

50 Jahre CERN

Die herausragenden Ergebnisse des Europäischen Forschungszentrums für Teilchenphysik sind für das heutige physikalische Weltbild von entscheidender Bedeutung.

Jürgen Drees und Hans Jürgen Hilke

Seit seiner Gründung 1954 hat das CERN entscheidend zur Entwicklung der modernen Teilchenphysik beigetragen und in den letzten 25 Jahren eine führende Rolle übernommen. Am CERN wurden unter anderem die neutralen Ströme sowie die W- und Z-Bosonen entdeckt und wichtige Ergebnisse zur inneren Struktur der Nukleonen erzielt.

Das Europäische Forschungszentrum für Teilchenphysik CERN wurde auf Empfehlung der UNESCO mit dem Ziel gegründet, die Zusammenarbeit zwischen den europäischen Staaten in der zivilen kernphysikalischen Grundlagenforschung zu fördern. Zu den Mitgliedsstaaten gehörte von Anfang an die Bundesrepublik Deutschland – damals ein wichtiger Schritt zur Wiederaufnahme deutscher Wissenschaftler in die internationale Gemeinschaft.

Grundlage des CERN sind die zuverlässigen Beschleuniger (Abb. 1). Das bereits 1959 in Betrieb genommene Proton-Synchrotron (PS) diente nach Abschluss der ersten Experimentierphase auch als Vorbeschleuniger für die größeren Maschinen. Das 1976 fertig gestellte 400-GeV-Super-Proton-Synchrotron (SPS) diente einem umfangreichen Experimentierprogramm, als Proton-Antiproton-Speicherring, später als Vorbeschleuniger für den großen Elektron-Positron-Speicherring (LEP). Als Vorbeschleuniger für den Large Hadron Collider (LHC) werden PS und SPS auch künftig weiter betrieben. Die weitere Verwendung der vorhandenen Anlagen hat entscheidend dazu beigetragen, dass die neueren Projekte LEP und LHC im Rahmen eines nahezu konstanten Budgets vom CERN-Rat genehmigt und vom CERN-Personal realisiert wurden bzw. zurzeit realisiert werden.

Die Entdeckung der neutralen Ströme

In den Jahren der CERN-Gründung war die Elementarteilchenphysik ein neues Gebiet, von den heute bekannten 17 elementaren Fermionen und Bosonen waren lediglich vier bekannt: das Elektron, das Myon, das Elektronneutrino und das Photon. Man kannte Proton und Neutron sowie einige Mesonen und weitere Baryonen, z. B. Pionen, Kaonen und Hyperonen, wusste aber nichts über deren inneren Aufbau. Der Mechanismus der fundamentalen schwachen Wechselwirkung war weitgehend und derjenige der starken Wechselwirkung völlig unbekannt. Heute weiß man, dass Wech-



selwirkungen zwischen Fermionen generell durch den Austausch von Bosonen vermittelt werden, z. B. die elektromagnetische Wechselwirkung durch das Photon. Die schwache Wechselwirkung ist komplizierter, denn zu ihr tragen drei Austauschbosonen bei: die beiden elektrisch geladenen W^+ und W^- sowie das neutrale Z. Bei Prozessen mit Austausch der geladenen Bosonen spricht man von geladenem Strom, bei Prozessen mit Z-Austausch von neutralem Strom (siehe Infokasten „Elektroschwache Wechselwirkung“). Bis Ende der 60er Jahre war es allgemeine Überzeugung, dass die schwache Wechselwirkung ausschließlich durch geladene Ströme vermittelt wird. Alle bis dahin bekannten Prozesse waren vom Typ des klassischen β -Zerfalls. Genauer, Leptonen traten jeweils in Form eines Paares vom gleichen Typ auf, von dem der eine Partner geladen und der andere ungeladen war, also etwa in den Kombinationen e^+v_e oder μ^+v_μ bzw. den entsprechenden Antiteilchen. Alle Messungen ließen sich mit einer erweiterten Fermi-Theorie des β -Zerfalls verstehen, obwohl bereits bekannt war, dass diese Theorie nur eine Näherung sein konnte.¹⁾ Die berühmten Publikationen von Sheldon Glashow, Steven Weinberg und Abdus Salam zur Vereinheitlichung der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung, die zwingend die Existenz eines ungeladenen Austauschbosons und damit neutraler Ströme vorhersagten, erschienen zwar bereits in den sechziger Jahren, wurden aber zunächst nur wenig beachtet.

Der Durchbruch gelang mit einem Experiment am Proton-Synchrotron des CERN. Allerdings hatten die Experimente am dortigen Myon-Neutrinostrahl²⁾ zunächst andere Prioritäten als die Suche nach Ereignis-

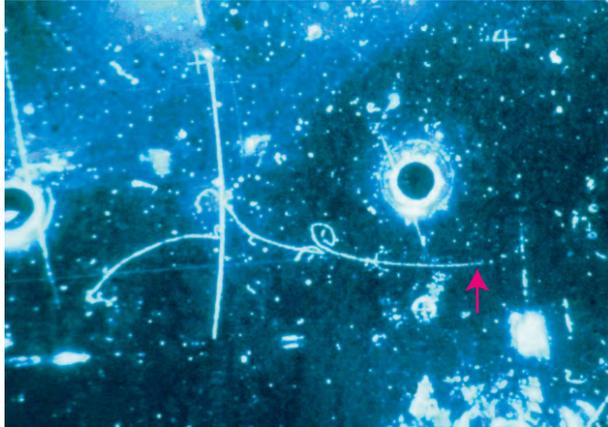
Abb. 1: Das CERN-Gelände (unten) mit der Lage des SPS-Rings (Umfang: 6,9 km) sowie des ca. 100 m tief gelegenen Ringtunnels, in dem sich der LEP-Speicherring befand und in dem zurzeit der Large Hadron Collider errichtet wird (Umfang: 26,7 km).

1) So wird von der Fermi-Theorie ein Wirkungsquerschnitt für die Neutrino-Nukleon-Streuung vorhergesagt, der mit wachsender Energie des einlaufenden Neutrinos gegen unendlich geht.

Prof. Dr. Jürgen Drees, Fachbereich Physik, Bergische Universität Wuppertal, Gaußstr. 20, 42097 Wuppertal; Dr. Hans Jürgen Hilke, CERN, CH-1211 Genf 23

sen mit Z-Austausch. An oberster Stelle standen die Suche nach den geladenen Austauschbosonen und die Aufklärung der inneren Struktur der Nukleonen. CERN verfügte über beste Voraussetzungen für ein Neutrino-streuprogramm. Die gigantische Schwerflüssigkeits-Blasen-kammer Gargamelle mit einem aktiven Detektorvolumen von $6,2 \text{ m}^3$ konnte einige hundert Ereignisse vom

Abb. 2:
Das berühmte Ereignis vom Typ $\bar{\nu}_\mu e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu e^-$, die erste Evidenz für die Existenz des neutralen Stromes. Ein Antimyon-neutrino (nicht sichtbar) läuft von rechts in die Blasen-kammer Gargamelle ein und überträgt Impuls auf ein Hüllenelektron, dessen Spur rechts beginnt (Pfeil) und horizontal nach links verläuft (aus [1]).



Typ $\nu_\mu + \text{Nukleon} \rightarrow \mu^- + \text{Hadronen}$ registrieren. Bereits bei der ersten Datennahme fand man jedoch auch Ereignisse ohne ein Myon im Endzustand, nahm aber zunächst an, es handle sich dabei um Untergründereignisse. Erst nach längerer Datennahme und vielen Studien wurde später gezeigt, dass es sich dabei größtenteils um Ereignisse mit Austausch eines neutralen Stroms vom Typ $\nu_\mu + \text{Nukleon} \rightarrow \nu_\mu + \text{Hadronen}$ handelt.

Die erste klare Signatur für die Existenz neutraler Ströme kam Anfang 1973 von der Aachener Gruppe der Gargamelle-Kollaboration. Bei der Vermessung der im Myon-Antineutrino-Strahl aufgenommenen Bilder fand sie ein rein leptonisches Ereignis (Abb. 2), das als Ereignis vom Typ $\bar{\nu}_\mu e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu e^-$ interpretiert werden muss. Dieser Prozess kann aufgrund der Erhaltung der Leptonzahl nicht durch den Austausch eines geladenen W-Bosons zustande kommen. Mit hoher Priorität wurden danach die hadronischen Ereignisse ohne geladenes Lepton analysiert. Alle registrierten Neutrino- und Antineutrino-Ereignisse wurden in drei Kategorien eingeteilt: NC-Ereignisse³⁾, in denen ausschließlich Hadronen beobachtet wurden, CC-Ereignisse, die aus Hadronen plus einem einzigen Myon bestehen, und Ereignisse mit einer Neutrino-wechselwirkung mit Myon sowie einer zweiten Wechselwirkung mit ähnlicher Charakteristik wie die NC-Ereignisse. Die Anzahl der Ereignisse der dritten Kategorie war entscheidend für die genaue Bestimmung des Untergrunds mit Hilfe eines neu entwickelten Monte-Carlo-Programms. Da die beobachtete NC-Rate etwa eine Größenordnung höher war als die der erwarteten Untergrundreaktionen, war die Existenz neutraler Ströme bewiesen. Auch das Verhältnis NC/CC wurde erstmals bestimmt. Im Juli 1973 wurden zwei Veröffentlichungen der Gargamelle-Kollaboration zur Publikation eingereicht [1, 2]. Kurze Zeit danach bestätigten Experimente am National Accelerator Laboratory in den USA die Existenz neutraler Ströme in der schwachen Wechselwirkung.

Quarks haben drittelzahlige Ladungen

1968 war am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) entdeckt worden, dass der Streuprozess eines Elektrons an einem Nukleon bei hohem Energie- und Impulsübertrag vom Elektron auf das Nukleon (sog.

tiefinelastische Streuung) an punktförmigen Konstituenten innerhalb des Nukleons stattfindet. Messungen am ersten Proton-Proton-Speicherring ISR am CERN ließen sich gleichfalls nur durch harte Streuprozesse von Konstituenten innerhalb der Protonen erklären, die von Feynman zunächst Partonen genannt wurden. Erst später wurde klar, dass die Streuung an den Quarks mit drittelzahligen Elementarladungen stattfindet. Da Neutrinos nicht an der starken und der elektromagnetischen Wechselwirkung beteiligt sind, eignen sie sich besonders gut zur Untersuchung der Quarkstruktur der Nukleonen.

Experimente mit Neutrino- und Myonstrahlen bildeten daher ab 1976 einen Schwerpunkt des Programms am 400-GeV-Super-Proton-Synchrotron SPS. Da die Wirkungsquerschnitte für Neutrino-streuung sehr klein sind, benötigte man intensive Strahlen und massive Detektoren, die mehrere 1000 Ereignisse aufnehmen konnten. CERN hatte die Technik der Neutrinostrahlen entscheidend verbessert. Zur Verfügung standen Strahlen mit Intensitäten bis zu 4×10^8 Neutrinos pro 10^{13} primäre Protonen. Die große Wasserstoff-Blasen-kammer BEBC mit einem aktiven Volumen von 20 m^3 konnte zwar alle Teilchen des hadronischen Endzustandes identifizieren, aber nur eine geringe Zahl von Ereignissen registrieren. Entscheidend war die Entwicklung einer neuen Generation von elektronischen Detektoren. Die Kollaboration CERN-Dortmund-Heidelberg-Saclay (CDHS) baute ein Target-Kalorimeter mit 1400 Tonnen schweren magnetisierten Eisen-Toroiden, Szintillatorhodoskopen und Driftkammern für die Spurrekonstruktion. Die Kollaboration CERN-Hamburg-Amsterdam-Rom-Moskau (CHARM) konstruierte ein fein granuliertes Kalorimeter, optimiert für das Studium der neutralen Ströme. Auch die beiden Myonexperimente hatten

2) Zur Erzeugung des Neutrinostrahls treffen die aus dem Synchrotron extrahierten Protonen auf ein Target und erzeugen dort geladene π^- - oder K-Mesonen. Diese zerfallen im Flug durch schwache Wechselwirkung, wobei die wichtigsten Zerfallsprozesse $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ und $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ sind. Nach Absorption der Myonen verbleibt ein ν_μ - bzw. $\bar{\nu}_\mu$ -Strahl.

3) Hierbei steht NC für „neutral current“ und CC für „charged current“.

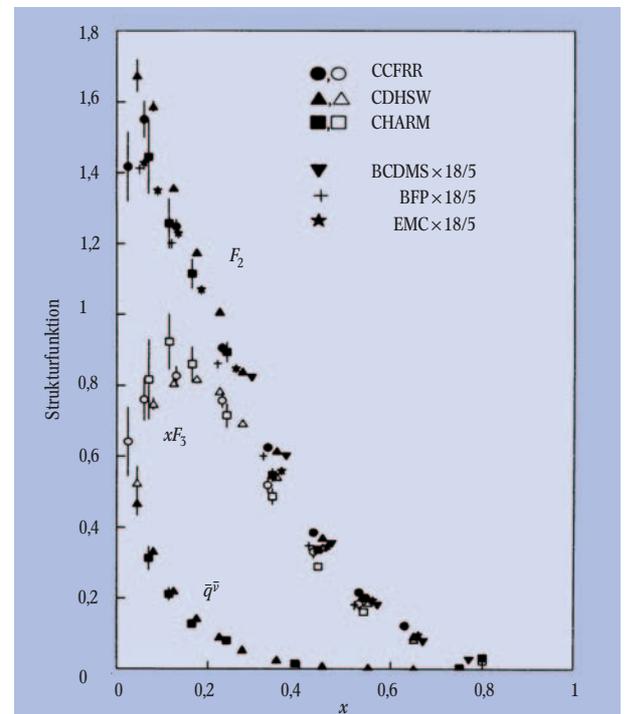


Abb. 3: Die Strukturfunktionen F_2 (oben), $x F_3$ (offene Symbole) und die Antiquark-Verteilungsfunktion \bar{q}^v (unten) als Funktion der Bjorken-Variablen x [6]. Gezeigt sind Daten der Neutrino-Experimente CDHSW, CHARM (CERN) und CCFRR (Fermilab) sowie der Myon-Experimente BCDMS, EMC (CERN) und BFP (Fermilab). Die elektromagnetische Strukturfunktion lässt sich nach einer Korrektur auf das mittlere Ladungsquadrat der Quarks von $5/18$ direkt mit der CC-Strukturfunktion F_2^N vergleichen.

unterschiedliche Schwerpunkte. Das Spektrometer der Europäischen Myon-Kollaboration (EMC) konnte außer dem gestreuten Myon alle Hadronen des Endzustandes nachweisen und ein polarisiertes Target einsetzen. Die Kollaboration Bologna-CERN-Dubna-München-Saclay (BCDMS) verfügte über ein 50 m langes Toroidspektrometer, besonders geeignet für Messungen bei höchsten Energie- und Impulsüberträgen.

Zu den ersten Ergebnissen der Neutrinoexperimente gehörte die Messung der Strukturfunktionen F_2 und F_3 des Nukleons, die Aufschluss darüber geben, aus welchen Quarks und Antiquarks das Nukleon besteht. Sie lassen sich direkt aus der Analyse der Wirkungsquerschnitte für die Reaktionen $\nu N \rightarrow \mu^- X$ und $\bar{\nu} N \rightarrow \mu^+ X$ gewinnen. Der interessante Prozess ist die Wechselwirkung des ausgetauschten W-Bosons mit einem Quark des Nukleons, die durch die Bjorken-Variable x beschrieben wird, dem Bruchteil des Gesamtimpulses des Nukleons, der von dem angestoßenen Quark getragen wird. Die Strukturfunktionen haben eine einfache Interpretation im Rahmen des phänomenologischen Quark-Parton-Modells, das seinerzeit stark diskutiert wurde. Für tiefinelastische Neutrino- und Antineutrino-streuung an einem Target, das zu gleichen Teilen aus Protonen und Neutronen besteht, gilt z. B. einfach:

$$F_2^{\nu N} = F_2^{\bar{\nu} N} = x(q(x) + \bar{q}(x)) \text{ und}$$

$$x(F_3^{\nu N} + F_3^{\bar{\nu} N}) = 2x(q(x) - \bar{q}(x)),$$

wobei $q(x) = u(x) + d(x) + s(x) + c(x)$ die Summe der Quarkverteilungen und $\bar{q}(x)$ die der Antiquarkverteilungen des Nukleons sind. Die auf den ersten Blick etwas verwirrende Abb. 3 fasst Ergebnisse von Neutrino- und Myonexperimenten zusammen, die bei einem für heutige Maßstäbe relativ kleinen Impulsübertrag $10 \text{ GeV}^2 < Q^2 < 100 \text{ GeV}^2$ erhalten wurden.⁴⁾ Die drei wichtigsten Ergebnisse sind:

- ▶ Ein erheblicher Anteil des Nukleonimpulses wird von Antiquarks getragen (in Abb. 3 mit \bar{q} bezeichnete Datenpunkte).
- ▶ Die Verteilungsfunktion $x F_3^{\nu N}$ der Valenzquarks, also der Quarks, aus deren gebundenem Zustand das Proton aufgebaut ist, hat ein Maximum und erstreckt sich bis zu hohen Werten von x .
- ▶ Einen besonders wichtigen Test des Quark-Parton-Modells liefert der Vergleich der in der Myonstreuung gemessenen elektromagnetischen Strukturfunktion $F_2^{\mu N}$ mit der in der Neutrino-streuung gemessenen schwachen Strukturfunktion $F_2^{\nu N}$. Laut Theorie ist das Verhältnis $F_2^{\mu N} / F_2^{\nu N} = (5/18) \cdot (1 - s_q)$ abgesehen von der kleinen Korrektur s_q gerade der Mittelwert der Quadrate der Ladungen der u- und d-Quarks, was gut von den Daten bestätigt wird.

Die Messung der Strukturfunktionen ermöglichte es, den Aufbau der Nukleonen aus Quarks und Gluonen in vielen weiteren Details zu verstehen. Demnach beträgt der Spin der Quarks 1/2, enthält das Nukleon drei Valenzquarks und wird etwa die Hälfte des Nukleonimpulses von Quarks und Antiquarks getragen, die andere Hälfte von Gluonen.

Die Quantenchromodynamik geht als mikroskopische Theorie der starken Wechselwirkung über das Quark-Parton-Modell hinaus und sagt vorher, dass die Strukturfunktionen auch schwach vom Impulsübertrag Q^2 abhängen.⁵⁾ Die schwierigen Analysen, an denen später auch die Myon-Kollaboration NMC führend beteiligt war, waren der erste quantitative Test der QCD und lieferten einen genauen Wert der effektiven starken Kopplung α_s . Untersuchungen des hadronischen Endzustandes führten zu einem Verständnis der Fragmentierung von Quarks in Hadronen.⁶⁾

Die bisher skizzierten Ergebnisse der Neutrinoexperimente betreffen CC-Reaktionen. Der Wirkungsquerschnitt für elastische $\nu_\mu e$ -NC-Reaktionen ist außeror-

4) Q^2 ist der Absolutbetrag des Quadrats des Viererimpulses, der vom ausgetauschten Boson auf das Nukleon übertragen wird.

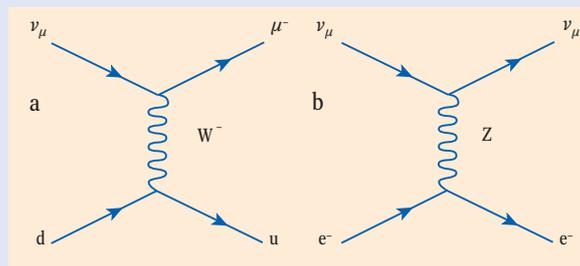
5) Genauere Messungen der Strukturfunktionen in einem weiten Bereich von Q^2 und x zeigten, dass F_2 als Funktion von Q^2 bei $x < 0,1$ ansteigt und bei $x > 0,25$ abfällt.

6) Zusammenfassende Darstellungen der Ergebnisse der Neutrinoexperimente findet man z. B. bei [3] sowie im Buch von N. Schmitz [4]. Zusammenfassungen der Ergebnisse der Myonexperimente finden sich z. B. bei [5].

Elektroschwache Wechselwirkung

Das Glashow-Salam-Weinberg-Modell, heute meist als elektroschwaches Standardmodell bezeichnet, ermöglicht die vereinheitlichte Beschreibung der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung. Alle elektroschwachen Prozesse werden darin durch den Austausch von vier Eichbosonen vermittelt: dem Photon, den beiden massiven geladenen Bosonen W^+ , W^- und dem massiven neutralen Z-Boson. Das Photon koppelt an die elektrische Ladung, auch an die der W-Bosonen. Elektromagnetische und schwache Wechselwirkung können daher nicht unabhängig voneinander sein. Eine konsistente Theorie erfordert die Einführung des neutralen Austauschbosons Z. Die drei massiven Bosonen koppeln an die schwachen Ladungen der Elementarteilchen. In der vereinheitlichten Theorie sind elektrische und

schwache Ladungen durch zwei fundamentale Größen bestimmt, die elektrische Elementarladung und den elektroschwachen Mischungswinkel θ_W , der auch das Verhältnis der Massen



M_W und M_Z von W- und Z-Bosonen parametrisiert: $\cos\theta_W = M_W/M_Z$.

Der bekannte β -Zerfall des Neutrons in Proton, Elektron und Anti-Elektronenneutrino, $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$, wird im Standardmodell durch die Umwandlung eines d-Quarks des Neutrons in ein u-Quark des Protons plus Emission ei-

nes W^- erklärt, wobei das W^- in e^- und $\bar{\nu}_e$ zerfällt. Eng damit verwandt ist die Streuung eines Myonenneutrinos an einem d-Quark (Feynman-Diagramm a). Der Endzustand enthält

neben einem u-Quark das geladene Lepton μ^- . Neutrino-Nukleon-Streuprozesse vermittelt durch Austausch eines geladenen W oder, anders formuliert, durch einen „geladenen Strom“, können daher durch Beobachtung eines Myons identifiziert werden. Ein typisches Beispiel für eine „neutrale Strom“-Reaktion ist die

Streuung eines Myonenneutrinos an einem Elektron (b, vgl. Abb. 2). Dieser Prozess kann nur durch Austausch eines neutralen Z-Bosons zustande kommen. Der Austausch eines geladenen Bosons würde die Erhaltung der Leptonzahl verletzen, da diese Zahl jeder Leptonfamilie eigen ist.

Im Standardmodell koppelt das W nur an links-händige Fermionen, das Z dagegen an links- und rechtshändige. Daher erfordert die Z-Kopplung an Fermionen die Einführung von zwei Kopplungen, meist ausgedrückt durch die Axialvektorkopplung g_{Af} und die Vektorkopplung g_{Vf} . Beide Kopplungen hängen im Standardmodell von Quantenzahlen der Fermionen und von θ_W ab. Gemäß der Leptonuniversalität sind g_{Af} und g_{Vf} für die drei geladenen Leptonen gleich.

7) Der gleiche Parameter wurde von den CHARM- und CDHSW-Kollaborationen durch Messung des Verhältnisses der Wirkungsquerschnitte für tiefinelastische NC- und CC-Reaktionen bestimmt.

8) Eine Bilanz der Zeit bis 1995 ist im Artikel von Grünewald und Hebbeker dargestellt [11].

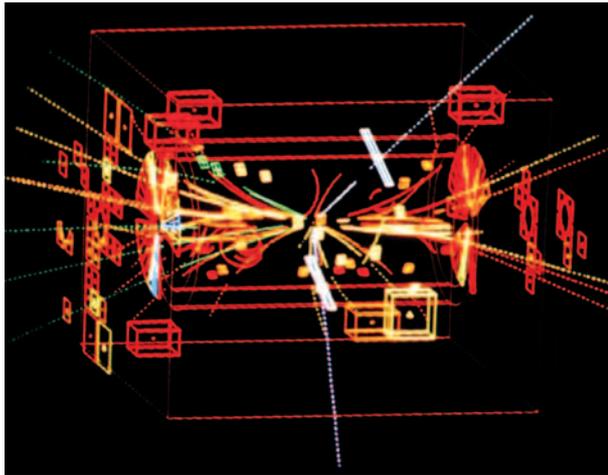
dentlich klein. Dennoch gelang es mit dem verbesserten CHARM II-Detektor (ca. 700 t Detektormasse verglichen mit ca. 180 t bei CHARM), einige 1000 Ereignisse im ν_μ - und $\bar{\nu}_\mu$ -Strahl zu registrieren. Als besonders wichtiges Ergebnis ließ sich aus der Messung des Verhältnisses der differentiellen ν_μ - und $\bar{\nu}_\mu$ -Wirkungsquerschnitte der elektroschwache Mischungswinkel θ_W , das Verhältnis der Massen der W^\pm -Bosonen und des neutralen Z-Bosons, gewinnen [7]:⁷⁾

$$\sin^2\theta_W \equiv 1 - M_W^2/M_Z^2 = 0,2324 \pm 0,0083.$$

Die Entdeckung der W- und Z-Bosonen

Um 1976 waren alle Zutaten für das Modell einer Vereinigung der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkungen zusammengetragen. Die Simulationen ergaben in grober Abschätzung 65 und 80 GeV als Massen der W- und Z-Bosonen. Eine vom CERN-Direktor unter P. Darriulat einberufene Studiengruppe kam zu dem Schluss, dass ein Elektron-Positron-Collider die ideale Maschine sei, um diese Teilchen detailliert zu studieren. Gleichzeitig wurde jedoch klar, dass Entwicklung und Bau eines solchen Beschleunigers viel Zeit kosten würden. Damit fiel die Idee von Carlo Rubbia, zunächst einmal ein schnelleres „Entdeckungsprojekt“ zu starten, einen Proton-Antiproton-Collider mit beiden Strahlen im gleichen Ring, auf fruchtbaren Boden. Dieser Vorschlag basierte auf dem glücklichen Zusammentreffen zweier Umstände:

Abb. 4: Eines der ersten Z-Ereignisse im UA1-Detektor. Das Z-Boson zerfällt in ein Elektron-Positron-Paar, von dem ein Partner fast senkrecht nach unten fliegt, der andere bei etwa 45° nach rechts oben. Die dicken Balken stehen für die hohe im Kalorimeter deponierte Energie. Aufgrund der inneren Struktur der Stoßteilchen erzeugt die Kollision, vor allem in der Strahlrichtung, eine Reihe weiterer Teilchen.



► Das SPS sollte Mitte 1976 in Betrieb gehen. Der vorgesehene Protonenstrahl mit einer Energie von 350–400 GeV würde in einem stationären Target zwar nur eine Schwerpunktsenergie von 30 GeV liefern, bei weitem nicht ausreichend für die Erzeugung der W- oder Z-Bosonen. In einem Collider jedoch, mit der geplanten Strahlenergie von 270 GeV, würden zentrale Zusammenstöße mit Antiprotonen der gleichen Energie ausreichen, obwohl wegen der inneren Struktur der Protonen nur etwa ein Sechstel dieser Energie für die Reaktion der beteiligten Quarks und Antiquarks zur Verfügung steht. Die hauptsächlich erwarteten Erzeugungskanäle waren $\bar{u}d \rightarrow W^-$ und $\bar{d}u \rightarrow W^+$ bzw. $\bar{u}u \rightarrow Z$, mit Valenz-Antiquarks von den Antiprotonen und Quarks von den Protonen.

► Simon van der Meer hatte ein Verfahren erdacht, einen ausreichend intensiven Antiprotonenstrahl zu erzeugen, die stochastische Kühlung. Dieses ursprünglich für das ISR, den allerersten Proton-Proton-Collider, entwickelte Verfahren ließ sich sehr erfolgreich auf

einen Antiproton-Akkumulaterring anwenden. Ein 26-GeV-Strahl des PS erzeugte an einem Festtarget Antiprotonen mit mittlerer Energie von 3,5 GeV, etwa eines je 10^6 Protonen, aber mit großer Energie- und Richtungsschwankung. Pick-up-Elektroden bestimmten laterale Abweichungen einzelner Teilchenbahnen von der Sollbahn und korrigierten diese durch entsprechende Impulse weiter bahnabwärts. Mehrere 10^{11} Antiprotonen konnten so pro Tag gespeichert und „gekühlt“ (im Phasenraum kompaktiert) werden. Sie wurden dann vom PS auf 26 GeV und vom SPS auf 270 GeV beschleunigt. 1981 wurden die ersten Kollisionen erzeugt.

Der Vorschlag für den Allround-Detektor UA1 war Mitte 1978 angenommen worden, der für einen zweiten Detektor UA2 ein halbes Jahr später. Der UA1-Detektor hatte für damalige Zeit enorme Ausmaße und Komplexität; seine besonderen Stärken waren eine sehr große, präzise Driftkammer als Spurendetektor und die nahezu vollständige Abdeckung des Raumwinkels 4π . UA2, für ein Drittel der Baukosten, bot kein zentrales Magnetfeld und war blind für Myonen, hatte aber ein ausgezeichnetes Kalorimeter und war damit komplementär zu UA1. Beide Detektoren waren bereit für die Registrierung der ersten Kollisionen.

Der Collider erwies sich als überraschend frei von Untergrundstrahlung. Die Luminosität konnte schnell enorm erhöht werden, innerhalb eines Jahres um den Faktor 5000 auf $5 \times 10^{28} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$! Ende 1982 hatten die Experimente sechs bzw. vier Ereignisse mit W-Kandidaten gefunden [8, 9], Mitte 1983 bereits etwa je 60 Ereignisse, zusätzlich die ersten Z-Kandidaten, mit einer, wie erwartet, etwa 10-mal kleineren Erzeugungswahrscheinlichkeit (Abb. 4). Die gemessenen Massen waren $80,3 \pm 0,4 - 1,3 \text{ GeV}$ für die W und $95,5 \pm 2,5 \text{ GeV}$ für das Z. Dies war eine frappierende Bestätigung des Modells der vereinigten elektroschwachen Wechselwirkung und gab gleichzeitig die endgültige Rechtfertigung für den Bau von LEP. Für ihre entscheidenden Beiträge erhielten Rubbia und van der Meer 1984 den Nobelpreis für Physik.

Die „Eichbosonfabrik“ LEP

Wie erwähnt, entstand die Idee, einen Elektron-Positron-Speicherring mit einer Schwerpunktsenergie von ca. 200 GeV zu bauen, bereits 1976. Nur mit einer solchen Maschine ließ sich die Dynamik der schwachen Wechselwirkung genau studieren. Das neue Standardmodell war zwar mit allen damaligen Daten verträglich, aber bereits 1979 formulierte Glashow: „It would be both arrogant and unhistorical to believe that our naive extrapolation from physics at 2 GeV to physics at 200 GeV is correct in detail.“ [10]. Nach einer sechsjährigen Bauzeit fanden im August 1989 die ersten Teilchenkollisionen im LEP statt. Damit begannen für die vier Experimente ALEPH, DELPHI, L3 und OPAL fast 12 Jahre der Datennahme.⁸⁾

Der Schwerpunkt der ersten Betriebsjahre lag bei Präzisionsmessungen an der Z-Resonanz. Der Erfolg dieser äußerst detaillierten Untersuchungen war zunächst der Tatsache zu verdanken, dass der dominante Prozess einfach ist, nämlich der Austausch eines Z zwischen dem annihilierenden e^+e^- und dem produzierten Fermion-Antifermion-Paar (Abb. 5). Außerdem waren die Luminosität der Maschine und damit die Ereignisrate hoch und der Untergrund in den Detektoren vernachlässigbar. Insgesamt registrierten die vier Experimente 15,5 Millionen Z-Zerfälle in Quarks mit

anschließender Erzeugung von Hadronen und 1,7 Millionen Z-Zerfälle in die drei geladenen Leptonen.

Die LEP-Kollaborationen entwickelten einen neuen Stil der Zusammenarbeit, die LEP-Arbeitsgruppen. Sie hatten die Aufgabe, die Ergebnisse aller vier Experimente (und auch des SLD-Experiments am SLAC) zu kombinieren, unter voller Berücksichtigung aller Korrelationen zwischen den Daten. Das wichtigste Ergebnis ist die Genauigkeit von 2×10^{-5} für eine fundamentale Naturkonstante, die Z-Masse:

$$m_Z = 91,1874 \pm 0,0021 \text{ GeV.}$$

Im Vergleich damit sind andere fundamentale Parameter des Standardmodells weniger gut bekannt, z. B. die Feinstrukturkonstante $\alpha(m_Z)$ bei der Energieskala m_Z nur auf etwa 30×10^{-5} . Lediglich die Fermi-Kopplung G_F ist mit $0,9 \times 10^{-5}$ genauer gemessen. Keiner der für die Zukunft geplanten Collider wird die Präzision der m_Z -Messung verbessern können.

Weitere präzise gemessenen Größen sind

- ▶ die totale Breite der Z-Resonanz, $\Gamma_Z = 2,4944 \pm 0,0024 \text{ GeV}$, entsprechend einer Z-Lebensdauer von etwa $2,6 \times 10^{-25} \text{ s}$;
- ▶ die Wirkungsquerschnitte σ_f^0 am Maximum der Resonanz, gemessen für Z-Zerfälle in Hadronen und in die drei geladenen Leptonen e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$. Da σ_f^0 proportional zum Produkt der partiellen Z-Breiten für den Zerfall in den e^+e^- -Anfangszustand und den $f\bar{f}$ -Endzustand ist, lassen sich daraus die partiellen Breiten Γ_{had} , Γ_e , Γ_μ , Γ_τ einzeln bestimmen;
- ▶ die sog. Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrien für die geladenen Leptonen und für b-, c- und s-Quarks.

Aus der Messung der Resonanzkurven erhält man sofort die Anzahl der leichten Neutrinospezies N_ν . Der Zusammenhang ist folgender: Die Lebensdauer des Z-Bosons hängt von allen möglichen Zerfallskanälen ab, einschließlich der unsichtbaren Kanäle für Z-Zerfälle in Neutrinos: $\Gamma_Z = \Gamma_{\text{had}} + 3\Gamma_{\text{ll}} + \Gamma_{\text{inv}}$, wobei Γ_{ll} der Mittelwert der Zerfallsbreiten in die geladenen Leptonen ist. Die Beobachtung, dass $N_\nu = \Gamma_{\text{inv}}/\Gamma_{\nu\nu}$ konsistent mit 3 ist, gehörte zu den ersten wichtigen Ergebnissen von LEP (Abb. 6). Im Einklang mit dem Standardmodell stand damit fest, dass es keine vierte Quark-Lepton-Familie mit leichten Neutrinos gibt. Der beste heutige Wert berechnet sich aus der genauen Messung des Verhältnisses $\Gamma_{\text{inv}}/\Gamma_{\text{ll}}$ dividiert durch das nach dem Standardmodell berechnete Verhältnis $\Gamma_{\nu\nu}/\Gamma_{\text{ll}}$: $N_\nu = 2,9835 \pm 0,0083$.

Durch Kombination von Messungen der partiellen Breiten, der Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrien und weiterer Messgrößen lassen sich die Vektor- und Axialvektorkopplungen für e, μ , und τ separat bestimmen. Abb. 7 zeigt die endgültigen Ergebnisse, gewonnen aus LEP- und SLD-Daten. Dargestellt ist ein extremer Zoom in die $g_{Vf}-g_{Af}$ -Ebene. Die Ergebnisse sind konsistent mit Leptonuniversalität – darunter versteht man, dass die drei geladenen Leptonen mit der gleichen Konstanten an das Z-Boson koppeln. Laut dem Standardmodell hängt die Kopplungskonstante auf Grund von Korrekturen höherer Ordnung von den Massen des Top-Quarks und des Higgs-Bosons ab. Offensichtlich wird eine kleine Masse des Higgs-Bosons bevorzugt (Abb. 7).

Erhebliche Fortschritte gibt es auch beim Verständnis der Z-Kopplungen an b- und c-Quarks. Die präzise Messung des Verhältnisses $\Gamma_{bb}/\Gamma_{\text{had}}$ stimmt z. B. mit der Erwartung des Standardmodells voll überein. Sogar die Existenz von elektroschwachen Korrekturen höherer Ordnung konnte bestätigt werden. Von der Fülle wei-

terer Ergebnisse der LEP1-Phase müssen noch erwähnt werden die Studien von B- und C-Hadron-Zerfällen, Messungen von Elementen der Quarkmischungsmatrix sowie umfangreiche Studien der Physik des hadronischen Endzustandes und der QCD. So wurde u.a. die Gruppenstruktur der QCD bestätigt und die Kopplung der starken Wechselwirkung α_s mit einem Fehler von wenigen Prozent gemessen.

1996 überschritt die Schwerpunktsenergie von LEP die Schwelle für die Erzeugung von W^+W^- -Paaren. Im Fokus des LEP2-Programms standen in den folgenden Jahren Prozesse, bei denen ein Z-Boson an ein W^+W^- -Paar koppelt, sowie die Messung der W-Masse. Aus der gemessenen Energieabhängigkeit des Wirkungsquerschnitts für den Prozess $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ und weiteren Messungen, z. B. der W^- -Winkelverteilung, folgt, dass das magnetische Dipolmoment und das elektrische

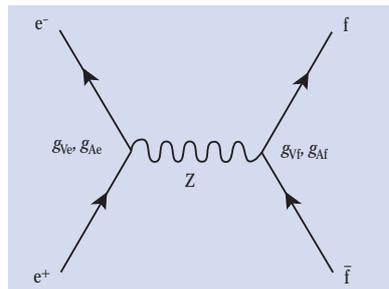


Abb. 5: Feynman-Diagramm für den Prozess $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow f\bar{f}$. Produziert werden alle in der Natur vorkommenden Fermionen, sofern kinematisch möglich. Die Physik steckt in den Vektor- und Axialvektorkopplungen g_{Vf} und g_{Af} , welche die Stärke der Wechselwirkung des Z-Bosons mit den fundamentalen Fermionen charakterisieren.

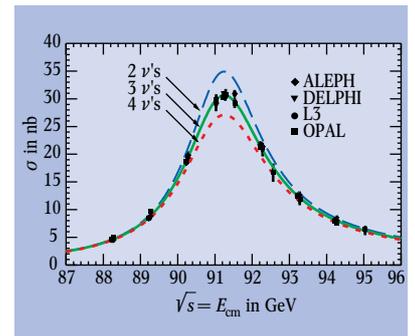


Abb. 6: Wirkungsquerschnitt für die e^+e^- -Anihilation in Hadronen an der Z-Resonanz, gemessen von den vier LEP-Kollaborationen. Die Kurven zeigen die Vorhersagen des Standardmodells für zwei, drei oder vier leichte Neutrinospezies [12].

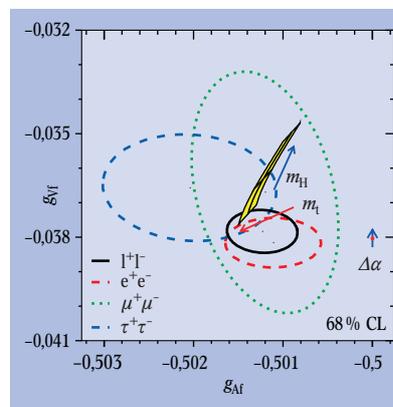


Abb. 7: Ergebnisse der Messungen der Vektor- und Axialvektorkopplungen für die drei geladenen Leptonen, dargestellt als 68% Wahrscheinlichkeitskonturen. Die durchgezogene Ellipse ist das Ergebnis unter Annahme von Leptonuniversalität. Der schattierte Bereich zeigt die Vorhersage des Standardmodells unter Annahme einer Masse des Top-Quarks von $m_t = 178,0 \pm 4,3 \text{ GeV}$ (gemessen am Fermilab) und einer Higgs-Boson-Masse im Bereich $114 \text{ GeV} < m_H < 1000 \text{ GeV}$. Die Pfeile zeigen die Richtung wachsender m_t , m_H -Werte [13].

Quadrupolmoment des W-Bosons mit der Vorhersage des Standardmodells übereinstimmen. Die schweren Eichbosonen sind demnach punktförmige Teilchen ohne innere Struktur.

Eine genaue Messung der W-Masse erwies sich als schwierig. Am besten eignen sich sog. semileptonische Ereignisse, bei denen ein W in zwei Leptonen (z. B. $\mu^-\bar{\nu}_\mu$) zerfällt und das andere in Quarks (z. B. $u\bar{d}$). Die Verteilung der invarianten Massen der beiden Quark-Jets liefert im Prinzip einen Wert der W-Masse. Unter Ausnutzung aller Information erhält man aus den LEP-Daten $m_W = 80,412 \pm 0,042 \text{ GeV}$, was gut mit der Erwartung des Standardmodells übereinstimmt, wenn man die gemessene Z-Masse verwendet.

Ein umfangreicher Teil der LEP2-Analysen bestand in der direkten Suche nach neuen Teilchen, vor allem nach dem noch fehlenden wichtigsten Teilchen des Standardmodells, dem Higgs-Boson [14]. Zwar wurden keine neuen Teilchen gefunden, aber es gelang, untere Grenzen für die Massen zu bestimmen, für das Higgs-Boson gilt $m_H > 114,4$ GeV [15]. Eine obere Grenze für m_H lässt sich aus den Präzisionsdaten gewinnen, die über elektroschwache Korrekturen höherer Ordnung von m_H abhängen. Ein Fit an alle Daten ergibt $m_H < 260$ GeV (95 % CL). Damit wird für die neuen Experimente am LHC ein enger Suchbereich für das Higgs-Boson vorgegeben.⁹⁾ Darüber hinaus wurde der Parameterraum für neue physikalische Theorien, z. B. für supersymmetrische Modelle, eingeschränkt.

Das Hauptergebnis von LEP besteht sicherlich darin, dass das Standardmodell mit einer ursprünglich nicht für möglich gehaltenen Genauigkeit bestätigt wurde. Viele fundamentale Größen wurden präziser gemessen als erwartet, z. B. die Z-Masse um einen Faktor 20 genauer. Obwohl heute sicher ist, dass es Physik jenseits des Standardmodells geben muss¹⁰⁾, wird das Standardmodell eine Approximation für jede erweiterte physikalische Theorie im Energiebereich bis 200 GeV bleiben.

Sonstige Ergebnisse

Von den vielen wichtigen Ergebnissen der CERN-Experimente seien im Folgenden einige weitere Beispiele erwähnt.

Am LEP gelang es, die starke Wechselwirkung zwischen Quarks und Gluonen bei sehr hohen Impulsüberträgen, beschrieben durch die perturbative QCD, umfassend zu untersuchen und Vorhersagen der QCD zu bestätigen. Wesentlich schwieriger gestaltete sich die Suche nach dem von der QCD vorhergesagten Phasenübergang zwischen hadronischer und thermalisierter partonischer Materie, dem Quark-Gluon-Plasma. Der experimentelle Zugang erfordert hohe Energiedichten und Temperaturen, wie sie bei ultrarelativistischen Stößen zwischen schweren Atomkernen am CERN SPS erreicht wurden. Das Schwerionenprogramm lieferte seit 1986 eine Fülle signifikanter Daten, u. a. wurden ursprünglich postulierte Signaturen für das Quark-Gluon-Plasma tatsächlich beobachtet. Eine eindeutige Interpretation der Messungen erwies sich allerdings als schwierig.

Einen weiteren Schwerpunkt bildeten die sehr detaillierten und präzisen Untersuchungen zur CP-Verletzung beim Zerfall der beiden neutralen K-Mesonen.¹¹⁾ Alle Messergebnisse bestätigen die Aussagen des Standardmodells über den Ursprung der CP-Verletzung. Selbst der erwartete, nur etwa 10^{-3} große Beitrag der so genannten direkten CP-Verletzung wurde von den Experimenten NA31 und NA48 nachgewiesen.

Am anderen Ende der Energieskala liegen Experimente am Antiproton Decelerator (AD), in dem Antiprotonen von über 3 GeV/c auf 100 MeV/c abgebremst werden; die Experimente bremsen diese weiter, bis sie thermisches Gleichgewicht bei kryogenen Temperaturen erreichen und sich speichern lassen. Die Experimente ATRAP und ATHENA haben zum Ziel, die Energieniveaus von Antiwasserstoff-Atomen mit denen von Wasserstoffatomen mit höchster Präzision zu vergleichen und damit die Gültigkeit des fundamentalen Theorems der CPT-Invarianz zu testen. Beiden Experimenten ist es bereits gelungen, eine große Anzahl von Antiwasserstoffatomen zu erzeugen und sie mit

unterschiedlichen Methoden effizient zu untersuchen. Ein drittes Experiment, ASACUSA, hat antiprotonische Heliumatome (Heliumkerne mit je einem Elektron und Antiproton) und antiprotonische Heliumionen erzeugt und aus Niveaumessungen eine obere Grenze von 10 ppb für Masse- und Ladungsunterschiede zwischen Proton und Antiproton bestimmt.

Technische Innovationen und Spin-off

Eine effiziente Nutzung der im CERN zur Verfügung gestellten Teilchenstrahlen wurde erst möglich durch eine rasante Entwicklung neuer Detektoren. Diese wurde weltweit vorangetrieben, mit vielen wichtigen Beiträgen vom CERN. Nur wenige können hier stichwortartig genannt werden. Blasen-kammern und Funkenkammern beherrschten die sechziger und siebziger Jahre. Blasen-kammerfotos zeigen alle Einzelheiten eines Ereignisses, mit Details und einer Präzision, die nie wieder erreicht wurden, waren aber mit etwa einem Foto pro Sekunde zu langsam für detaillierte Studien seltener Ereignisse. Funkenkammern brachten zwar nur Teilinformati- onen ohne den Wechselwirkungspunkt, erlaubten jedoch weit höhere Raten von etwa 100 Hz und waren zusätz- lich triggerbar.

Den nächsten großen Schritt brachte die Entwicklung der „Multiwire Proportional Chambers“ (MWPCs) und Driftkammern [18], für die Charpak 1972 den Nobelpreis erhielt. Diese Detektoren erlaubten Datenraten über 1 MHz mit Auflösungen von 50–200 μm und sind auch heute noch ein wesentliches Element der meisten Expe- rimente. Eine Weiterentwicklung, die Time Projection Chamber (TPC), kommt mit ihrer 3D-Information den Blasen-kammern am nächsten und erlaubt es, Ereignisse mit mehreren tausend Teilchen zu analysieren.

Eine große Anzahl anderer Detektortypen sahen eine ähnliche Entwicklung in unzähligen Versionen, z. B. Kalorimeter, Cherenkov-Zähler, neue Hybrid- Photodetektoren, vor allem aber Siliziumzähler mit einer Auflösung von etwa 10 μm . Zu LEP-Zeiten war deren typische Größe 1 m^2 , zurzeit ist ein Detektor mit etwa 250 m^2 im Bau. Diese Entwicklungen wurden nur möglich durch die gewaltigen Fortschritte der Elek- tronik hin zu immer kleineren Dimensionen, besserer Strahlungshärte und niedrigeren Kosten pro Kanal so- wie durch die enorme Steigerung der Computerleistung, die es jetzt ermöglichen, mehrere 10 Millionen Kanäle in einem Experiment auszulesen.

Einige Worte noch zum „Spin-off“: CERNs Aufgabe ist allein die Grundlagenforschung. Wie bei jeder intensi- v durchgeführten Forschung ergeben sich jedoch viel- fältige Anwendungen der neu entwickelten Techniken auf anderen Gebieten, am besten ungeplant, um die Of- fenheit und Unabhängigkeit der eigentlichen Aufgaben- stellung nicht zu stören. Dies wurde besonders deutlich an der Entwicklung und Verbreitung des World Wide Web (WWW), das 1990 als nur eine Option für einen systemunabhängigen Austausch von Informationen innerhalb der Gemeinschaft der Hochenergiephysiker entstanden war – mehr war vom CERN-Management nicht erwartet worden. Die völlige Offenheit des Pro- jekts (keine Patente etc.) hat zweifelsohne die gewaltige Verbreitung gefördert. An der ebenso auf breites Inter- esse stoßenden Weiterentwicklung, dem GRID, welches zusätzlich die Computerleistung weltweit verbinden soll, wird das CERN stark beteiligt bleiben.

Tausende weltweit in der Industrie und Medizin eingesetzte Beschleuniger beruhen praktisch vollstän-

9) Eine detaillierte Zusammenfassung der LEP-Ergebnisse findet man in [16], kurze Darstellungen in [17].

10) Stichpunkte sind z. B. der Zusammenhang der Gravitation mit den durch das Standardmodell beschriebenen Wechselwirkungen, die Vereinheitlichung der Wechselwirkungen, die dunkle Materie, die großen Unterschiede der Teilchenmassen, Neutrinomassen, etc.

11) C steht für Teilchen-Antiteilchen-Austausch, P für Raumpiegelung.

dig auf den Entwicklungen in der Hochenergiephysik. Sie werden u. a. benutzt zur Hadronentherapie mit Protonen und Kohlenstoffionen, für Ionenimplantationen (etwa für Hüftprothesen) und die Herstellung von Radiopharmazeutika für medizinische Diagnosen. Die europäische Vakuumindustrie hat stark von den für die CERN-Beschleuniger entwickelten Ideen profitiert; man denke nur an die Bedeutung hohen Vakuums für die Herstellung von Halbleitern. Supraleitende Magnete werden in der NMR-Diagnose eingesetzt. MWPCs dienen zum Durchleuchten von Personen wie auch großer Container an Häfen und Flughäfen, viele Detektoren werden in der Medizin, Biologie und Materialforschung eingesetzt, z. B. BGO-Kristalle in den meisten der neueren Positron-Emissions-Tomographen.

Zukunft

Etwa 80 % der Personal- und Finanzmittel des CERN werden zurzeit in das LHC-Projekt gesteckt, das Ende 2007 die ersten Daten liefern soll. Dieser Proton-Proton-Collider mit einer Energie von 7 TeV für jeden der Strahlen bringt einen gewaltigen Sprung in der Energie, um etwa eine Größenordnung, aber auch in den Anforderungen an die Detektoren und die Datenverarbeitung. Vier Experimente mit drei sehr unterschiedlichen Aufgabenbereichen sind im Aufbau. Die beiden größten Experimente, ATLAS (45 m lang, 24 m im Durchmesser) und CMS, sind als Allround-Detektoren ausgelegt. Zu ihren wichtigsten Aufgaben gehört die Entdeckung und Untersuchung des Higgs-Bosons und die Suche nach bisher unentdeckten Teilchen hoher Masse, die in erweiterten Theorien mit „neuer Physik“ (z. B. Supersymmetrie) erwartet werden. Das dritte Experiment, LHCb, ist speziell ausgelegt für die detaillierte Untersuchung der Teilchen-Antiteilchen-Unterschiede bei Zerfällen schwerer Teilchen, die das b-Quark enthalten. Bereits ein Jahr Datennahme sollte die weltweite Statistik um eine Größenordnung erhöhen. Wegen der hohen Statistik sollte auch hier eventuelle „neue Physik“ sichtbar werden. Das vierte Experiment, ALICE, wird in erster Linie Kollisionen von 82-fach geladenen Bleikernen mit einer Strahlenergie von je 574 TeV registrieren. Damit sollten in zentralen Stößen eindeutige Untersuchungen des Quark-Gluon-Plasmas möglich werden.

Die Anforderungen an die Detektoren sind derart hoch, dass ein Entwicklungsprogramm nie gekannten Umfangs erforderlich wurde. Bis zu einer Milliarde Ereignisse werden pro Sekunde erwartet, mit Teilchenflussdichten von mehr als 10 Millionen Teilchen/cm². Zudem sollten die Detektoren dieser Belastung zehn Jahre lang ohne wesentliche Einbußen standhalten. Erst nach einer Dekade Entwicklungszeit scheinen sich diese Anforderungen endlich erfüllen zu lassen. Datenvolumina in der Größenordnung von Petabytes (10¹⁵ Bytes) werden gespeichert und verarbeitet werden müssen, etwa das Zehnfache des zurzeit „Bezahlbaren“.

Glücklicherweise hat der CERN-Rat es ermöglicht, einige Aktivitäten neben diesem gewaltigen LHC-Programm weiterzuführen: ein Minimum von Fixed-Target-Experimenten, ein Programm bei niedriger Energie (radioaktive Strahlen am ISOLDE, die Produktion extrem tiefenergetischer Antiprotonen und Antiwasserstoffatome), einen intensiven Neutronenstrahl (nTOF) sowie technologische Entwicklungen für einen eventuellen Multi-TeV Elektron-Positron-Linear-Collider. Damit sollte für CERN, dieses in der Welt einmalige

Forschungslabor, auf das Europa stolz sein darf, eine fruchtbare Zukunft zumindest für die nächsten 15 Jahre gesichert sein.

Literatur

- [1] F. J. Hasert et al., Phys. Lett. **B46**, 121 (1973)
- [2] F. J. Hasert et al., Phys. Lett. **B46**, 138 (1973)
- [3] D. H. Perkins, Rep. Prog. Phys. **40**, 409 (1977),
F. Eisele, Rep. Prog. Phys. **49**, 233 (1986)
- [4] N. Schmitz, Neutrinophysik, Teubner, Wiesbaden (1997)
- [5] J. Drees und H.E. Montgomery, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **33**, 383 (1983), T. Sloan, G. Smadja und R. Voss, Phys. Rep. **162**, 45 (1988)
- [6] K. Hikasa et al., Review of Particle Properties, Phys. Rev. **D45**, III.76 (1992)
- [7] P. Vilain et al., Phys. Lett. **B335**, 246 (1994)
- [8] G. Arnison et al., Phys. Lett. **B122**, 103 (1983)
- [9] M. Banner et al., Phys. Lett. **B122**, 476 (1983)
- [10] S. L. Glashow, LEP Summer Study, CERN Yellow Report 79-01, 285
- [11] M. Grünewald und T. Hebbeker, Phys. Blätter, September 1995, S. 837
- [12] D. E. Groom et al., Review of Particle Physics, Eur. Phys. J. **C 15**, 1 (2000)
- [13] The ALEPH, DELPHI, L3, OPAL and SLD Collaborations, the LEP Electroweak Working Group, and the SLD Electroweak and Heavy Flavour Groups, wird veröffentlicht.
- [14] K. Desch und N. Wermes, Phys. Blätter, April 2000, S. 35
- [15] ALEPH, DELPHI, L3, and OPAL Collaborations, The LEP Working Group for Higgs Boson Searches, Phys. Lett. **B565**, 61 (2003)
- [16] Proc. of the Seventh Topical Seminar on „The legacy of LEP and SLC“, Siena, Italy 2001, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **109B** (2002)
- [17] W. Venus, Proc. Int. Europhys. Conf. on High Energy Physics 2001, Budapest: PrHEP-hep2001/284 (2001), J. Drees, Proc. XX Int. Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies, Rome, 2001, Int. J. Mod. Phys. **A17** (2002) 3259
- [18] G. Charpak et al., Nucl. Instr. Meth. **62**, 262 (1968)

Die Autoren

Jürgen Drees studierte Physik an der Universität Bonn, wo er 1963 bei Wolfgang Paul auch promovierte. Als Postdoc war er am SLAC anschließend an den Experimenten zum Nachweis der Quarkstruktur der Nucleonen beteiligt, für die 1990 der Nobelpreis für Physik vergeben wurde. Ende 1972 folgte er einem Ruf an die neugegründete Universität Wuppertal, der er bis zu seiner Emeritierung 2001 treu blieb. Am CERN war Drees maß-



geblich an der EMC-Kollaboration am SPS sowie am DELPHI-Experiment am LEP beteiligt.

Hans Jürgen Hilke hat in Hamburg Physik studiert und 1969 promoviert. Danach beschäftigte er sich am CERN mit der weiteren Entwicklung der Ultraschall-Blasenkammer sowie mit Arbeiten zur Theorie der Piezoelektrizität. Daran schloss sich die Mitarbeit am Aufbau verschiedener Experimente an, darunter ein Jahr am LBL,



während der Entwicklung der ersten Time Projection Chamber. Später war er Technischer Koordinator für DELPHI, zuletzt für LHCb und zwischendurch, in der F&E Phase der LHC-Experimente, Leiter der Detektor-Einheit.