper, Flüssigkeiten oder Gase, die angeregt durch ionisierende Strahlung kurze Lichtblitze emittieren, die dann mit Photosensoren nachgewiesen werden können. Szintillatoren finden wegen ihrer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung breite Anwendung in den Detektoren der Teilchenphysik und neuerdings auch in der medizinischen Diagnostik.

T

Target
Auf deutsch: Ziel. In einem Objekt wie einem dünnen Draht oder einem kleinen Gasvolumen werden durch Beschuß mit energiereichen Teilchen Reaktionen ausgelöst und sodann in einem Spektrometer beobachtet.

Teilchenfamilie
Quarks und Leptonen geordnet nach ihren Eigenschaften; jede Familie besteht aus 2 Quarks und 2 Leptonen. Die drei Familien sind: 1. Up-Quark, Down-Quark, das Elektron und sein Neutrino; 2. Charm-Quark, Strange-Quark und das Myon nebst seinem Neutrino; 3. Top-Quark, Bottom-Quark, das Tau und Tau-Neutrino. Die gewöhnliche Materie ist allein aus der ersten Teilchenfamilie gebildet.

Teilchenstrahl
Viele Milliarden von stabilen, schnell und gerichtet fliegenden Teilchen wie Elektronen, Protonen oder deren Antiteilchen. Möglichst viele Teilchen werden in ein möglichst kleines Volumen fokussiert (im Interesse einer hohen Trefferwahrscheinlichkeit). So entstehen Teilchenpakete, die mehrere Zentimeter lang und von sehr kleinem Querschnitt sind und die im Vakuumrohr eines Beschleunigers gegeneinander gelenkt werden.

TESLA
Kurzname für TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator, einer bei DESY vorangetriebenen Entwicklung für einen Linearcollider. TESLA arbeitet mit supraleitenden Beschleunigerstrukturen im Frequenzbereich von1,3 GHz und Beschleunigerspannungen von mehr als 20 Millionen Volt pro Meter.

V

Vakuumrohr
Wichtige Beschleunigerkomponente; damit möglichst wenige Partikel eines Teilchenstrahls durch Kollision mit Luftmolekülen verlorengehen, läuft der Strahl in einem Rohr, in dem ein Höchstvakuum herrscht.

Valenzquarks
Bezeichnung für die drei Quarks, die die Eigenschaften des Nukleons maßgeblich bestimmen. Der Ausdruck „Valenzquarks" wurde eingeführt, um diese drei Quarks von den Quarks und Antiquarks im Nukleon zu unterscheiden, in die sich die ebenfalls im Nukleon vorhandenen Gluonen für sehr kurze Zeit verwandeln können.

W

W-Bosonen
Elektrisch geladene Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung mit einer Masse von 80 GeV.

Wechselwirkung
Allgemein: gegenseitige Beeinflussung zweier Elementarteilchen. Sie äußert sich dadurch, daß die Teilchen Kräfte aufeinander ausüben; häufig führt sie beim Zusammentreffen der Teilchen auch zu Streu- oder Umwandlungsprozessen; hierbei können Teilchen zum Beispiel vernichtet oder neue Teilchen gebildet werden.

Z

Z-Boson
Neutrales Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung mit einer Masse von 91 GeV.

ZEUS
Name für einen Elektron-Proton-Kollisionsdetektor an der Speicherringanlage HERA (siehe auch H1).

Herausgeber:

DESY Zeuthen
Platanenallee 6
D-15738 Zeuthen

Tel.: 033762/77-0
Fax: 033762/77-330
E-mail: desyinfo@ifh.de
http://www.ifh.de

DESY
Deutsches Elektronen-Synchrotron
Notkestraße 85
D-22607 Hamburg

Tel.: 040/8998-0
Fax: 040/8998-3282
E-mail: desyinfo@desy.de
http://www.desy.de

Konzeption und Text:
Paul Söding, Annette Schulz, Manfred Ritschel

Gestaltung, Layout, Umsetzung:
WiTec-PR, Dr. Ritschel & Partner, Karlsruhe

Grafiken:
CERN (Titel, S. 6; 33; 36)
DESY (S.13; 23re; 29; 30; 44)
alle übrigen: Christine Ritschel, WiTec-PR

Fotos:
Kai Desler
Christel Engelhardt
Peter Ginter
Wolfgang Lachnit
Manfred Schulze-Alex
Moiken Sörensen-Pehrs
Christian Spiering
Kerstin Stolze
Heike Thum-Schmielau
DESY

Druck: ENGELHARDT & BAUER, Karlsruhe

Redaktionsschluß: Februar 1998

Diese Broschüre kann kostenlos bezogen werden. Nachdruck, auch auszugsweise, unter Nennung der Quelle gerne gestattet.

DESY

Deutsches
Elektronen-Synchrotron