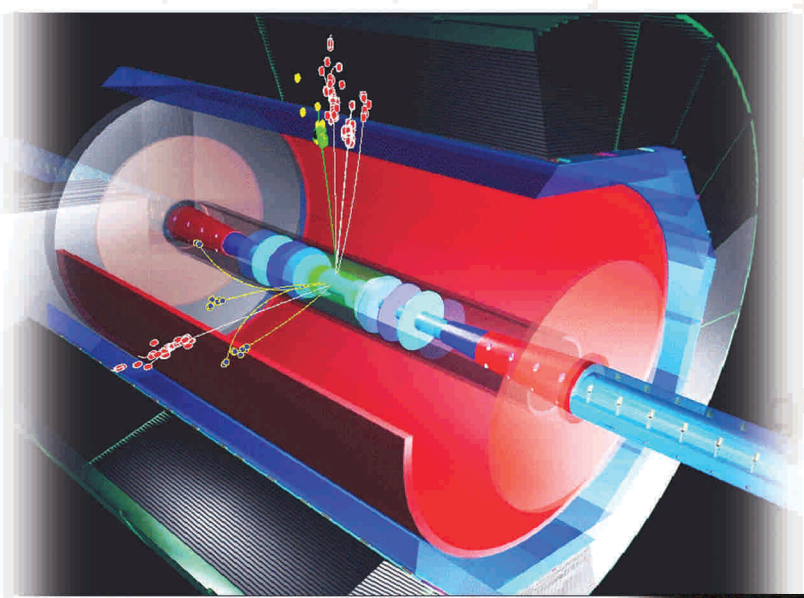
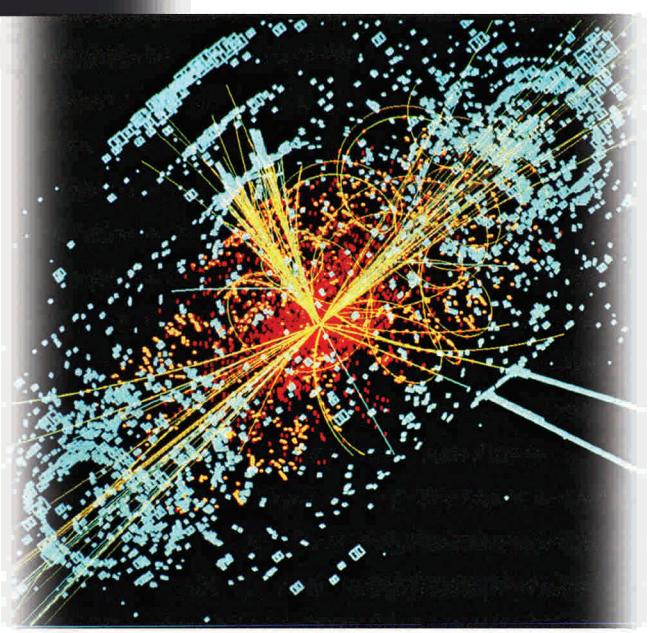
Komitee für
ElementarTeilchenphysik
KET

Teilchenphysik in Deutschland

Status und Perspektiven





Die Teilchenphysik erforscht die innersten Strukturen von Materie, Raum und Zeit sowie die fundamentalen Kräfte im Universum. In den letzten Jahrzehnten hat sie unser physikalisches Weltbild grundlegend geprägt – dennoch sind wesentliche Fragen noch nicht beantwortet.
Die vorliegende Studie bietet einen anschaulichen Einblick in die Welt der Elementarteilchenphysik, zeigt ihre noch offenen Fragen und großen Ziele auf und spricht – eingebettet in eine langfristige Strategie – Empfehlungen für die künftige Entwicklung der Teilchenphysik in Deutschland aus. Sie wendet sich vor allem an Persönlichkeiten aus Wissenschaft und Politik, an junge Naturwissenschaftler/innen aller Disziplinen, an Vertreter/innen der Medien sowie an interessierte Leser/innen aller gesellschaftlichen Bereiche.
Mit dieser Studie möchte das Komitee für Elementarteilchenphysik KET die Faszination von Grundlagenforschung vermitteln und den Dialog über Physik zwischen Fachwelt und Öffentlichkeit fortsetzen, der mit der Initiative „2000 – Das Jahr der Physik“ neue Impulse erhalten hat.

Komitee für Elementarteilchenphysik KET
November 2002

STRATEGIE UND EMPFEHLUNGEN FÜR DIE ENTWICKLUNG DER TEILCHENPHYSIK IN DEUTSCHLAND

Die Teilchenphysik erforscht die innerste Struktur von Materie, Raum und Zeit sowie die fundamentalen Kräfte im Universum. Hervorgegangen aus der Atom- und Kernphysik, entwickelte sie sich mit dem Bau großer Teilchenbeschleuniger in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zu einem eigenständigen Forschungsgebiet. Die Teilchenphysik hat in Deutschland eine lange und erfolgreiche Tradition und bietet auf der Basis der gegenwärtigen technologischen und wissenschaftlichen Entwicklungen hervorragende Zukunftsperspektiven.

Experimente mit hochenergetischen Teilchenstrahlen haben gezeigt, dass es neben dem Elektron der Atomhülle weitere, mit dem Elektron verwandte Leptonen gibt und dass Proton und Neutron, die den Atomkern bilden, aus Quarks aufgebaut sind. Nach allem, was wir heute wissen, sind Leptonen und Quarks die elementaren Bausteine der uns bekannten Materie. Ein ähnlicher Durchbruch gelang bei der Erforschung der fundamentalen Kräfte. Neben der seit langem bekannten Schwerkraft und der elektromagnetischen Kraft entdeckte man zwei weitere Kräfte: die schwache Kraft, die Atomkerne radioaktiv zerfallen lässt, und die starke Kraft, welche die Quarks im Proton und Neutron und diese im Atomkern zusammenhält. Darüber hinaus bestätigte die präzise Vermessung der Wechselwirkungen von Leptonen und Quarks auf eindrucksvolle Weise die theoretische Vorhersage, dass die elektromagnetische und die schwache Kraft lediglich verschiedene Erscheinungsformen derselben Kraft sind. Ebenso tiefgründig und weit reichend in den Konsequenzen ist die Erkenntnis der überragenden Rolle von Symmetrie und Symmetrieverletzung im Mikrokosmos. Hierin liegt nicht nur ein entscheidender Schlüssel zur Erklärung der Eigenschaften von Leptonen und Quarks und ihrer Wechselwirkungen, sondern in ihrem Wechselspiel auch ein wesentlicher Grund für die unerschöpfliche Vielfalt der Erscheinungen in der makroskopischen Welt.

Die Erforschung der elementaren Bausteine der Materie und der fundamentalen Kräfte im Universum hat das Verständnis und das Wissen um den Anfang, den Aufbau und die Zukunft unserer Welt auf revolutionäre Weise erweitert. Maßgeblichen Anteil an diesem Erfolg hatten Hochenergiebeschleuniger: in den letzten zehn Jahren vor allem die Elektron-Positron-Beschleuniger LEP am Europäischen Forschungszentrum CERN bei Genf und SLC am *Stanford Linear Accelerator Center* SLAC in Kalifornien, die Elektron-Proton-Anlage HERA am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg und der Proton-Antiproton-Beschleuniger Tevatron am US-Forschungszentrum Fermilab bei Chicago. Dazu kamen in jüngster Zeit die so genannten B-Mesonen-Fabriken PEP-II am SLAC und KEK-B am japanischen Forschungszentrum KEK in Tsukuba, beides Elektron-Positron-Beschleuniger, die bei einer, der speziellen Zielsetzung angepassten, niedrigeren Energie laufen. Eine ebenso wichtige Rolle für die erfolgreiche Entwicklung der Teilchenphysik spielten richtungsweisende theoretische Einsichten, Analysen und Präzisionsrechnungen. Die Ergebnisse dieser engen Zusammenarbeit von Experiment und Theorie sind im Standardmodell der Teilchenphysik zusammengefasst, eine Errungenschaft des 20. Jahrhunderts, der eine ähnliche Bedeutung zukommt wie der Maxwell'schen Theorie der Elektrodynamik oder der Relativitätstheorie Einsteins.

Getrieben durch die extremen technologischen Anforderungen hochenergetischer Teilchenbeschleuniger und hochempfindlicher Teilchendetektoren hat sich die experimentelle Teilchenphysik frühzeitig international organisiert und abgestimmt, um die zur Verfügung stehenden Ressourcen wirkungsvoll und zielgerichtet einzusetzen. Diese internationale Kooperation brachte nicht nur den erhofften Erfolg in der Entschlüsselung der Gesetzmäßigkeiten der Natur. Sie führte auch zur Entwicklung neuer Technologien und Verfahren, die sich durch ein breites Anwendungspotenzial in anderen Wissenschaftszweigen, in der Wirtschaft und auch in alltäglichen Bereichen auszeichnen.

Einhergehend mit der Zunahme an Wissen und technologischem Know-how ist in der Teilchenphysik ein für Grundlagenwissenschaften typischer Prozess zu beobachten. Mit jeder neuen Erkenntnis erwachsen neue tiefer gehende Fragen und neue theoretische und experimentelle Herausforderungen. Sie sind der Motor zur Entwicklung neuer Ideen, Theorien und Technologien, zur Planung und Realisierung neuer Forschungsprojekte und zur Ausbildung einer neuen Generation hochmotivierter und hochqualifizierter Wissenschaftler.

Trotz der enormen Fortschritte in unserem Verständnis der faszinierenden Welt der Leptonen und Quarks ist die Teilchenphysik alles andere als ein abgeschlossenes Gebiet der Naturwissenschaften. Einige der zentralen offenen Fragen, die sich heute stellen und die die Grundlagen unseres Weltbilds betreffen, sind:

- Wie erhalten die elementaren Teilchen ihre Masse?
- Gibt es eine Universalwechselwirkung, aus der alle bekannten fundamentalen Kräfte einschließlich der Gravitation entspringen?
- Gibt es bisher unbekannte Formen von Materie, eine neue Welt supersymmetrischer Teilchen zum Beispiel? Liegt hier die Erklärung für die „dunkle Materie", auf deren Existenz die Galaxienverteilung und die Bewegung der Sterne hinweisen?
- Welcher Natur ist die „dunkle Energie", die das Universum beschleunigt expandieren lässt?
- Gibt es verborgene Dimensionen zusätzlich zu den bekannten drei räumlichen Dimensionen?

Gewichtige theoretische Argumente und erste experimentelle Hinweise sprechen dafür, dass die Antworten auf zumindest einige dieser Fragen im Massenbereich von wenigen hundert Gigaelektronenvolt (GeV) bis einigen Teraelektronenvolt (TeV) liegen sollten. Das ist mehr als das Hundert- bis Tausendfache der Protonenmasse und zum größten Teil außer Reichweite der heute existierenden Beschleuniger. Die umfassende und präzise Untersuchung der Physik im TeV-Bereich ist *die* große Herausforderung für die Teilchenphysik in den kommenden 15 bis 20 Jahren – eine Herausforderung, die nur in weltweiter Zusammenarbeit bewältigt werden kann.

Auf der Grundlage des heutigen Wissenstands in der Teilchenphysik, der theoretischen Perspektiven sowie der experimentellen Optionen werden im Folgenden unter Berücksichtigung der vorhandenen Ressourcen Empfehlungen für die zukünftige Entwicklung der Teilchenphysik in Deutschland gegeben.

Gegenwärtig wird am CERN in Genf der Proton-Proton-Beschleuniger LHC mit 14 TeV Schwerpunktsenergie gebaut. Diese hohe Energie ist notwendig, um in den Stößen der elementaren Bausteine des Protons Energien im TeV-Bereich zu erreichen. Gleichzeitig konstruieren Hochenergiephysiker auf der ganzen Welt die Komponenten der vier großen Teilchendetektoren für die LHC-Experimente. Im Jahr 2007 soll der Betrieb aufgenommen werden. Das LHC-Projekt besitzt das derzeit höchste Potenzial für richtungsweisende Entdeckungen zur Aufklärung der oben skizzierten und in der vorliegenden Studie näher ausgeführten offenen Fragen.

Empfehlung 1: *Höchste Priorität hat die zügige Fertigstellung des am CERN im Bau befindlichen Large Hadron Colliders LHC und der LHC-Detektoren, sodass die Anlage im Jahr 2007 in Betrieb gehen kann.*

Die LHC-Experimente stellen extreme Anforderungen an Nachweis- und Messmethoden sowie an Datennahme und -verarbeitung. So sind die Datenmengen, welche die LHC-Experimente produzieren werden, mit dem heutigen Datenaufkommen der gesamten Welt-Telekommunikation vergleichbar. Die Lösungen dieser Probleme werden, wie schon in der Vergangenheit, auch hier Ausstrahlungen auf andere Gebiete und Anwendungen haben. Der vielleicht größte Gewinn sind aber die zahlreichen jungen Menschen, die durch die Aussicht auf eine exzellente Ausbildung und die Faszination internationaler Teamarbeit angezogen werden.

Die *vollständige* Beantwortung der oben aufgeführten offenen Fragen durch direkte experimentelle Untersuchungen würde Energien weit jenseits der mit Teilchenbeschleunigern erreichbaren erfordern. Einen indirekten Zugang liefern jedoch hochpräzise Messungen, die mit Hilfe von Extrapolationen den Einfluss der Physik bei sehr hohen Energieskalen schon an realisierbaren Beschleunigern sichtbar machen. Die Stärke dieser Methode wurde bereits mit den LEP- und SLC-Experimenten demonstriert, z. B. durch die indirekte Bestimmung der Masse des Top-Quarks, die in einer späteren direkten Messung am Fermilab bestätigt wurde. Voraussetzung für solche Extrapolationen sind jedoch weit genauere Analysen von Teilcheneigenschaften und Prozessen, als sie die LHC-Experimente alleine leisten können. Außerdem ist eine hohe Sensitivität notwendig für neue, über das Standardmodell hinausführende Physik, die mit dem LHC nicht oder nicht ausreichend untersucht werden kann. In eingehenden, internationalen Studien wurde demonstriert, dass die erforderlichen Messungen nur an einem Elektron-Positron-Linearcollider durchgeführt werden können. Aus diesem Grund ist von der Gemeinschaft der Teilchenphysikerinnen und -physiker in weltweitem Konsens der Bau eines Linearcolliders mit einer Gesamtenergie von 0,5 bis zu 1 TeV zum nächsten Großprojekt der Hochenergiephysik bestimmt worden.

Die von einem solchen Linearcollider zu erwartenden neuen Daten und Erkenntnisse sind also weitgehend komplementär zu den Ergebnissen, die mit dem LHC gewonnen werden können. Ein zeitlicher Überlapp mit dem Physikprogramm am LHC ist aus wissenschaftlicher Sicht dringend geboten. Die Erfahrungen mit den Elektron-Positron-Anlagen wie LEP und den entsprechenden Hadronbeschleunigern wie Tevatron belegen auf eindrucksvolle Weise die unschätzbaren Synergieeffekte einer solchen zeitlichen Verzahnung.

Empfehlung 2: *Das nächste internationale Großprojekt der Teilchenphysik soll ein Elektron-Positron-Linearcollider hoher Energie und Strahlintensität sein. Deutschland sollte zu einer solchen Anlage einen signifikanten Beitrag leisten, wo immer in der Welt sie in internationaler Kooperation gebaut wird.*

Auf Initiative von DESY wurden in langjähriger internationaler Zusammenarbeit supraleitende Beschleunigungsstrukturen entwickelt. Damit wurde die technologische Basis für das TESLA-Projekt geschaffen, einen Elektron-Positron-Linearcollider mit einer Gesamtenergie von 0,5 bis 0,8 TeV. Diese erfolgreiche Beschleunigerentwicklung ermöglicht auch den Bau eines Röntgenlasers, der neue interdisziplinäre Forschungsfelder in der Materialforschung, der Chemie, der Biologie und der Medizin eröffnet. DESY betreibt seit vielen Jahren einzigartige Großgeräte, an denen Hochenergiephysik und Forschung mit Synchrotronstrahlung unter einem Dach und in symbiotischer Wechselwirkung betrieben werden können, was durch den großen internationalen Nutzerkreis dokumen-

tiert wird. Aufgrund dieser herausragenden Rolle von DESY, der bereits geleisteten Entwicklungsarbeiten, der vorhandenen Infrastruktur und der sehr attraktiven Kombination von Teilchenbeschleuniger und Röntgenlaser, die ein breites Feld naturwissenschaftlicher Forschung bedient, ist Hamburg ein exzellenter Standort für TESLA. Der Gewinn, den Deutschland als Sitzland durch die Ausbildung und Beschäftigung von Wissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern sowie durch den Zuwachs an Attraktivität für die besten Forscher aus dem Ausland aus diesem weltweiten Projekt ziehen würde, würde ebenso wie die Entwicklung neuer Technologien und der Transfer in die Industrie die zusätzlichen Kosten für das Sitzland mehr als kompensieren.

Empfehlung 3: *Die Bestrebungen, den Elektron-Positron-Linearcollider TESLA in internationaler Kooperation in naher Zukunft bei DESY zu bauen, werden mit Nachdruck unterstützt.*

Der Wissenschaftsrat hat im Juli 2002 eine positive Stellungnahme zum TESLA-Projekt abgegeben.

Eine weitere unverzichtbare Investition in eine erfolgreiche Zukunft der Teilchenphysik in Deutschland ist die Fortführung und der erfolgreiche Abschluss laufender Experimente bei HERA, am Tevatron und an den B-Mesonen-Fabriken. Diese Beschleuniger und Experimente besitzen weiterhin ein hohes Entdeckungspotenzial. Mit diesen Anlagen kann eine Fülle neuer und wichtiger Daten gesammelt werden, die auch für die Analyse und Interpretation von Messungen am LHC und an einem zukünftigen Elektron-Positron-Linearcollider von großem Nutzen sein werden. Ein Beispiel ist die Vermessung der inneren Quarkstruktur des Protons in Elektron-Proton-Kollisionen bei HERA mit einer Auflösung von bis zu einem Tausendstel des Protonenradius. Andere Beispiele sind die Suche am Tevatron nach neuen Teilchen, vor allem aber nach dem fundamentalen Mechanismus der Erzeugung von Teilchenmassen, sowie die Erforschung der mikroskopischen Ursache für die rätselhaften Unterschiede im Verhalten von Materie und Antimaterie, die besonders an den B-Mesonen-Fabriken vorangetrieben wird.

Ebenso lohnenswert ist schließlich die Aufnahme spezieller, auf ganz bestimmte Fragen gerichteter Experimente in Bereichen wie der Neutrinophysik, Astroteilchenphysik und seltener Niederenergieprozesse, die von LHC und TESLA nicht abgedeckt werden können. Vor allem Neutrinoexperimente haben durch die jüngsten Entdeckungen von Neutrino-Oszillationen erheblich an wissenschaftlichem Interesse gewonnen. Nicht zuletzt sichert ein solches wohl abgestimmtes, diversifiziertes Programm auch die kontinuierliche Ausbildung junger Nachwuchswissenschaftler in allen Bereichen der Teilchenphysik und bewahrt so, trotz der sehr langen Vorbereitungszeiten der zukünftigen Projekte, die notwendige Expertise, um deren Anforderungen zu meistern.

Empfehlung 4: *Bis zur Fertigstellung des LHC wird die Fortführung der Experimente an HERA und der deutschen Beteiligungen am Tevatron empfohlen. Darüber hinaus sollte im Rahmen der verfügbaren Ressourcen eine Beteiligung an den B-Mesonen-Fabriken sowie an Projekten der Neutrinophysik und Teilchenphysik ohne Beschleuniger ermöglicht werden.*

Auch in Zukunft werden Beschleuniger für die weitere Entwicklung der Teilchenphysik unverzichtbar sein. Die Projektstudien zu einem Multi-TeV-Elektron-Positron-Linearbeschleuniger (CLIC), zu einem *Very Large Hadron Collider* (VLHC) oder zu den neuen Konzepten einer Neutrinofabrik und eines Myoncolliders erfordern noch langjährige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt können keine detaillierten Empfehlungen zur Realisierung von Großanlagen gegeben werden, die über die hier anvisierte Zeitspanne von 15 bis 20 Jahren hinausführen. Da jedoch neue Beschleunigerprojekte Jahrzehnte substanzieller Forschung und Entwicklung erfordern, ist eine Fortführung der Forschungsarbeiten für neue Beschleuniger- und Detektortechnologien notwendig, will man für heute noch nicht absehbare Herausforderungen in der Teilchenphysik gerüstet sein.

Empfehlung 5: *Die Forschung und Entwicklung von Beschleuniger- und Detektortechnologien muss kontinuierlich fortgeführt werden.*

Die hier empfohlene Strategie für die nächsten 15 bis 20 Jahre knüpft an die in den vergangenen Jahrzehnten erzielten Erfolge auf diesem Gebiet der Grundlagenforschung an und zeigt auf der Basis des gegenwärtigen Wissensstands und technologischen Fortschritts den Weg in eine viel versprechende Zukunft. Mit Teilchenphysikgruppen an mehr als zwanzig Universitäten und mit CERN, dem Helmholtz-Zentrum DESY und den Max-Planck-Instituten hat Deutschland einen im internationalen Vergleich hohen Standard erreicht. Einen wesentlichen Anteil daran haben die Universitäten, ohne deren führende Rolle in der Ausbildung von Diplomanden und Doktoranden und ohne deren Beiträge zu den Experimenten sowie zum Auf- und Ausbau einer starken theoretischen Teilchenphysik dieses Gebiet seine Dynamik nicht bewahren könnte.

Als erkenntnisorientierte Grundlagenforschung ist die Teilchenphysik ausschließlich auf die Finanzierung aus öffentlichen Mitteln durch Bund und Länder angewiesen.

Der deutsche Beitrag zu CERN wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF finanziert, ebenso 90 % der Kosten von DESY, während etwa 10 % der Kosten für DESY Hamburg vom Land Hamburg und für DESY Zeuthen vom Land Brandenburg getragen werden. Die Finanzierung der Max-Planck-Gesellschaft teilen sich Bund und Länder. Die Bundesländer stellen auch erhebliche Mittel für Personal, Grundausstattung, Werkstätten und die allgemeine Infrastruktur der Universitätsinstitute bereit. Der Bund ermöglicht den Universitätsgruppen im Rahmen der Verbundforschung eine Beteiligung an den Großprojekten der Teilchenphysik. Das deutsche Verbundforschungssystem hat sich als sehr erfolgreich erwiesen und sollte unbedingt beibehalten werden. Theoretische Gruppen und Graduiertenkollegs werden darüber hinaus von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

Bei einer Fortführung dieser gezielten und höchst effizienten Förderung und mit einer starken Beteiligung am LHC bei CERN, einem hohen Engagement für einen Elektron-Positron-Linearcollider, insbesondere für TESLA bei DESY, und einem ausgewogenen begleitenden Programm wird Deutschland international weiterhin eine führende Rolle auf dem Gebiet der Teilchenphysik spielen können. Als Gegenleistung kann die Gesellschaft von der Teilchenphysik auf dem Weg in die Zukunft neue Erkenntnisse von hohem und bleibendem kulturellen Wert, technologische Entwicklungen auf höchstem Niveau, Ausstrahlung in andere Wissenschaftsgebiete und in die Wirtschaft sowie hoch qualifizierte junge Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker erwarten.

English translation at the end of this document on page V

INHALTSVERZEICHNIS

1. TEILCHENPHYSIK – WEGE UND ZIELE 8

2. DIE WELT DER ELEMENTARTEILCHEN 13

2.1 Materie und Kräfte 13
2.2 Teilchenphysik und Kosmologie 19
2.3 Zentrale offene Fragen 20

3. EXPERIMENTE: STATUS UND OPTIONEN 24

3.1 Experimente an den heutigen Beschleunigern 25
3.2 Der Large Hadron Collider LHC 31
3.3 Der Elektron-Positron-Linearcollider TESLA 36
3.4 Langfristige Perspektiven für Experimente an Beschleunigern 43
3.5 Experimente ohne Beschleuniger 46
3.6 Verknüpfung von Experiment und Theorie 50
3.7 Zeitliche Einordnung der Projekte 51

4. TEILCHENPHYSIK IN DEUTSCHLAND 52

4.1 Struktur und Institutionen 53
4.2 Personal 54
4.3 Finanzierung 54
4.4 Wissenschaftlicher Nachwuchs und Zukunftsperspektiven 55

5. AUSSTRAHLUNG 57

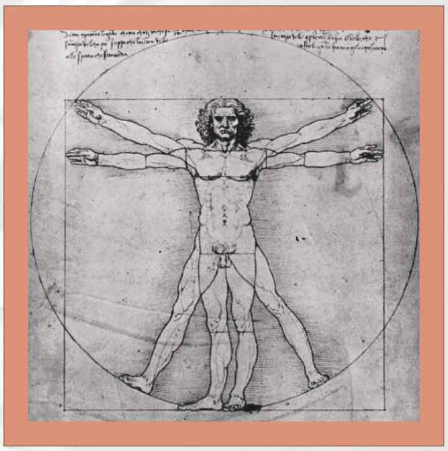
5.1 Ausbildung 58
5.2 Informationstechnologie und -verarbeitung 58
5.3 Beschleuniger- und Detektortechnologie 61
5.4 Öffentlichkeitsarbeit 63

6. PERSPEKTIVEN FÜR DIE NÄCHSTEN 15 BIS 20 JAHRE 64

10^{26} m

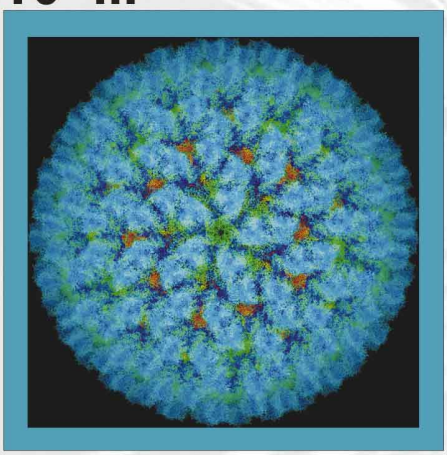
VOM UNIVERSUM...
VOM UNIVERSUM...
VOM UNIVERSUM...

10^{7} m

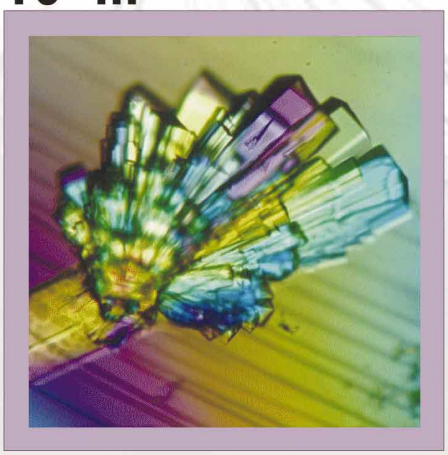


1 m

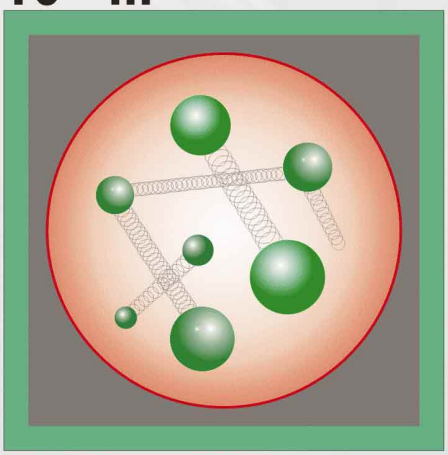
10^{-4} m



10^{-8} m



10^{-15} m



... ZUM QUARK
... ZUM QUARK
... ZUM QUARK

1 · TEILCHENPHYSIK – WEGE UND ZIELE

Ziel der Teilchenphysik ist es, die grundlegenden Strukturen und Gesetze im Mikrokosmos aufzudecken und zu verstehen. Im Verbund mit den übrigen Zweigen der Physik wird angestrebt, eine konsistente Beschreibung unserer Welt zu finden, die von den größten Dimensionen des Universums bis zu den kleinsten Dimensionen im Mikrokosmos alle Phänomene umfasst. Die Bandbreite der Maßstäbe, die es dabei zu meistern gilt, ist gewaltig: Während der Durchmesser des heute sichtbaren Universums etwa 10^{+26} Meter beträgt, gilt es im Reich der kleinsten Teilchen Fragestellungen zu ergründen, die sich auf Raumbereiche bis hinunter zu 10^{-35} Metern beziehen. Strukturen, die sich über mehr als 10 Milliarden Jahre im Universum entwickelt haben, spielen dabei ebenso eine Rolle wie physikalische Prozesse, die innerhalb von 10^{-43} Sekunden ablaufen – also auf der Zeitskala, welche die Anfänge des Universums kennzeichnet.

Einen entscheidenden Schlüssel für das Verständnis unserer Welt bietet ein vor mehr als zwei Jahrtausenden postuliertes naturphilosophisches Prinzip: Das von Demokrit entwickelte „Reduktionsprinzip“ beruht auf der Vorstellung, dass sich hinter den sichtbaren Materieformen einfache Grundstrukturen verbergen. Es führt die Vielfalt der makroskopischen Erscheinungsformen auf eine geringe Anzahl von verschiedenen Bausteinen zurück, aus denen sich die gesamte Materie zusammensetzt. Das dynamische Verhalten dieser Bausteine und der Aufbau von komplexen Strukturen wird von Kräften beherrscht, die sich letztlich auf einige wenige fundamentale Wechselwirkungen reduzieren lassen.

Eine kurze Geschichte der Teilchenphysik

Das Reduktionsprinzip bewährte sich erstmals im Laufe des 19. Jahrhunderts, als aus dem Periodensystem der Elemente und der Gasdynamik die Atomistik entwickelt wurde. Der nahezu unendlichen Vielfalt von makroskopischen Materieformen stehen nur knapp hundert unterschiedliche Atome gegenüber. Die Atomistik stellt einen ersten bedeutenden Schritt auf dem Weg zu unserem Verständnis der Natur dar: Sie ist mehr als nur die Grundlage, um die makroskopische materielle Welt zu verstehen – nicht nur die technischen Gegebenheiten unserer Alltagswelt, sondern auch die chemischen und biologischen Vorgänge des Lebens beruhen auf molekularen und atomaren Prozessen.

Ihren Ursprung hat die Teilchenphysik – manchmal auch Elementarteilchenphysik genannt – im eigentlichen Sinne am Ende des 19. Jahrhunderts, als durch die Experimente von Joseph J. Thomson und Walter Kaufmann zusammen mit Emil Wiechert das Elektron, das erste subatomare Teilchen, entdeckt wurde. Anfang des 20. Jahrhunderts wies Ernest Rutherford nach, dass die Atome aus einem winzigen, äußerst dichten Kern bestehen und dass die Elektronen die Hülle der Atome bilden. Wie sich später zeigte, setzen sich die Atomkerne aus elektrisch positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen zusammen. Anfang der 1930er Jahre hatte man damit ein System gefunden, das den Aufbau der Materie anhand von nur drei verschiedenen Bausteinen erklärte.

Doch schon bald zeigte sich, dass die Natur wesentlich reichere Formen besitzt. Mit dem Positron entdeckte man das erste Teilchen aus Antimaterie. Die Erforschung der Zerfälle von Atomkernen offenbarte eine weitere Überraschung: Es zeigte sich, dass das Elektron ein elektrisch neutrales Partnerteilchen, das Neutrino, besitzt. Beide haben sich bis heute als elementar erwiesen; es gibt bei beiden Teilchen keinerlei Hinweis auf eine Unterstruktur. Mit dem Myon wurde der erste Vertreter einer völlig neuen Art von Leptonen gefunden, wie die mit Elektron und Neutrino verwandten Teilchen genannt werden. Proton und Neutron dagegen verloren ihren Status als elementare Teilchen: Sie gehören beide zu den so genannten Hadronen, einer großen Gruppe von zusammengesetzten Teilchen, die über die starke Kraft miteinander wechselwirken. Wie sich Ende der 1960er Jahre zeigte, sind all diese Hadronen aus Teilchen einer neuen Spezies aufgebaut, den Quarks. Diese gelten nach dem gegenwärtigen Stand der Erkenntnis als elementar. Auf tieferer Stufe offenbart sich somit wieder ein bestechend einfaches Teilchensystem für die uns bekannte Materie.

Parallel zu den Grundbausteinen der Materie wurden auch die fundamentalen Kräfte erforscht, die zwischen diesen Grundbausteinen wirken. Während das späte 19. Jahrhundert vom Elektromagnetismus geprägt war, entdeckte man im 20. Jahrhundert zwei neue Arten von elementaren Kräften: die schwache Kraft, die für die radioaktiven Zerfälle verantwortlich ist und die die Erzeugung von Sonnenenergie ermöglicht, sowie die starke Kraft, welche die Teilchen im Atomkern zusammenhält. An der Aufklärung der Struktur beider Wechselwirkungen waren die europäischen Teilchenphysikzentren CERN in Genf und DESY in Hamburg maßgeblich beteiligt. Die vierte Grundkraft der Natur – die Schwerkraft oder Gravitation, die uns auf der Oberfläche der Erde hält und zugleich die Bewegung der Sterne und die Struktur des Universums beherrscht – ist bereits seit vielen Jahrhunderten bekannt; dennoch ist sie von allen fundamentalen Kräften diejenige, die uns heute noch die größten Rätsel aufgibt.

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts hat die Teilchenphysik grundlegende Gesetzmäßigkeiten im Mikrokosmos systematisch entschlüsselt: Es ist ihr gelungen, die Strukturen der uns bekannten Materie aufzudecken und ihre komplexen Wechselwirkungen auf eine kleine Zahl fundamentaler Kräfte zwischen den Teilchen zurückzuführen. Der heutige Kenntnisstand wird im Standardmodell der Teilchenphysik zusammengefasst. Das Modell umfasst drei Familien von Leptonen und Quarks sowie die elektrische, die schwache und die starke Wechselwirkung. Es ist im Rahmen der von

Max Planck, Werner Heisenberg und anderen theoretischen Physikern entwickelten Quantentheorie definiert. Zusammen mit der von Albert Einstein formulierten Allgemeinen Relativitätstheorie beschreibt es die fundamentalen Teilchen und ihre Wechselwirkungen korrekt in einem Bereich, der sich von kosmischen Ausdehnungen bis hinunter zu Abständen um 10^{-19} Meter (m) erstreckt – bestätigt in vielen Messungen mit einer experimentellen Genauigkeit im Promillebereich und besser.

Das Standardmodell bringt tief in der Natur verankerte Symmetriestrukturen (siehe Box 2.3 Seite 15) zum Ausdruck und offenbart die Ästhetik der Naturgesetze des Mikrokosmos. Über den empirischen Erfolg hinaus ist es darum als Theorie der Elementarteilchen auch aus erkenntnistheoretischen Gründen äußerst attraktiv. Es weist in seiner Beschreibung der fundamentalen Wechselwirkungen einen hohen Grad an mathematischer Geschlossenheit und Einheitlichkeit auf.

Beschleuniger

Der große Durchbruch in unserem Verständnis der Welt, den die Teilchenphysik in den vergangenen Jahrzehnten gebracht hat, hängt eng mit dem Vorstoß zu immer kleineren Abständen, in immer kleinere Raumdimensionen zusammen. Dem Heisenberg'schen Unschärfeprinzip der Quantentheorie zufolge (siehe Box 2.2 Seite 14) benötigt man dazu Teilchen zunehmend höherer Energie. Um die kleinsten Strukturen der Materie systematisch zu erforschen, müssen deshalb Beschleunigeranlagen gebaut werden, in denen einzelne Teilchen auf sehr hohe Energie gebracht werden können. Denn ähnlich wie beim Elektronenmikroskop gilt allgemein, dass sich das Auflösungsvermögen mit steigender Energie der Teilchen erhöht: Je größer die Energie der Teilchen, desto kleinere Abstände lassen sich mit ihrer Hilfe untersuchen. Damit ist der Fortschritt bei der Erforschung der kleinsten Strukturen des Universums eng an die Entwicklung von Hochenergiebeschleunigern gekoppelt, die an der Vorfront der Technologie operieren.

Mitte der 1920er Jahre entwickelte Rolf Wideröe an der Technischen Hochschule Aachen die erste Apparatur zur Beschleunigung von Teilchen mit Wechselspannung – den ersten Linearbeschleuniger. Seit dieser Pionierarbeit haben sich die Teilchenbeschleuniger zu gewaltigen, technologisch überaus anspruchsvollen Anlagen entwickelt, in denen Strahlen hochenergetischer Protonen, Elektronen und deren Antiteilchen zur Kollision gebracht werden. Dank stetiger Weiterentwicklung der Technologie konnten die Energien im Lauf der Jahrzehnte um viele Größenordnungen gesteigert werden, ohne dass die Aufwendungen auch nur annähernd so stark angestiegen wären.

Bis Ende 2000 wurde beim Forschungszentrum CERN in Genf der *Large Electron-Positron Collider* LEP (Abb. 1.1) betrieben, ein Kreisbeschleuniger von 27 km Umfang, in

Abb. 1.1: Der bis zum Jahr 2000 betriebene *Large Electron-Positron Collider* LEP beim Europäischen Zentrum für Teilchenphysik CERN in Genf. Der Beschleuniger mit den vier unterirdischen Detektoren ALEPH, DELPHI, L3 und OPAL spielte eine Schlüsselrolle bei der Untersuchung der Bausteine der Materie und der fundamentalen Kräfte im Mikrokosmos.

Abb. 1.2: Die Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA mit den vier Experimenten H1, HERA-B, HERMES und ZEUS beim Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg. Die Anlage ist das weltweit größte Elektronenmikroskop zur Untersuchung der innersten Struktur der Protonen, ihrer Bausteine und der zwischen ihnen wirkenden Kräfte.

dem sich Elektronen und Positronen bei sehr hohen Energien gegenseitig vernichteten und damit einen Art „Mini-Urknall" erzeugten. Das Forschungszentrum DESY in Hamburg verfügt mit der Elektron-Proton-Speicherringanlage HERA (Abb. 1.2) über ein einzigartiges Instrument, um die Struktur des Protons in Bereichen bis zu einem Tausendstel seines Durchmessers zu mikroskopieren. Der Tevatron-Beschleuniger bei Fermilab nahe Chicago bringt Protonen mit Antiprotonen zur Kollision – eine besonders

effektive Methode, nach neuen schweren Teilchen zu suchen. In diesen modernen Beschleunigeranlagen werden Energien von mehreren hundert Gigaelektronenvolt (GeV, siehe Box 2.1 Seite 13) auf winzige Raumbereiche in der Größenordnung von 10^{-17} m konzentriert. Damit lassen sich Energiekonzentrationen erzeugen, wie sie im Universum nur milliardstel Bruchteile von Sekunden nach dem Urknall herrschten.

Die Teilchenphysik ist jedoch keineswegs eine abgeschlossene Wissenschaft. Die bisher gewonnenen Erkenntnisse haben einerseits zu einem kohärenten Bild von Materie und Kräften geführt, auf der anderen Seite ermöglichen sie es, die noch offenen Fragen an die Natur besser und präziser zu formulieren. Die in Zukunft von der Teilchenphysik zu lösenden Aufgaben erfordern eine Fortsetzung der Anstrengungen in Entwicklung und Bau von Beschleunigern und Instrumenten sowie im Bereich der theoretischen Physik.

Mit dem *Large Hadron Collider* LHC, dem bei CERN im Aufbau befindlichen Protonenbeschleuniger, wird im Jahr 2007 der erste Schritt in das bisher unerreichbare Feld physikalischer Forschung im Teraelektronenvolt-Bereich (TeV) getan, von der bahnbrechende Entdeckungen erwartet werden. Bei DESY wurde mit TESLA in den letzten zehn Jahren ein Elektron-Positron-Linearcollider konzipiert, mit dem sich – komplementär zum LHC – nicht nur sehr hohe Energien (0,5 bis etwa 0,8 TeV), sondern auch eine besonders hohe Präzision der Messungen erreichen lassen. Die Verbindung von hoher Energie mit hoher Präzision, die schon bei LEP begonnen wurde, begründet ein äußerst viel versprechendes Forschungsfeld; die genaue Analyse von Quanteneffekten (siehe Box 2.2 Seite 14) erlaubt es, Strukturen zu entdecken und zu erforschen, die weit jenseits der am Beschleuniger direkt erreichbaren Energien liegen.

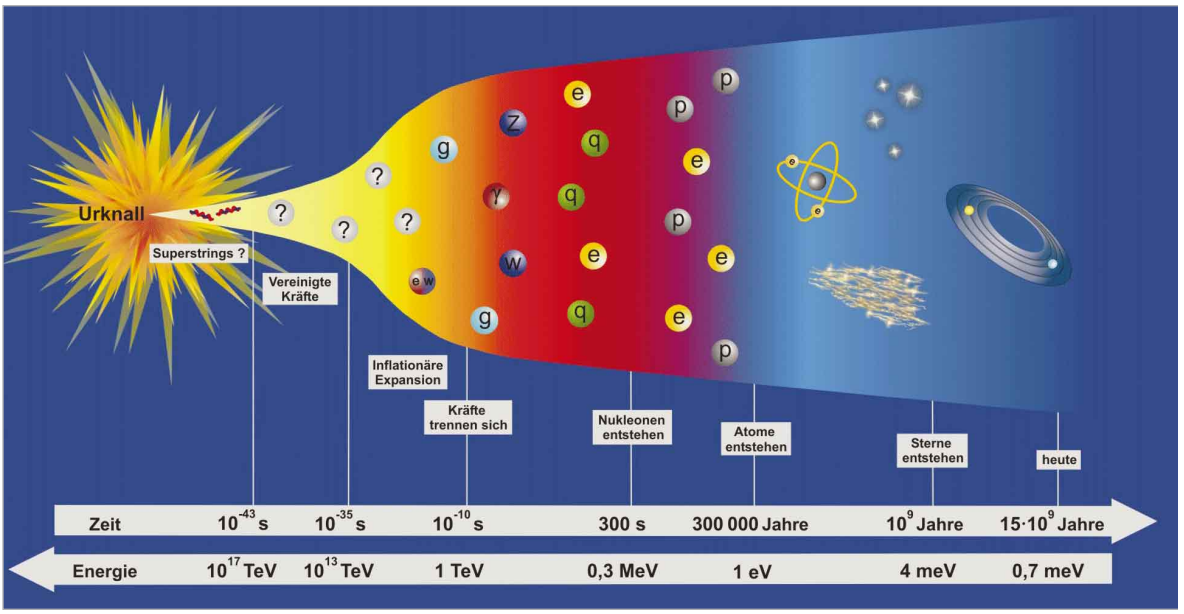


Abb. 1.3: Die Entwicklung des Universums vom Urknall bis zur heutigen Zeit. Die Teilchenphysik erforscht die Naturgesetze, die schon die früheste Entwicklung des Universums beherrschten.

Offene Fragen

Trotz seiner herausragenden Erfolge ist das Standardmodell mit Sicherheit nicht die *Ultima Ratio* der Physik. Es bietet zwar – nach Einführung verschiedener empirischer Parameter, Massen und Kopplungsstärken – innerhalb der erwähnten Grenzen eine gültige Beschreibung der in der Teilchenphysik beobachteten Phänomene, es ist jedoch unvollständig und lässt viele grundlegende Fragen nach der Natur der fundamentalen Teilchen und Kräfte und ihren Symmetriestrukturen offen. Unter ihnen sind es vor allem die folgenden drei Fragen, die man in absehbarer Zukunft experimentell zu beantworten hofft:

- Was ist der Ursprung der Masse?
- Gibt es eine Universalkraft als gemeinsamen Ursprung der verschiedenen Kräfte?
- Besitzt die Raumzeit mehr als vier Dimensionen?

Die Beantwortung dieser Fragen wird tief greifende Erkenntnisse über die Natur und ihre grundlegende Gesetzmäßigkeiten vermitteln und unser physikalisches Weltbild entscheidend formen. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Tatsache, dass wesentliche Elemente dieser Fragen mit den jetzt und in naher Zukunft zur Verfügung stehenden Beschleunigern beantwortet werden können. HERA, Tevatron, LHC und Elektron-Positron-Linearcollider, wie in der Form von TESLA konzipiert, eröffnen weit reichende Perspektiven und tiefe Einblicke in die Natur des Universums. Der Ursprung der Masse wird aller Voraussicht nach aufgeklärt werden können. Hochpräzisionsexperimente werden es erlauben, Einblicke in die Physik nahe der Planck-Skala (10^{19} GeV) zu gewinnen, dem Bereich, in dem die Vereinigung aller fundamentalen Kräfte vermutet wird. Sogar die Struktur der Raumzeit selbst lässt sich experimentell bei hohen Energien erforschen. Auf diese Weise kann der Weg zur Formulierung einer umfassenden Theorie der Materie geebnet werden.

Teilchenphysik und Kosmologie

Die von der Teilchenphysik gewonnenen Einsichten sind auch von entscheidender Bedeutung für das Verständnis der Entwicklung des Universums von seinen frühesten Anfängen bis zur heutigen Zeit. Kosmologische Ansätze zur Erklärung der ersten Augenblicke des Universums und seiner fortschreitenden Entwicklung werden nach dem Unschärfeprinzip von der Physik bei höchsten Energien bestimmt – von der Planck-Energie bis zu den Energiebereichen der Kern- und Atomphysik (Abb. 1.3).

Viele der wichtigsten Aspekte in der Entwicklung des Universums müssen in Experimenten der Teilchenphysik überprüft werden. Ohne die Erkenntnisse der Teilchenphysik lässt sich kein solides Gebäude der Kosmologie errichten.

Umgekehrt übt die Kosmologie einen bedeutenden Einfluss auf die Entwicklung teilchenphysikalischer Fragestellungen aus – sei es bei der Frage nach Existenz und Natur neuartiger Materieformen, wie der dunklen Materie im Universum, oder nach der Struktur von Raum und Zeit selbst. Gemeinsames Ziel beider wissenschaftlichen Disziplinen ist es, ein einheitliches Bild von den innersten Strukturen des Universums und von seiner Entwicklung vom Urknall bis heute zu gewinnen.

Ausstrahlung der Teilchenphysik

So unterschiedlich die physikalische Forschung in ihren einzelnen Bereichen auch ausgeprägt ist, so leitet sie ihr Selbstverständnis doch letztlich aus dem zutiefst menschlichen „Sich-Wundern“ über die Natur und aus dem Bestreben ab, die Vorgänge in unserer Welt zu verstehen. Dies erreicht sie, indem sie empirische und experimentelle Erkenntnis mit strenger mathematischer Methodik zu einer klaren theoretischen Fassung der Vorstellungen über die Natur verbindet.

Abb. 1.4: Röntgenaufnahme, erstellt durch Wilhelm Conrad Röntgen von der Hand seiner Frau (22. Dezember 1895)

Der Gewinn an naturwissenschaftlicher Erkenntnis durch die Physik hat aber auch auf der Anwendungsseite zu revolutionären Entwicklungen geführt. Enge Verbindungen bestehen zu Hochtechnologien aller Art, zu den Lebenswissenschaften und zur Medizin. Die Entwicklung der modernen Zivilisation, ihre Industrie- und Dienstleistungsformen, wären ohne die Elektronik, Halbleiterphysik, Lasertechnologie und andere Früchte der im 20. Jahrhundert entwickelten Atom- und Teilchenphysik nicht möglich gewesen.

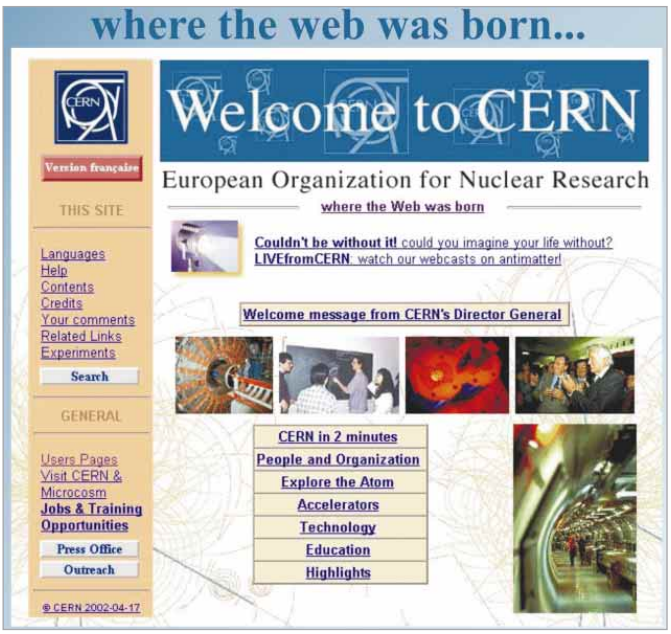


Abb. 1.5: Ausstrahlung der Teilchenphysik: Das *World Wide Web* WWW ist aus der heutigen Informationsgesellschaft nicht mehr wegzudenken. Es wurde am Forschungszentrum CERN erfunden, um die weltweite Kommunikation unter Teilchenphysikern zu erleichtern.

Bahnbrechende Neuerungen entstehen häufig auch an Stellen, an denen man sie nicht direkt gesucht hat. Ein historisches Beispiel dafür ist die Entdeckung der Röntgenstrahlen durch Wilhelm C. Röntgen (Abb. 1.4), ein Beispiel aus jüngster Zeit das aus der modernen Informationsgesellschaft nicht mehr wegzudenkende *World Wide Web* WWW (Abb. 1.5). Es ist als Nebenprodukt der Teilchenforschung am CERN entstanden, um den vielen über die Welt verstreuten Wissenschaftlern, die an den komplexen Beschleunigerexperimenten zusammenarbeiten, einen effizienten Informationsaustausch zu ermöglichen.

Die Erfahrung zeigt, dass die Zeitspannen, bis neue Erkenntnisse und Methoden der Grundlagenforschung zu praktischen Anwendungen führen, häufig in Jahrzehnten zu messen sind. Dies macht es erforderlich, eine Erkenntniswissenschaft wie die Teilchenphysik über lange Jahre beharrlich zu entwickeln, ohne einen sofortigen Nutzen zu erwarten.

Die Grundlagenforschung zieht junge Menschen an und begeistert sie für die Wissenschaft. Sie formt ihren Intellekt und vermittelt ihnen Qualifikationen, deren unsere Gesellschaft lebensnotwendig bedarf. Eine international wettbewerbsfähige Grundlagenforschung gehört darum zu den wichtigsten Ressourcen eines Staates.

2 · DIE WELT DER ELEMENTARTEILCHEN

2.1 Materie und Kräfte

Die grundlegenden Strukturen der Materie und Kräfte, wie wir sie heute kennen, werden – mit Ausnahme der Gravitation – im „Standardmodell der Teilchenphysik" zusammengefasst. Drei Komponenten bestimmen das Modell:

- zwei Arten von Materieteilchen: die Leptonen und die Quarks;
- drei verschiedene fundamentale Kräfte: die starke, die elektromagnetische und die schwache Kraft;
- der Higgs-Mechanismus, durch den die fundamentalen Teilchen ihre Massen erhalten.

Während die ersten beiden Komponenten experimentell belegt sind, ist der Higgs-Mechanismus bisher nur eine, wenn auch gut motivierte, Hypothese. Der experimentelle Nachweis, ob dieser Mechanismus zur Erzeugung der Massen tatsächlich so wirkt, wie er im Standardmodell formuliert wird, ist eine zentrale Aufgabe der heutigen Teilchenphysik.

Box 2.1 Die Äquivalenz von Masse und Energie

Im Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie stellte Albert Einstein die berühmte Beziehung $E = m\,c^2$ auf. Diese besagt, dass die Masse eines Objekts als eine Form von Energie verstanden werden kann: Energie E und Masse m sind über die Lichtgeschwindigkeit c miteinander verbunden.

Ein Beispiel für die Umwandlung von Masse in Energie ist die Kernfusion: Die Sonne erzeugt Energie durch das Verschmelzen von zwei Protonen und zwei Neutronen zu einem Heliumkern, dessen Masse kleiner ist als die Summe der ursprünglichen Teilchenmassen.

Mit dem richtigen Reaktionspartner kann Masse sogar komplett in Energie verwandelt werden: Trifft ein Teilchen auf ein Antiteilchen, so können sie sich gegenseitig vernichten. Übrig bleiben nur Lichtteilchen – also Energie. Umgekehrt können aus der Bewegungsenergie von leichten Teilchen schwerere gewonnen werden. Diese Umwandlung von Energie – also letztlich von elektrischem Strom aus dem Netz – in neue Teilchen wird in Teilchenkollisionen an Beschleunigern ausgenutzt.

Da die Lichtgeschwindigkeit eine universelle Größe ist, kann sie als Maßeinheit verwendet werden, sodass Masse direkt mit Energie identifiziert werden kann. Ein Elektronenvolt (kurz 1 eV) ist die Energiemenge, die ein Elektron beim Durchfliegen einer Spannungsdifferenz von einem Volt gewinnt. Ein Gigaelektronenvolt (GeV) entspricht etwa der Masse eines ruhenden Protons; ein Teraelektronenvolt (TeV) wiederum sind 1000 GeV.

Dimensionen:

10^{-18}	a (atto)	1 Trillionstel	= 0,000 000 000 000 000 001
10^{-15}	f (femto)	1 Billiardstel	= 0,000 000 000 000 001
10^{-12}	p (piko)	1 Billionstel	= 0,000 000 000 001
10^{-9}	n (nano)	1 Milliardstel	= 0,000 000 001
10^{-6}	µ (mikro)	1 Millionstel	= 0,000 001
10^{-3}	m (milli)	1 Tausendstel	= 0,001
1			= 1
10^{3}	k (kilo)	Tausend	= 1 000
10^{6}	M (Mega)	Million	= 1 000 000
10^{9}	G (Giga)	Milliarde	= 1 000 000 000
10^{12}	T (Tera)	Billion	= 1 000 000 000 000
10^{15}	P (Peta)	Billiarde	= 1 000 000 000 000 000
10^{18}	E (Exa)	Trillion	= 1 000 000 000 000 000 000

2.1.1 Die Materie

Drei Familien von Materieteilchen

Die Materieteilchen – Leptonen und Quarks – ordnen sich in drei Familien (Abb. 2.1). Die erste umfasst in der Gruppe der Leptonen das Elektron e und seinen elektrisch neutralen Partner, das Neutrino ν_e. Zur ersten Familie gehören außerdem das Up- und das Down-Quark (kurz u und d genannt), die eine elektrische Ladung von jeweils +2/3 und -1/3 der Protonladung tragen. Sie sind die Grundbausteine der Protonen und Neutronen, aus denen wiederum die Atomkerne zusammengesetzt sind. Elektron, u- und d-Quark bilden damit die Materie, aus der wir bestehen und aus der sich unsere Umwelt zusammensetzt.

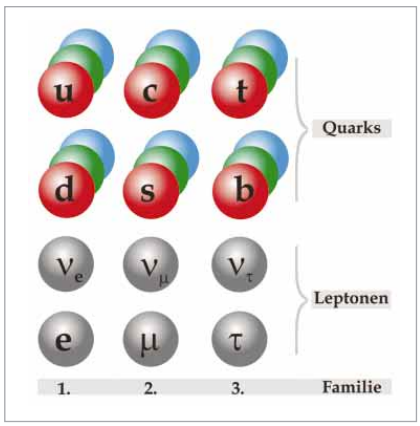


Abb. 2.1: Quarks und Leptonen, die Bausteine der Materie, bilden drei Familien. Die Quarks in jeder Familie tragen drei Unterscheidungsmerkmale, die man bildlich als „Farben" bezeichnet.

Dieses Schema wiederholt sich. Die zweite Familie von Materieteilchen setzt sich aus dem Myon µ und dem Myon-Neutrino ν_μ sowie dem Charm- und dem Strange-Quark (c und s) zusammen. Eine dritte Familie umfasst das Tauon τ und das Tau-Neutrino ν_τ sowie das Top- und das Bottom-Quark (t und b). Anhand von Experimenten am LEP-Speicherring konnte gezeigt werden, dass es nicht mehr als drei Familien gibt (Abb. 2.2).

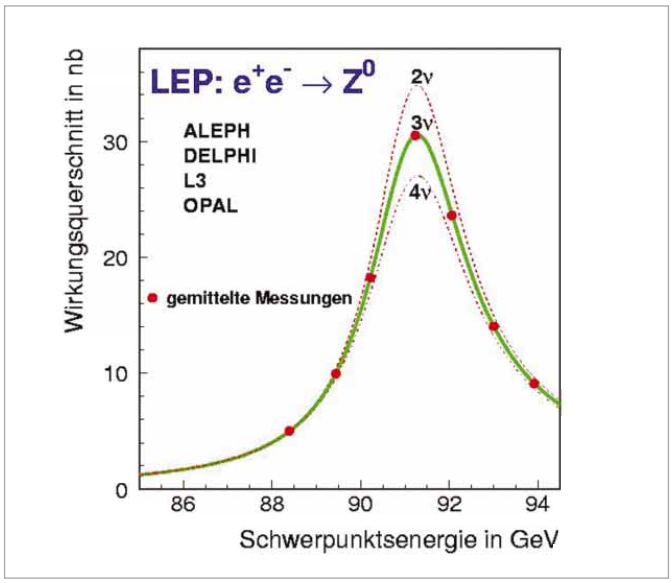


Abb. 2.2: Die Rate der bei LEP nachgewiesenen Z-Bosonen, die die schwache Wechselwirkung vermitteln, hängt von der Anzahl der Neutrinoarten ab. Auf diese Weise konnte mit hoher Genauigkeit bestimmt werden, dass es im Standardmodell drei Familien von Teilchen gibt.

cherring konnte nachgewiesen werden, dass sich die Anzahl der Familien im Standardmodell auf insgesamt drei beschränkt (Abb. 2.2). Alle geladenen Leptonen und Quarks der zweiten und dritten Familien sind instabil und zerfallen in leichtere Teilchen der ersten Familie.

Obschon die uns umgebende Welt nur aus u-Quarks, d-Quarks und Elektronen aufgebaut ist, so sind dennoch alle drei Familien von Quarks und Leptonen für das fundamentale Verständnis der Welt und für ihre Entwicklung aus dem Urknall von größter Bedeutung.

Die einander entsprechenden Teilchen in den drei Familien besitzen jeweils gleiche Ladungen und weisen die gleichen Symmetrieeigenschaften (siehe Box 2.3 Seite 15) auf. Ihre Massen jedoch sind sehr unterschiedlich: Sie reichen von den Neutrinomassen mit Werten, die wahrscheinlich im Bereich von Millielektronenvolt liegen, bis zur Masse des Top-Quarks, das mit 174 GeV so schwer ist wie ein Goldatom.

Zu jedem dieser Teilchen existieren Spiegelbilder: Antimaterieteilchen, die sich von den Materieteilchen nur durch entgegengesetzte Ladungen unterscheiden, ansonsten aber gleiche Eigenschaften besitzen.

Alle zwölf Arten von Leptonen und Quarks konnten inzwischen in Experimenten nachgewiesen werden. Die Entdeckung der Leptonen begann mit dem Elektron vor mehr als einem Jahrhundert, später folgten die Myonen, die Tauonen und die Neutrinos. Als letztes Lepton wurde im Jahr 2000 das Tau-Neutrino gefunden. Die Eigenschaften dieser Teilchen sind in den vergangenen Jahrzehnten mit sehr hoher Genauigkeit bestimmt worden; für Elektronen reicht sie bis zu einer Genauigkeit von einem Billionstel.

Quarks

Die Quarks wurden von Murray Gell-Mann und George Zweig Mitte der 1960er Jahre zunächst hypothetisch in die Teilchenphysik eingeführt, um die Beschreibung der Vielzahl von Hadronen auf ein ordnendes Prinzip zurückzuführen. Eine Folge von Experimenten zeigte schließlich die Realität dieser neuartigen Teilchen mit drittelzahligen Ladungen: Bei der Mikroskopierung von Protonen und Neutronen mit Elektronenstrahlen am Beschleunigerzentrum SLAC in Stanford und später mit Neutrinostrahlen am CERN wurden die u- und d-Quarks Anfang der 1970er Jahre schließlich erstmals „gesehen“ – man fand zum ersten Mal direkte experimentelle Hinweise darauf, dass die Quarks nicht nur mathematische Konstrukte sind, sondern in der Tat jene punktförmigen Bausteine, aus denen sich die Protonen und Neutronen zusammensetzen. Die kurz darauf folgende Entdeckung des Charm-Quarks markierte den endgültigen experimentellen Durchbruch dieser Idee – die eindeutige Bestätigung, dass es die Quarks tatsächlich gibt.

Zur selben Zeit begründete die theoretische Untersuchung der starken Wechselwirkung das *Confinement* der Quarks – die Tatsache, dass die Quarks nicht als einzelne Teilchen auftreten können, sondern dauerhaft in den Hadronen „gefangen“ sind. Das *Confinement* wird durch die spezifische Form der starken Kraft verursacht, die zwischen den Quarks wirkt: Im Gegensatz zur elektromagnetischen Kraft nimmt diese nicht mit wachsendem Abstand ab, sondern behält eine konstante Größe bei. Je größer man also den Abstand zwischen zwei Quarks machen will, umso mehr Energie muss man aufwenden (siehe Abb. 3.37). Letztlich führt dies dazu, dass die Quarks niemals einzeln, sondern nur zu mehreren gebunden innerhalb von Hadronen auftreten.

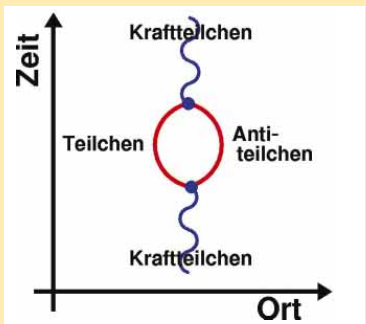
Ein herausragendes Beispiel für die erfolgreiche Verbindung von Präzisionsexperimenten mit theoretischen Präzisionsanalysen stellt die Entdeckung des Top-Quarks im Jahr 1995 dar: Sowohl die Existenz als auch die Eigenschaften dieses schwersten Quarks konnten im Standardmodell genau vorhergesagt werden. Experimente mit Bottom-Quarks an den Elektron-Positron-Speicherringen PETRA bei DESY und LEP bei CERN belegten schon früh die Existenz des Top-Quarks. Darüber hinaus konnte ausgenutzt werden, dass das Top-Quark als kurzlebiges Teilchen in Quantenfluktuationen (siehe Box 2.2) die Werte sehr empfindlicher Messgrößen beeinflusst. Erste Hinweise auf

Box 2.2 Die Heisenberg'sche Unschärferelation, Quantenfluktuationen, virtuelle Teilchen

Die Unschärferelation von Werner Heisenberg gehört zu den wichtigsten physikalischen Erkenntnissen des 20. Jahrhunderts. Sie gibt fundamentale Grenzen für die Genauigkeit an, mit der bestimmte Größen in der Quantenphysik gleichzeitig bestimmt werden können. Die Unschärferelation ist charakteristisch für die Quantenwelt: In der klassischen Physik lassen sich diese Größen unabhängig voneinander mit beliebiger Genauigkeit messen.

In der Quantenphysik sind die Werte für den Ort x und den Impuls p eines Teilchens jedoch nur mit einer Genauigkeit $\Delta x\, \Delta p \geq h/4\pi$ bestimmbar, wobei h die Planck'sche Konstante darstellt. Die genaue Kenntnis (d. h. die Messung) des Aufenthaltsorts eines Teilchens führt also dazu, dass sein Impuls entsprechend ungenau festgelegt ist, und umgekehrt.

Auf ähnliche Weise sind die Unschärfen von Energie und Zeit miteinander verbunden: Teilchen, die nur für kurze Zeiten existieren, haben keine scharf festgelegte Energie. Aus der Äquivalenz von Masse und Energie folgt damit, dass sich spontan Paare von Teilchen bilden können, die sich nach sehr kurzer Zeit wieder selbst vernichten. Diese nur temporär existierenden Teilchen nennt man „virtuelle Teilchen“.



Die Abbildung zeigt einen solchen Prozess in der Darstellung der Feynman-Diagramme (siehe Box 2.4 Seite 16): Ein Kraftteilchen (z. B. ein Photon) spaltet sich für kurze Zeit in ein Paar aus einem Teilchen und dem dazugehörigen Antiteilchen (z. B. in Elektron und Positron) auf.

Über diese in der relativistischen Quantenmechanik typischen „Quantenfluktuationen“ lässt sich auch der Einfluss von Teilchen nachweisen, die wegen der zu geringen Kollisionsenergie eines Beschleunigers zwar nicht direkt erzeugt werden, jedoch als virtuelle Teilchen auftreten können. Dabei beeinflussen sie die Werte von genau bestimmbaren Messgrößen. Die Effekte der virtuellen Teilchen können theoretisch vorherbestimmt werden. So konnte man die Masse des Top-Quarks aus Präzisionsmessungen vorhersagen, bevor dieses durch direkte Erzeugung entdeckt wurde.

einen derartigen Einfluss des Top-Quarks traten am DORIS-Speicherring bei DESY auf. Kurze Zeit später erlaubte es die Auswertung der Daten aus Elektron-Positron-Kollisionen an den LEP-Experimenten in Verbindung mit Experimenten zum Zerfall der Myonen, die Masse des Top-Quarks innerhalb enger Grenzen vorherzubestimmen. Schlussendlich konnte das Top-Quark am Tevatron bei Fermilab direkt nachgewiesen werden – seine Masse zeigte sich in ausgezeichneter Übereinstimmung mit dem vorhergesagten Wert.

Eine Vielzahl experimenteller Ergebnisse bestätigt die Hypothese, dass Quarks quantenmechanisch „miteinander mischen": Die Quarks, welche die Hadronen bilden, sind im Allgemeinen Überlagerungen von Quarksorten aus unterschiedlichen Familien. Diese Mischungen, die im Standardmodell durch den Higgs-Mechanismus erzeugt werden, werden heutzutage vornehmlich an so genannten B-Mesonen-Fabriken erforscht – Elektron-Positron-Speicherringen im kalifornischen Stanford und im japanischen Hochenergiephysikzentrum KEK, an denen insbesondere Teilchen erzeugt werden, die ein Bottom-Quark enthalten („B-Mesonen"). Wenn die Mischungskoeffizienten komplexe Werte annehmen, so ist die schwache Wechselwirkung der Quarks nicht invariant gegenüber der CP-Spiegelung (siehe Box 2.3). Dies bedeutet, dass ein Vorgang nicht auf die gleiche Weise abläuft, wenn man gleichzeitig Teilchen durch Antiteilchen ersetzt (Ladungsspiegelung C) und alle Raumkoordinaten spiegelt (Raumspiegelung P). Die CP-Symmetrie ist also in den Naturgesetzen „verletzt". Der experimentelle Nachweis dieser Verletzung ist nicht nur für unsere Kenntnis der in der Natur herrschenden Symmetrien von großer Bedeutung. Die CP-Verletzung spielt außerdem eine entscheidende Rolle in der Kosmologie, denn ohne sie könnte nicht erklärt werden, weshalb es im Universum so viel mehr Materie als Antimaterie gibt.

Neutrinos

Eine derzeit mit großem Interesse verfolgte Frage ist die nach der Natur der Neutrinos. In Experimenten mit Neutrinos, die in der Sonne und durch kosmische Höhenstrahlung erzeugt werden, konnte in jüngster Zeit nachgewiesen werden, dass auch die verschiedenen Neutrinoarten miteinander mischen: Die beobachteten Neutrinos sind Überlagerungen von verschiedenen Neutrinosorten. Diese Experimente liefern indirekte, aber überzeugende Hinweise darauf, dass die Neutrinos – wie die geladenen Leptonen und Quarks auch – Massen besitzen, wenn auch extrem kleine. Ungeklärt ist aber noch, ob die Eigenschaften der Neutrinos im Wesentlichen denen der Quarks entsprechen oder ob sie gänzlich anders geartet sind. Letzteres wäre der Fall, wenn Neutrinos identisch mit ihren eigenen Antiteilchen wären. In der Tat deuten die unerwartet großen Mischungseffekte zwischen den Neutrinos auf einen fundamentalen Unterschied zwischen den Eigenschaften von Neutrinos und Quarks hin, der aus dem konzeptionellen Rahmen des Standardmodells herausführt. Darüber hinaus könnte eine CP-Verletzung im Bereich der Neutrinos ursächlich die Erzeugung des Überschusses von Materie über Antimaterie im Universum bedingen. Eine neue Generation von Beschleunigern und Experimenten wird erforderlich sein, um diese grundlegenden Fragen zu lösen.

2.1.2 Die fundamentalen Wechselwirkungen

Derzeit sind vier fundamentale Wechselwirkungen bekannt (siehe Box 2.4, Abb. 2.3). Diese bestimmen sowohl die Kräfte, die zwischen den Teilchen wirken, als auch die Umwandlungen der Teilchen ineinander. Die elektrischen und magnetischen Wechselwirkungen wurden im

Box 2.3 Symmetrien, Eichinvarianz, Symmetriebrechung

„Ein Ding ist symmetrisch, wenn man es einer bestimmten Operation aussetzen kann und es danach als genau das gleiche erscheint wie vor der Operation" – so erläuterte Richard Feynman den Begriff der Symmetrie. Die Schneeflocke zum Beispiel sieht unverändert aus, wenn man sie um 60° dreht; sie ist symmetrisch gegenüber Drehungen um 60°.

Schon in der klassischen Physik haben Symmetrien eine grundlegende Bedeutung: Die Forderung beispielsweise, dass die physikalischen Gesetze unabhängig von einer speziell gewählten räumlichen Orientierung gelten müssen, führt zu einer zeitlich unveränderlichen Systemgröße – dem Drehimpuls.

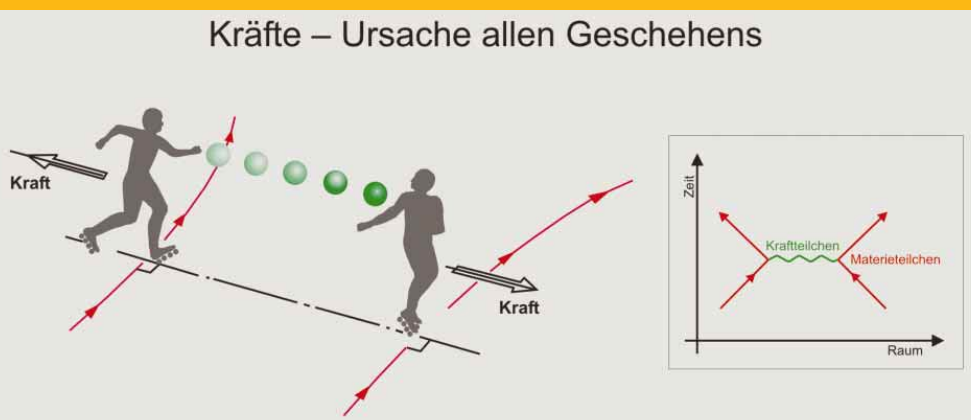
Auf ähnliche Weise bedingt die Forderung, dass die Bewegungsgesetze der Teilchen unabhängig von willkürlichen Phasen der quantenmechanischen Wellenfunktionen geladener Teilchen sein müssen – „Eichinvarianz" –, die Erhaltung der elektrischen Ladung. Erlaubt man die beliebige Änderung der Phasen an jedem Ort, so folgen daraus die Gesetzmäßigkeiten der elektromagnetischen Wechselwirkung von elektrisch geladenen Teilchen mit Photonen. Ganz analog ergeben sich mit diesem nach Hermann Weyl benannten „Weyl'schen Eichprinzip" auch die Strukturen der schwachen und der starken Wechselwirkungen aus der Forderung nach einer mit der jeweiligen schwachen bzw. starken Ladung der Teilchen verknüpften Eichinvarianz.

Neben den oben beschriebenen kontinuierlichen Symmetrien gibt es auch „diskrete Symmetrien". Dazu gehören Spiegelungen in Raum und Zeit (Paritätstransformation P, Zeitumkehr T) und die Vertauschung aller Teilchen mit ihren entsprechenden Antiteilchen (Ladungskonjugation C). Prozesse der starken und elektromagnetischen Wechselwirkungen sind unter allen drei Transformationen invariant, die der schwachen Wechselwirkung dagegen nicht. Damit erlauben es Prozesse der schwachen Wechselwirkung, Welten aus Antimaterie von solchen aus Materie zu unterscheiden bzw. in elementaren Prozessen eine Zeitrichtung festzulegen.

Eine im Zustand hoher Energie auftretende Symmetrie eines Systems kann bei Erniedrigung der Energie verloren gehen, „die Symmetrie wird gebrochen". Ein Beispiel dafür liefert die Abkühlung eines Ferromagneten: Weisen die Elementarmagnete bei hohen Temperaturen ungeordnet in alle Richtungen, so richten sie sich unterhalb der Curie-Temperatur aneinander aus. Es bildet sich ein Magnetisierung heraus, welche eine Richtung im Raum auszeichnet und die ursprüngliche Drehinvarianz zerstört. Die Gesamtenergie ist dabei niedriger als die des räumlich symmetrischen Zustands.

Ganz analog ist bei der schwachen Wechselwirkung im Zustand niedrigster Energie die Eichsymmetrie gebrochen, wenn man die schwachen Wechselwirkungsfelder und die Materiefelder um ein weiteres Feld, das Higgs-Feld, erweitert. Das Higgs-Feld zeichnet eine Richtung im Raum der schwachen Ladungen aus. Als Folge dieses so genannten Higgs-Mechanismus erhalten die Kraftteilchen der schwachen Wechselwirkung sowie die Leptonen und Quarks eine Masse, so wie es empirisch gefordert wird.

Box 2.4 Kräfte, Kraftteilchen, Feynman-Diagramme



Zwei Körper üben eine Kraft aufeinander aus, indem sie Impuls und Energie austauschen. Im Mikrokosmos wird der Austausch durch **„Kraftteilchen"** vermittelt. Bildlich kann dieser Mechanismus durch so genannte Feynman-Diagramme beschrieben werden, in denen die Bewegung der Materieteilchen durch Pfeile und die ausgetauschten Teilchen durch Wellenlinien, Federn usw. dargestellt werden.

19. Jahrhundert von James C. Maxwell in der Theorie des Elektromagnetismus zusammengefasst. Die Struktur der schwachen Wechselwirkung, welche den radioaktiven Betazerfall von Atomen bestimmt, und ihre Vereinigung mit dem Elektromagnetismus wurden von Sheldon L. Glashow, Abdus Salam und Steven Weinberg in den 1960er Jahren erkannt. Trotz ihrer unterschiedlichen Eigenschaften konnte auch die starke Wechselwirkung, welche die Protonen und Neutronen in den Atomkernen zusammenhält und die Kräfte zwischen den Atomkernen bestimmt, in der Theorie der Quantenchromodynamik von Harald Fritzsch und Murray Gell-Mann auf analoge Weise zu den anderen beiden Wechselwirkungen beschrieben werden. Die Gravitation schließlich, die Isaac Newton bereits Mitte des 17. Jahrhunderts eingeführt hatte, wurde von Albert Einstein in der Allgemeinen Relativitätstheorie mit den geometrischen Eigenschaften der Raumzeit verknüpft.

Kräfte und Kraftteilchen

Die ersten drei dieser Wechselwirkungen – also jene Kräfte, die in der Teilchenphysik eine unmittelbare Rolle spielen – sind einander in ihrer Wirkung weitgehend ähnlich. Ebenso wie die elektromagnetische Kraft durch die elektrische Ladung hervorgerufen wird, werden auch die Kraftfelder der schwachen und der starken Wechselwirkung durch Ladungen verursacht, die man analog zur elektrischen Ladung als schwache und starke (oder Farb-) Ladungen der Teilchen bezeichnet. Die Kraftfelder tragen eine Einheit des Eigendrehimpulses oder Spins. Die entsprechenden Feldtheorien, die der Beschreibung dieser drei Wechselwirkungen zugrunde liegen, sind auf dem „Weyl'schen Eichprinzip" aufgebaut (siehe Box 2.3 Seite 15). Die Entdeckung dieses universellen Prinzips zur Formulierung der fundamentalen Kräfte ist zweifellos eine der bedeutendsten Errungenschaften der Physik des 20. Jahrhunderts. Die Eichtheorien der verschiedenen Wechselwirkungen können als „Quantenfeldtheorien" formuliert werden; sie sind für die Beschreibung der Kräfte bei den kleinen Abständen und hohen Energien gültig, wie sie in der Teilchenphysik auftreten. In der Quantentheorie werden den einzelnen Kraftfeldern Teilchen zugeordnet. Der Austausch dieser „Kraftteilchen" zwischen den Materieteilchen bewirkt die entsprechenden Wechselwirkungen.

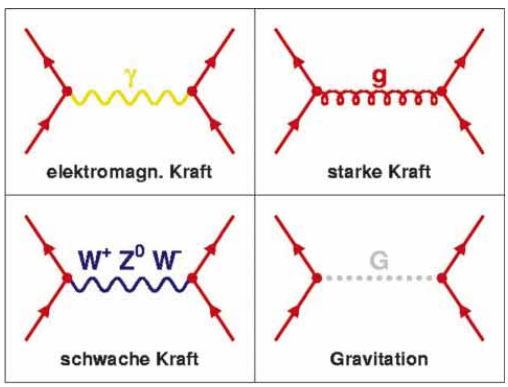


Abb. 2.3: Die vier fundamentalen Kräfte, die zwischen Materieteilchen wirken. Die Materieteilchen sind als Pfeile dargestellt (siehe Box 2.4). Die elektromagnetische Kraft wird durch den Austausch von Photonen γ vermittelt (gelbe Wellenlinie); die schwachen Kräfte durch W^+-, W^-- und Z-Teilchen (blaue Wellenlinie); die starke Kraft durch Gluonen g (rote Feder); und die Gravitationskraft durch Gravitonen G (graue gepunktete Linie).

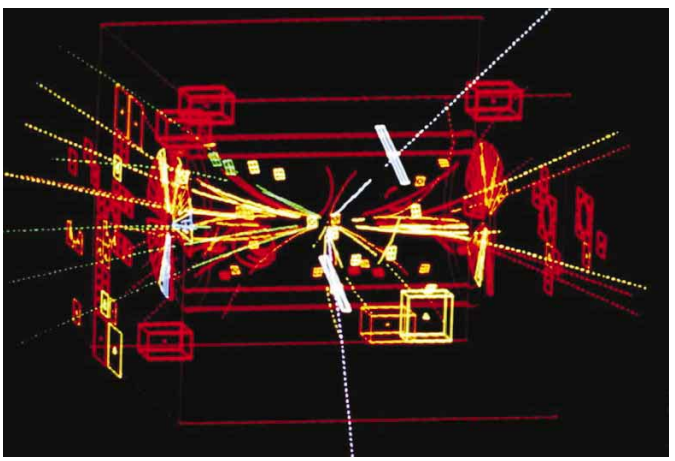


Abb. 2.4: Die W- und Z-Bosonen wurden 1983 am CERN $Sp\bar{p}S$-Collider entdeckt. Das Bild zeigt die Aufzeichnung einer Proton-Antiproton-Kollision mit dem UA1-Detektor. In der Vielzahl von Reaktionsprodukten erkennt man zwei sehr hochenergetische Teilchen (ein Elektron und ein Positron, gepunktete Linien), die unter großen Winkeln erzeugt wurden und aus dem Zerfall des Z-Bosons stammen.

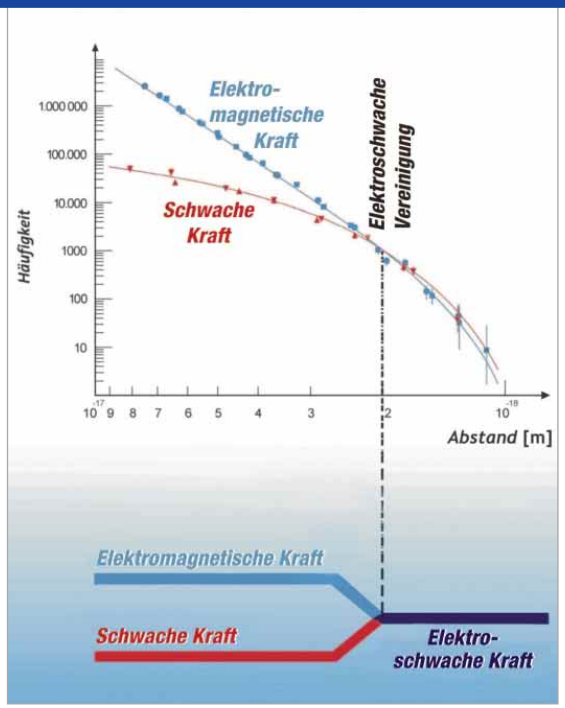


Abb. 2.5: Die elektromagnetische und die schwache Kraft, die bei der Streuung von Elektronen an Protonen in HERA wirken, werden bei hohen Energien, d. h. bei kleinen Abständen, gleich groß. An den sich annähernden Raten von Streuereignissen wird experimentell sichtbar, dass die beiden Kräfte nur unterschiedliche Manifestationen einer einheitlichen elektroschwachen Kraft sind.

Elektromagnetische Wechselwirkung

Die elektrische Ladung ist die Quelle der elektromagnetischen Kraft. Die Kraftteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung – die Lichtteilchen oder Photonen – wurden schon von Einstein aus dem photoelektrischen Effekt erschlossen. Mit der Quantenelektrodynamik (QED), der quantenfeldtheoretischen Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkung, besitzt die Teilchenphysik eine außerordentlich präzise Theorie: Das magnetische Moment des Elektrons z. B. kann im Rahmen dieser Theorie mit einer relativen Genauigkeit von 10^{-12} vorhergesagt werden und wird mit der gleichen Genauigkeit gemessen – ein eindrucksvoller Erfolg von Theorie und Experiment.

Schwache Wechselwirkung

Analog zur Vereinigung von Elektrizität und Magnetismus gelang es, Elektromagnetismus und schwache Kraft in der Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung zusammenzuführen. Dieser kühne theoretische Ansatz wurde am CERN mit der Entdeckung der „neutralen Ströme“ 1973 experimentell bestätigt – diese führen zu Prozessen der schwachen Wechselwirkung, in denen zwischen den Reaktionspartnern ein neutrales Kraftteilchen ausgetauscht wird. Die Kraftteilchen der schwachen Wechselwirkung – die schweren W^+-, W^-- und Z-Bosonen – fand man in den 1980er Jahren an einem eigens dafür am CERN gebauten Proton-Antiproton-Collider (Abb. 2.4).

Im Einklang mit der vereinheitlichten elektroschwachen Theorie werden die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung bei Energien im 100 GeV-Bereich gleich stark – ein direkt beobachtbarer Ausdruck für die Vereinigung der beiden Kräfte, der in den 1990er Jahren in Experimenten am LEP-Speicherring bei CERN und an HERA bei DESY eindrucksvoll nachgewiesen werden konnte (Abb. 2.5).

Starke Wechselwirkung

Die starke Wechselwirkung, welche die Quarks aufeinander ausüben, wird von Gluonen vermittelt, deren Existenz Ende der 1970er Jahre am Speicherring PETRA bei DESY experimentell bewiesen wurde: Bei hohen Energien strahlen Quarks, die in Elektron-Positron-Kollisionen paarweise erzeugt werden, Gluonen ab. Zwar können Quarks und Gluonen nicht als freie Teilchen nachgewiesen werden, sie treten im Detektor jedoch als enge Teilchenbündel in Erscheinung, so genannte Jets. Die Beobachtung von teilchenphysikalischen Reaktionen mit drei Jets in den PETRA-Experimenten lieferte den entscheidenden Beweis: Es waren Paare von Quarks erzeugt worden, die ein Gluon abgestrahlt hatten (Abb. 2.6).

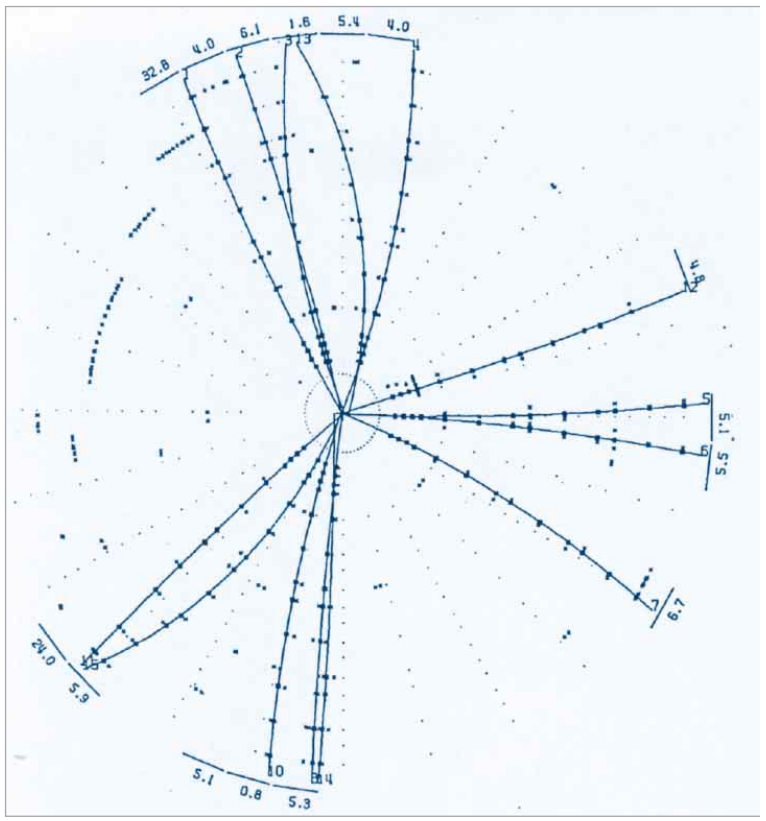


Abb. 2.6: Am Elektron-Positron-Speicherring PETRA bei DESY wurden die Gluonen, die Träger der starken Wechselwirkung, entdeckt. Bei der Erzeugung eines Quark-Antiquark-Paars im Stoßprozess wird ein Gluon abgestrahlt. Die drei Teilchen manifestieren sich im Detektor als drei enge Bündel von Teilchen (Jets).

Die Theorie der starken Wechselwirkung, die Quantenchromodynamik (QCD), kann bei sehr kleinen Abständen im Bereich von 10^{-17} m mit den gängigen theoretischen Mitteln der Störungstheorie beherrscht werden. Dies ist eine Folge der „asymptotischen Freiheit“ der Quantenchromodynamik. Sie besagt, dass die Farbladung der

Quarks bei hohen Energien effektiv so klein wird (Abb. 2.7), dass sich die starke Wechselwirkung auf eine kleine berechenbare Wirkung reduziert. Diese Methode versagt jedoch bei größeren Abständen im Bereich von 10^{-15} m – also bei Werten, die für die Abstände der Quarks und Antiquarks in gebundenen Zuständen wie Proton und Neutron charakteristisch sind. Numerische Verfahren zur Lösung der quantenchromodynamischen Gleichungen haben nichtsdestoweniger erste Einsichten in das Massenspektrum der Hadronen sowie in das Verhalten der Kräfte zwischen den Quarks vermitteln können. Dazu werden neue Rechenverfahren – Gitterrechnungen – auf eigens entwickelten Computern benutzt, die zu den schnellsten Rechnern ihrer Art zählen.

Gravitationswechselwirkung

Die Schwerkraft besitzt eine ganz andere Struktur als die drei teilchenphysikalischen Kräfte. Sie wird von einem Feld vermittelt, dessen Quelle von Energie (Masse) und Impuls der Teilchen gebildet wird. Die zugehörigen Kraftteilchen tragen zwei Einheiten des elementaren Drehimpulses (Spin), während die Kraftteilchen der übrigen Wechselwirkungen jeweils nur eine Einheit des Spins tragen.

Als Feldtheorie entzieht sich die Gravitation einer konsistenten quantentheoretischen Formulierung. Bei den heute im Experiment zur Verfügung stehenden Energien hat die Schwerkraft keinen direkten Einfluss auf teilchenphysikalische Effekte, da die Gravitationsanziehung zwischen Elementarteilchen wegen ihrer kleinen Massen winzig ist. Nichtsdestoweniger muss die Gravitation mit der Teilchenphysik verbunden sein, da sie bei extrem hohen Energien nahe der Planck-Energie von 10^{19} GeV gleich stark wird wie die anderen Kräfte. Bisher konnten nur Superstringtheorien mögliche Lösungsansätze für eine Universalvereinigung aller Wechselwirkungen im quantentheoretischen Rahmen bieten.

2.1.3 Der Higgs-Mechanismus

Im Standardmodell sind ursprünglich alle Teilchen masselos. In diesem Zustand der Materie, wie er bei hohen Energien und hohen Temperaturen im Universum kurz nach dem Urknall existierte, sind die Naturgesetze durch hohe Symmetrieeigenschaften gekennzeichnet. Die Wechselwirkungen lassen sich in diesem Zustand im Rahmen von Eichtheorien mathematisch und physikalisch konsistent formulieren. Im Gegensatz zu den photonischen und gluonischen Kraftteilchen der Quantenelektrodynamik und der Quantenchromodynamik besitzen die ausgetauschten Teilchen der schwachen Wechselwirkung, ebenso wie die Materieteilchen Leptonen und Quarks, jedoch Masse. Mit 80 und 91 GeV haben die W^+-,W^-- und Z-Bosonen sogar sehr hohe Massen; sie sind etwa hundertmal schwerer als das Proton und damit von ähnlichem Gewicht wie ein

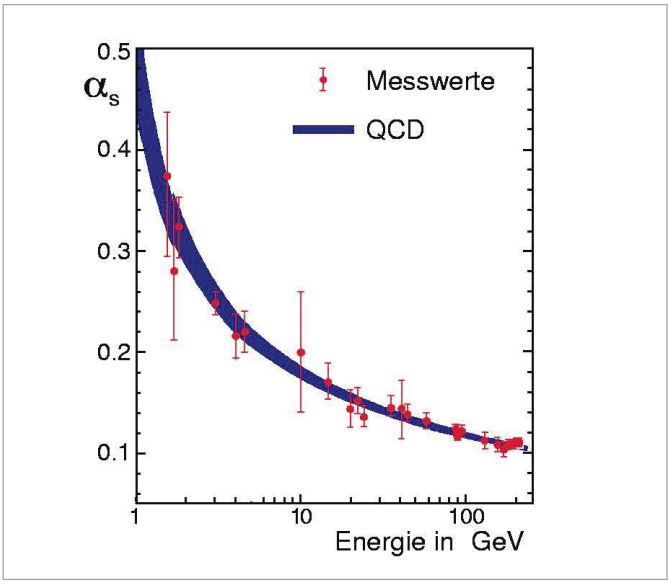


Abb. 2.7: Die Stärke der starken Wechselwirkung (α_s) nimmt mit wachsender Energie ab. Dieses als „asymptotische Freiheit" bezeichnete Verhalten war eine der bahnbrechenden Vorhersagen der QCD, der Quantenfeldtheorie der starken Wechselwirkung.

Silberatom. Aber auch die schwache Wechselwirkung kann auf eichinvariante Weise konsistent formuliert werden, wenn die Massen mit Hilfe des Higgs-Mechanismus erzeugt werden – ein Mechanismus, der von Peter Higgs und anderen Theoretikern Mitte der 1960er Jahre postuliert wurde.

Higgs-Feld und Higgs-Teilchen

Der Higgs-Mechanismus erfordert, dass das System von Materieteilchen und Kraftfeldern um ein fundamentales Feld erweitert wird. Dabei soll die Wechselwirkung dieses Felds mit sich selbst dazu führen, dass die Feldstärke überall von Null verschieden ist: Das Higgs-Feld erstreckt sich gleichmäßig über das gesamte Universum. Das Feld zerstört die ursprüngliche Symmetrie: Die Welt befindet sich empirisch betrachtet in einem Zustand „gebrochener Symmetrie" (siehe Box 2.3 Seite 15). Die Wechselwirkungsenergie von Kraft- und Materieteilchen mit diesem Higgs-Feld kann nach der von Einstein aufgestellten Äquivalenz von Masse und Energie $E = m\,c^2$ als Masse der Teilchen gedeutet werden (siehe Box 2.1 Seite 13). Durch den Higgs-Mechanismus erhalten die elementaren Teilchen also ihre Massen. Er beantwortet damit eine fundamentale Frage der Physik: Was ist Masse?

Nach den Gesetzen der Quantentheorie gehört zu dem Higgs-Feld ein bestimmtes Teilchen, das Higgs-Boson. Alle Eigenschaften des Higgs-Teilchens sind im Standardmodell festgelegt, mit Ausnahme seiner eigenen Masse. Damit sind die möglichen Erzeugungsmechanismen wie auch die Zerfallseigenschaften dieses instabilen Teilchens bekannt, sobald seine Masse bestimmt ist. Die Suche nach dem Higgs-Boson wird damit zu einer genau umrissenen experimentellen Herausforderung.

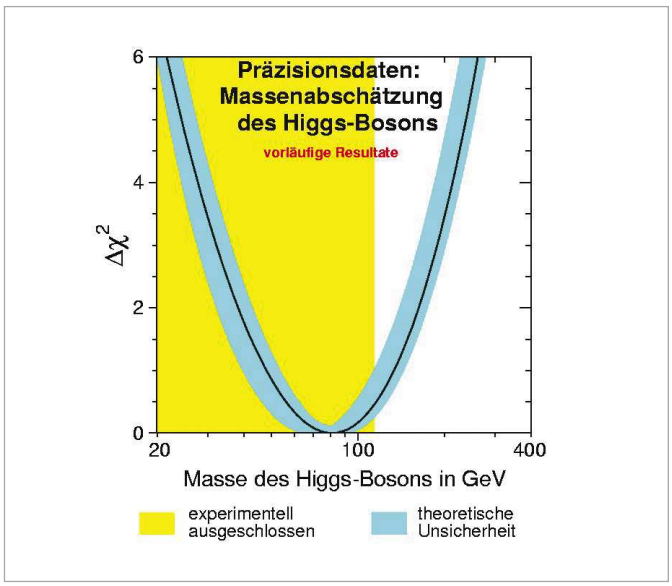


Abb. 2.8: Aus Präzisionsmessungen verknüpft mit theoretischen Präzisionsanalysen kann der Bereich, der für die noch unbekannte Masse des Higgs-Teilchens in Frage kommt, vorausgesagt werden. Er erstreckt sich von der Umgebung des Minimums bis hin zu Massen, bei denen die abgebildete Kurve etwa den Wert 4 annimmt. Die direkte Suche nach dem Higgs-Boson durch die LEP-Experimente wurden unterhalb von 114 GeV nicht fündig (gelber Bereich). Im Rahmen des Standardmodells wird daher ein leichtes Higgs-Teilchen mit einer Masse in der Nähe der direkten Ausschlussgrenze von 114 GeV, aber unterhalb von etwa 200 GeV erwartet.

Dem Higgs-Teilchen auf der Spur

Wie groß die Masse des Higgs-Teilchen sein darf, lässt sich mit verschiedenen Argumenten stark eingrenzen. Eine allgemeine obere Grenze von etwa 1 TeV folgt aus theoretischen Konsistenzbedingungen. Unter der Annahme, dass das Standardmodell bis in die Nähe der Planck-Skala fortgesetzt werden kann – eine Prämisse, die durch korrekte Vorhersagen für die elektroschwache Wechselwirkung untermauert wird – lässt sich die obere Grenze auf etwa 200 GeV herabsetzen.

Virtuelle Higgs-Teilchen, die in Quantenfluktuationen kurzzeitig erzeugt werden (siehe Box 2.2 Seite 14), beeinflussen experimentell sehr genau bestimmbare Größen wie die Lebensdauer des Myons und die Eigenschaften des Z-Bosons. Aufgrund von Präzisionsmessungen solcher Größen, zu denen die LEP-Experimente bei CERN entscheidend beigetragen haben, konnte die Masse des Higgs-Bosons im Standardmodell ebenfalls auf einen Bereich mit einer Obergrenze von etwa 200 GeV eingeschränkt werden (Abb. 2.8). Allerdings können höhere Werte in einigen Modellen, die über das Standard-modell hinausgehen, nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Die direkte Suche nach Higgs-Teilchen war bisher vergeblich. Die LEP-Experimente haben jedoch gezeigt, dass das Higgs-Boson schwerer als 114 GeV sein muss. Die Suche wird zurzeit am Proton-Antiproton-Collider Tevatron bei Fermilab fortgesetzt. Die zukünftigen Beschleuniger – der im Bau befindliche Proton-Proton-Speicherring LHC am CERN sowie ein Elektron-Positron-Linearcollider wie die bei DESY geplante TESLA-Anlage – bilden ein Instrumentarium, mit dem sich die Existenz des Higgs-Bosons definitiv testen und der Ursprung von Teilchenmassen detailliert erforschen lässt.

2.2 Teilchenphysik und Kosmologie

Die Physik versucht, ein einheitliches Bild der Welt zu entwerfen, das von den kleinsten Abständen im Bereich der Planck-Länge (10^{-35} m) bis zu kosmischen Dimensionen (10^{26} m) gültig ist. Ein solches Bild muss die in den unterschiedlichen Bereichen beobachteten Phänomene durch dieselben Gesetzmäßigkeiten untrennbar miteinander verbinden.

Physik bei höchsten Energien

Kennzeichnend für das frühe Universum waren die sehr hohen Energien der Teilchen: Unmittelbar nach dem Urknall lagen sie in der Größenordnung der Planck-Energie von 10^{19} GeV und kurz danach bei jener Energie von 10^{16} GeV, bei der man annimmt, dass sich die ursprünglich einheitliche Kraft aufgespalten und die getrennte Entwicklung der drei teilchenphysikalischen Kräfte eingesetzt hat. Zu späteren Zeiten wurde die Entwicklung des Universums durch die elektroschwache Energieskala von etwa 100 GeV bestimmt – jene Energie, bei der sich die elektroschwache Kraft in die elektromagnetische und die schwache Kraft aufgespalten hat. Noch später schließlich folgten Vorgänge der Kern- und Atomphysik, die sich auf niederenergetischen Energieskalen abspielen. Die Gesetzmäßigkeiten für diese verschiedenen Bereiche umfassen deshalb weite Gebiete der Physik – von der Teilchen- über die Kernphysik bis zur Atomphysik.

Information über die Physik bei den höchsten Teilchenenergien – die den frühesten Zeiten des Universums entsprechen – kann man einerseits auf direktem Wege erhalten, etwa durch die Suche nach dem Zerfall des Protons, der in Vereinigungstheorien vorhergesagt wird, oder indirekt durch die Extrapolation von Parametern, die an Beschleunigern mit hoher Präzision gemessen werden. Theorien, welche die kleinen Neutrinomassen auf das Wechselspiel mit Teilchen sehr hoher Masse zurückführen, bieten einen weiteren möglichen Zugang zur Physik der frühen Epochen des Universums.

Überschuss von Materie über Antimaterie im Universum

Die Kosmologie hat ihrerseits bedeutende Fragestellungen für die Teilchenphysik aufgeworfen – zum Beispiel, warum im Universum wesentlich mehr Materie als Antimaterie vorhanden ist. Zwar ist das Standardmodell allein nicht in der Lage, den Überschuss von Materie über Antimaterie im Universum zu erklären; nichtsdestoweniger ist die experi-

mentelle Beobachtung, dass die schwache Kraft die CP-Symmetrie verletzt, in diesem Kontext von grundsätzlicher Bedeutung. Die Neutrinophysik liefert möglicherweise einen Schlüssel für die Erklärung des Materieüberschusses. Die Konsequenzen für Neutrinomassen und -mischungen können experimentell untersucht werden.

Dunkle Materie

Auch die von Astronomie und Astrophysik festgestellte Existenz von unbekannter dunkler Materie im Universum – einer Art von Materie, die nicht aus Protonen und Neutronen besteht und nicht sichtbar ist – führt zu bedeutenden Fragestellungen in der Teilchenphysik. Die dunkle Materie macht sich durch ihre Gravitationswechselwirkung bemerkbar: Sie trägt wesentlich mehr zur Masse des Universums bei als alle bekannten Materiearten. Supersymmetrische Theorien, in denen das leichteste supersymmetrische Teilchen stabil ist, können eine Lösung dieses Rätsels bieten. In astrophysikalischen Beobachtungen und in Laborexperimenten wird nach direkten Signalen gesucht. Diese Teilchen sollten sich aber auch in Hochenergiebeschleunigern erzeugen lassen. Solche Experimente werden unerlässlich sein, um ein detailliertes Verständnis dieser neuen Art von Materie zu gewinnen.

Dunkle Energie

Eine Reihe tiefgründiger Fragen wird auch durch Beobachtungen der Astrophysik und Kosmologie aufgeworfen, dass nämlich die Energiedichte des Universums offenbar von einer außergewöhnlichen Art von Energie, der dunklen Energie, beherrscht wird. Diese gänzlich neue Form der Energie, die Einstein bereits hypothetisch in Form der „kosmologischen Konstanten“ eingeführt hatte, bedingt eine fortdauernde Expansion des Universums, wofür Anzeichen gefunden worden sind (Abb. 2.9).

Die dunkle Energie ist eines der großen Rätsel der Physik, für dessen Lösung bisher nur wenige Ansätze entwickelt worden sind. Ihre Existenz führt zu weit reichenden Konsequenzen für grundlegende Konzepte der Physik wie Superstringtheorien.

Neutrinos

Astrophysikalische Beobachtungen können auch direkt genutzt werden, um konkrete Fragen in der Teilchenphysik zu untersuchen. Dazu zählen Versuche, aus Supernova-Beobachtungen und aus der großräumigen Dichteverteilung der Materie im Universum Grenzen für die Massen der Neutrinos abzuleiten.

Evolution des Universums

Die globale Entwicklung des Universums vom Urknall bis heute, insbesondere in der inflationären Phase, lässt sich effektiv durch ein skalares Feld beschreiben, dessen Dynamik und Energiedichte die zeitliche Entwicklung des Kosmos bestimmen. Es ist offen, ob ein solches Feld mit dem von der Teilchenphysik postulierten Higgs-Feld identisch sein könnte.

Weitergehend stellt sich letztendlich die Frage, ob die fundamentalen Theorien der Materie und ihrer Wechselwirkungen, welche die Teilchenphysik beispielhaft in Form von Superstringtheorien entwickelt, die beobachtete Struktur des Universums und seine zeitliche Entwicklung zu erklären vermögen. Die Struktur und die Entwicklung des Universums mit den Naturgesetzen des Mikrokosmos zu verbinden, ist das ultimative Ziel der Kosmologie.

2.3 Zentrale offene Fragen

Drei Fragen haben sich für die weitere Entwicklung der Physik des Mikrokosmos als zentral herausgeschält: die Klärung des Ursprungs der Masse im Higgs-Mechanismus – oder in denkbaren Alternativen; die Vereinigung der unterschiedlichen Kräfte in einer einheitlichen Theorie; und die Erforschung der Struktur von Raum und Zeit im Mikrokosmos. Hochenergie-Experimente können in den kommenden Jahren Antworten auf diese Fragen finden.

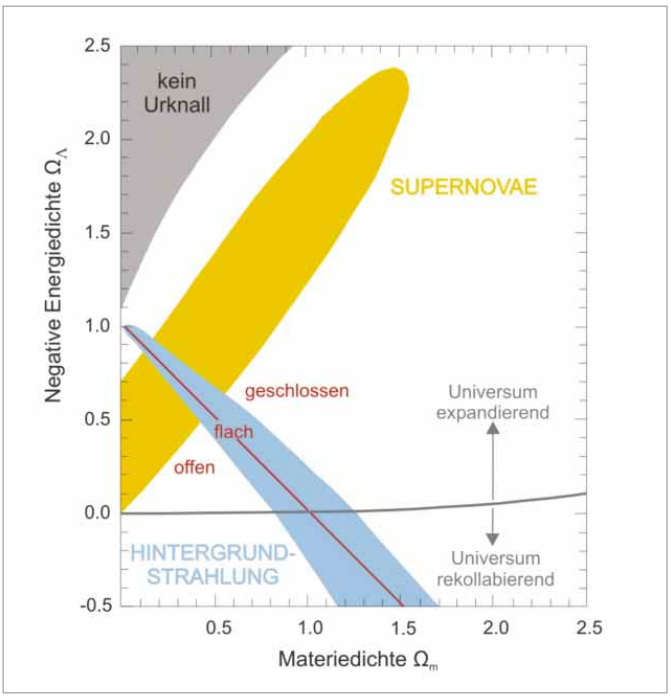


Abb. 2.9: Dichte der Materie (Ω_M) und Dichte der dunklen Energie (Ω_Λ; „kosmologische Konstante“) im heutigen Universum. Die Messungen fußen auf der Beobachtung von weit entfernten Supernovae und von Temperaturfluktuationen in der kosmischen Hintergrundstrahlung. Der Überlappbereich zwischen den blau und gelb gekennzeichneten Bereichen ist experimentell favorisiert – ein Bereich, in dem das Universum beschleunigt expandiert. Nur ein kleiner Bruchteil der Materie ist physikalisch bekannt. Die Natur der dunklen Energie ist noch gänzlich unerforscht.

2.3.1 Ursprung der Teilchenmassen

Falls die Massen der fundamentalen Teilchen in der Natur tatsächlich durch den Higgs-Mechanismus erzeugt werden, so sollte sich dieser experimentell eindeutig etablieren lassen. Dazu bedarf es verschiedener Schritte:

- *Entdeckung des Higgs-Teilchens:* Nachdem die LEP-Experimente bei CERN beendet wurden, wird die Suche nach dem Higgs-Boson derzeit am Tevatron-Beschleuniger bei Fermilab fortgesetzt. Energie und Anzahl der Teilchenkollisionen sind an dieser Anlage aber möglicherweise zu niedrig, um das Higgs-Teilchen experimentell zu etablieren. Sofern es existiert, kann das Teilchen jedoch mit Sicherheit am LHC-Beschleuniger entdeckt werden, da dessen wesentlich höhere Energie den gesamten möglichen Massenbereich des Higgs-Teilchens überdeckt (Abb. 2.10).

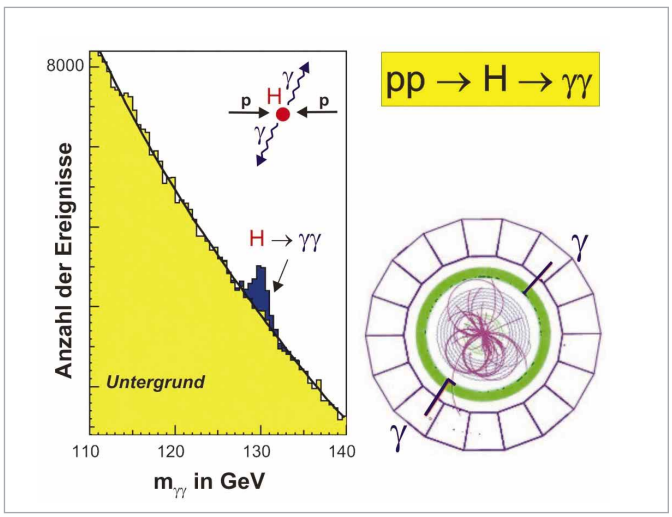


Abb. 2.10: Nachweis des Higgs-Teilchens beim Zerfall in zwei Photonen, wie er am LHC für eine Higgs-Masse von 130 GeV möglich sein wird (Simulation eines geplanten Experiments)

- Ist das Higgs-Boson entdeckt, so müssen in einem nächsten Schritt seine Eigenschaften erforscht werden – eine Aufgabe, für die ein Elektron-Positron-Linearcollider mit hoher Präzision wie TESLA ideal geeignet ist. Aus den Messungen von Erzeugungsraten und Zerfallseigenschaften des Higgs-Teilchens wird sich zeigen, ob seine *Kopplungstärke an elektroschwache Felder, an Leptonen und Quarks* wie vorhergesagt mit deren Massen anwächst oder nicht – eine Grundbedingung für die Erklärung der Massen über die Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld (Abb. 2.11).
- *Nachweis der Selbstwechselwirkung des Higgs-Felds:* Die Selbstwechselwirkung ist eine charakteristische Eigenschaft, die bewirkt, dass die Stärke des Higgs-Felds überall von Null verschieden ist und dass das Higgs-Feld somit das Universum vollständig durchdringt. Sie kann

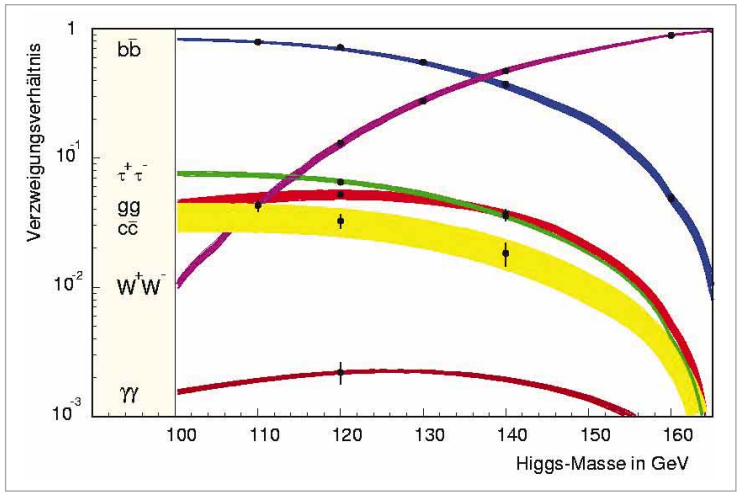


Abb. 2.11: Wenn die Massen der fundamentalen Teilchen im Higgs-Mechanismus erzeugt werden, so zerfällt das instabile Higgs-Boson bevorzugt in schwere Teilchen. Die genauen relativen Raten für Zerfälle in verschiedene Teilchenpaare hängen von der noch unbekannten Masse des Higgs-Bosons ab. Sie können mit hoher Genauigkeit bei TESLA experimentell gemessen werden.

anhand der Erzeugung von Paaren von Higgs-Teilchen an einem Collider wie TESLA experimentell bestimmt werden.

Damit ist gesichert, dass alle wesentlichen Elemente des Higgs-Mechanismus mit der nächsten Generation von hochenergetischen Proton- und Elektron-Positron-Collidern experimentell etabliert werden können. Die Frage nach dem Ursprung der Masse wird also aller Voraussicht nach in den nächsten Jahren von der Teilchenphysik gelöst werden.

Zum Higgs-Mechanismus des Standardmodells wurde bisher eine Reihe von Alternativen ersonnen. In vielen dieser Theorien ist das Higgs-Feld nicht elementar, sondern aus neuen Bestandteilen aufgebaut, die von neuartigen Kräften zusammengehalten werden. Bisher konnte aus diesen qualitativen Ideen allerdings kein überzeugendes quantitatives Bild abgeleitet werden. Sollten die Teilchenmassen in der Natur dennoch über eine solche Alternative zum Higgs-Mechanismus erzeugt werden, so werden die Experimente an LHC und TESLA erste Aufschlüsse über diese neue Art von Wechselwirkungen vermitteln. Die neuen Wechselwirkungen müssen sich mit voller Stärke spätestens bei Energien knapp oberhalb von 1 TeV zeigen.

2.3.2 Einheitlicher Ursprung der Kräfte

Die Kopplungsstärken der elektromagnetischen, der schwachen und der starken Kraft hängen von der Energie ab, bei der sie gemessen werden. Diese Energieabhängigkeit wird durch quantentheoretische Effekte verursacht, die von kurzzeitig erzeugten virtuellen Teilchen-Antiteilchen-Paaren herrühren (siehe Box 2.2 Seite 14) und sowohl bei der elektromagnetischen als auch bei der starken Wechselwirkung experimentell bestätigt worden sind.

Extrapoliert man die gemessenen Kopplungen der drei fundamentalen Wechselwirkungen zu höheren Energien, so zeigt sich, dass sich die bei niedrigen Energien unterschiedlichen Stärken der Kräfte bei hohen Energien angleichen. Die Energie, bei der diese Angleichung erfolgt, ist mit 10^{16} GeV allerdings extrem groß. Trotzdem hat diese Beobachtung weit reichende Konsequenzen. Vereinigen sich dort nämlich die Kräfte zu einer einheitlichen

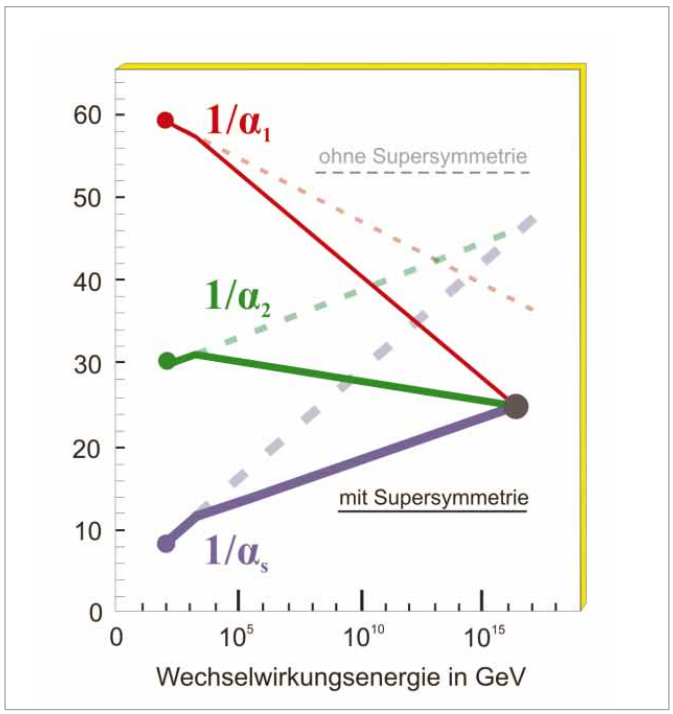


Abb. 2.12: Die Stärke (Eichkopplungen) von elektroschwacher (α_1 und α_2) und starker (α_s) Kraft ändert sich mit der Energie. Die Kräfte werden bei extrem hohen Energien – in supersymmetrischen Theorien – schließlich gleich stark und verschmelzen zu einer einzigen fundamentalen Kraft. Aufgetragen ist die reziproke Stärke.

Wechselwirkung, so sind die bei niedrigen Energien wirkenden Kräfte als unterschiedliche Erscheinungsformen einer einheitlichen Grundkraft zu verstehen, wie sie von Howard Georgi und Sheldon Glashow eingeführt wurde. Eine messbare Konsequenz ist die Instabilität des Protons. Wenn auch die für das Proton vorhergesagte mittlere Lebensdauer extrem groß ist – etwa eine Billion mal eine Billion mal größer als das Alter des Universums von zehn Milliarden Jahren –, so gibt es doch eine reale Chance, Zerfälle von Protonen in Positronen, Neutrinos und Photonen experimentell zu finden. Eine solche Entdeckung wäre von fundamentaler Bedeutung für unser Verständnis der Struktur von Materie und Kräften.

Supersymmetrie

Analysiert man die im vorangehenden Abschnitt erwähnte Energieabhängigkeit der fundamentalen Kopplungen im Detail, so stellt sich ein überraschender Befund heraus. Die Kopplungen laufen nur dann mit hoher Präzision an einem einzigen Punkt zusammen, wenn es zusätzlich zu den bekannten Teilchen des Standardmodells weitere, neuartige Partnerteilchen gibt (Abb. 2.12). Die „fermionischen" Leptonen und Quarks – die als Materieteilchen einen halbzahligen Spin tragen – besitzen dann neue „bosonische" Partner – also Partner mit ganzzahligem Spin; entsprechend besitzen die bosonischen Kraftteilchen des Standardmodells wiederum neuartige fermionische Partner. Diese Zusammenfassung von Materieteilchen und Kraftfeldern in einem einheitlichen Konzept ist Ausdruck einer neuartigen Symmetrie – der so genannten Supersymmetrie, die von Julius Wess und Bruno Zumino in die Teilchenphysik eingeführt wurde.

Ob die Supersymmetrie in der Natur verwirklicht ist, kann experimentell durch das Auffinden der supersymmetrischen Partnerteilchen entschieden werden. Bisher konnte keines dieser Teilchen nachgewiesen werden. Dies schließt die Gültigkeit der Supersymmetrie jedoch keineswegs aus, da die Massen der neuen Teilchen bis zu einigen TeV betragen können. Teilchen mit solch hohen Massen lassen sich erst am LHC entdecken; sind die Massen niedriger, so könnten sich die supersymmetrischen Partnerteilchen schon am Tevatron zeigen. Interessanterweise stimmt die kosmologische Evidenz für dunkle Materie mit den Erwartungen von supersymmetrischen Theorien überein. Liefert die Entdeckung der dunklen Materie bereits einen ersten Hinweis darauf, dass die Natur supersymmetrisch ist?

Universalvereinigung aller Kräfte

Das supersymmetrische Bild der Natur ist physikalisch sehr attraktiv. Besonders faszinierend ist dabei die theoretische Erkenntnis, dass die Supersymmetrie auch eine physikalische *Raison d'Être* für die Gravitation bietet, ähnlich wie die Eichinvarianz die Begründung für die Kräfte im Standardmodell liefert. In supersymmetrischen Theorien können Extrapolationen bis in die Nähe der Planck'schen Energieskala von 10^{19} GeV ausgeführt werden (Abb. 2.13). Bei diesen hohen Energien ist die Gravitationswechselwirkung zwischen einzelnen Elementarteilchen nicht mehr vernachlässigbar, sondern vielmehr von vergleichbarer Stärke wie die elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung. Sie muss deshalb in die Teilchenphysik mit einbezogen werden. Ob die supersymmetrischen Theorien eine solche Vereinigung tatsächlich korrekt beschreiben, kann mit Präzisionsexperimenten an dem geplanten Elektron-Positron-Linearcollider überprüft werden. Die hohe Genauigkeit, die mit einer solchen Anlage erreicht werden kann, ist daher unerlässlich; sie gewährt einen experimentellen Zugang zu den Mechanismen, die bei der Universalvereinigung aller Kräfte wirken, und sie lässt das Zusammenwirken aller fundamentalen Kräfte offenbar werden.

Auf diese Weise kann ein in sich geschlossenes Weltbild entstehen, das von der Planck-Skala bei 10^{-35} m bis zu den

kosmischen Dimensionen des Universums einen ungeheuer weiten Gültigkeitsbereich besitzt. Realisieren lässt sich eine solche allumfassende quantentheoretische Beschreibung möglicherweise mit Hilfe von Superstringtheorien, in denen die Teilchen nicht mehr punktförmig sind, sondern vielmehr winzigen, schwingenden Saiten gleichen. Dieser Übergang von punktförmigen Teilchen zu linear ausgedehnten Elementarbausteinen löst Schwierigkeiten, die in feldtheoretischen Beschreibungen der Gravitation unüberwindbar erscheinen.

2.3.3 Struktur der Raumzeit

Das bisher entwickelte Weltbild ist in jüngster Zeit mit einer überraschenden Alternative konfrontiert worden. Bis vor kurzem ging man davon aus, dass die Stärke der Gravitation erst bei Energien nahe der Planck-Skala mit der Stärke der teilchenphysikalischen Kräfte vergleichbar wird. In einem alternativen Ansatz wird die Gravitationswechselwirkung jedoch schon bei wesentlich niedrigeren Energien stark. Ein solches Szenario führt bereits im Bereich niedriger Energien zur Erweiterung der bekannten vierdimensionalen Raumzeit um weitere Raumdimensionen. Die Gravitation, wie sie in unserer Welt mit vier Raumzeitdimensionen in Erscheinung tritt, wäre dann nur eine Projektion aus einer höherdimensionalen Welt und als solche nur scheinbar so außerordentlich schwach.

Es sind unterschiedliche Ausführungen dieser Idee untersucht worden, die eine Vielzahl von experimentellen Fragestellungen eröffnen. Diese reichen von Untersuchungen der Gravitationskraft, die bei kleinen Abständen vom klassisch vorhergesagten Verhalten abweichen sollte, bis hin zu Streuexperimenten bei den höchsten erreichbaren Beschleunigerenergien. In hochenergetischen Teilchenkollisionen könnten die Gravitonen, welche die Schwerkraft übertragen, in so großer Zahl abgestrahlt werden, dass ein messbarer Energiebetrag verloren zu gehen scheint, da man die Gravitonen nicht direkt nachweisen kann. Auch könnte der Austausch neuartiger schwerer Gravitonen zu Änderungen der im Standardmodell erwarteten Ergebnisse von hochenergetischen Streuversuchen führen. Zukünftige Experimente am LHC und am geplanten Elektron-Positron-Linearcollider werden Aufschluss darüber geben, ob die Gravitation schon bei den an diesen Beschleunigern erreichbaren Energien direkt mit der Teilchenphysik verknüpft ist.

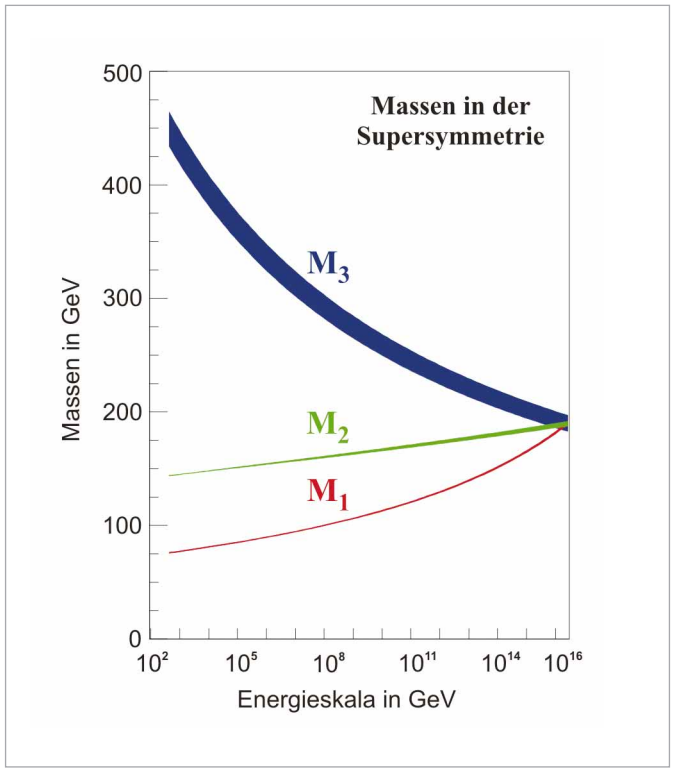


Abb. 2.13: Auch die Massen der supersymmetrischen Partnerteilchen von Photon, W/Z-Bosonen und Gluonen lassen sich aus einem einzigen Wert herleiten, wenn die Teilchenphysik nahe der Planck-Skala mit der Gravitation zu einer einheitlichen Universalkraft verbunden ist. Die Überprüfung dieser Idee erfordert die präzise Bestimmung der Massen M_1, M_2 und M_3, wie sie bei LHC und TESLA möglich sein wird.

Abb. 3.1: Weltweit verteilt: die wichtigsten Forschungszentren für Teilchenphysik

3 · EXPERIMENTE: STATUS UND OPTIONEN

Die zentralen Fragestellungen der heutigen Teilchenphysik sucht man derzeit mit Hilfe eines vielfältig angelegten Experimentierprogramms zu beantworten, das sowohl Experimente an Teilchenbeschleunigern beinhaltet als auch solche, die unabhängig von Beschleunigeranlagen durchgeführt werden. Da die Experimente der Teilchenphysik aufgrund ihres Umfangs langer Jahre der Vorbereitungs- und Entwicklungszeit bedürfen, gibt es für die Zukunft schon heute eine Reihe von Plänen und Ideen, von denen einige bereits detailliert ausgearbeitet sind, während andere sich noch in einem frühen Diskussionsstadium befinden.

Die Ära des *Large Electron-Positron Colliders* LEP bei CERN in Genf und seines amerikanischen Pendants, des *Stanford Linear Colliders* SLC bei SLAC (Kalifornien), ist mit dem Jahr 2000 zu Ende gegangen. An allen LEP-Experimenten waren deutsche Arbeitsgruppen maßgeblich beteiligt. Vornehmlich durch die mit sehr hoher Messgenauigkeit bei LEP durchgeführten Experimente konnte das Standardmodell der Teilchenphysik etabliert und auf eine Grundlage gestellt werden, bei der mit dem Higgs-Teilchen der einzig noch nachzuweisende Baustein verbleibt. Die erhoffte Entdeckung des Higgs-Teilchens – oder an seiner Stelle eines neuen physikalischen Phänomens – mit den Experimenten der nächsten Generation von Beschleunigern (Tevatron, LHC, Linearcollider) wird daher ein neues Kapitel der Elementarteilchenphysik aufschlagen.

In unmittelbarer Zukunft werden die laufenden Experimente am Elektron-Proton-Speicherring HERA bei DESY in Hamburg und am Proton-Antiproton-Beschleuniger Tevatron bei Fermilab in Chicago grundlegenden Fragestellungen nachgehen und bei den höchsten derzeit verfügbaren Energien neuen Phänomenen auf der Spur sein – bis der bei CERN im Bau befindliche *Large Hadron Collider* LHC im Jahr 2007 diese Rolle übernimmt. Parallel dazu erforscht man in Experimenten an den so genannten B-Mesonen-Fabriken KEK-B in Japan und PEP-II in Kalifornien Teilchen-Antiteilchen-Oszillationen, die Verletzung der Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie (CP-Verletzung) sowie die Mischungseigenschaften der Quarks.

An allen Experimenten, die an diesen Anlagen durchgeführt werden, sind deutsche Gruppen beteiligt; dies gilt in besonderem Maße für die HERA-Experimente in Hamburg. Deutsche Gruppen arbeiten außerdem an weiteren Experimentierprogrammen mit speziellen Zielrichtungen mit.

Mit der Entdeckung von Experimenten mit Neutrinos aus der kosmischen Höhenstrahlung und aus der Sonne, dass sich verschiedene Neutrinoarten ineinander umwandeln können (den Neutrino-Oszillationen), ist die Neutrinophysik 1998 in eine neue Phase eingetreten. Die genaue Untersuchung dieser Oszillationen und der Mischungseigenschaften der Neutrinos ist daher das Ziel verschiedener Experimentiervorschläge, die sich dazu unterschiedlicher Neutrinoquellen bedienen: Komplementär zu Experimenten an Beschleunigern werden Experimente mit Neutrinos aus kosmischen Quellen oder aus Kernreaktionen durchgeführt beziehungsweise geplant.

Der LHC wird das Tor zum TeV-Energiebereich aufstoßen und die dort erwarteten Phänomene „neuer Physik“ entdecken. Dieses bisher größte in weltweiter Zusammenarbeit durchgeführte Projekt der Teilchenphysik geht die heutigen zentralen Fragen mit der derzeit bestmöglichen Technologie in Beschleuniger- und Detektorbau an. Die Experimente am LHC werden die Teilchenphysik in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren entscheidend bestimmen.

Weltweite Einigkeit besteht in der Teilchenphysik darin, dass das nächste große Beschleunigerprojekt der Hochenergiephysik ein Elektron-Positron-Linearcollider sein muss: eine zum LHC komplementäre Anlage, welche die exzellent „sauberen“ experimentellen Bedingungen von Elektron-Positron-Beschleunigern mit hoher Energie und hoher Kollisionsrate der Teilchen („Luminosität“) verknüpft. Um die in Kapitel 2 diskutierten zentralen Fragen beantworten zu können, ist die Teilchenphysik auf einen solchen Linearcollider angewiesen.

Längerfristige Perspektiven bieten Ideen zu Anlagen wie einem *Very Large Hadron Collider* (VLHC) oder einem Myoncollider, die es in einer späteren Phase erlauben würden, in einen Energiebereich von mehreren TeV vorzustoßen. Auch auf dem Gebiet der Neutrinophysik gibt es Überlegungen zu neuartigen Anlagen, anhand derer die Neutrinos detaillierter untersucht werden könnten. Ein letzter Abschnitt dieses Kapitels ist schließlich der Verbindung experimenteller Untersuchungen mit theoretischen Fragen gewidmet.

3.1 Experimente an den heutigen Beschleunigern

3.1.1 Experimente an HERA

In der Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA bei DESY in Hamburg kollidieren Elektronen oder wahlweise ihre Antiteilchen, die Positronen, mit einer Energie von 27,5 GeV mit Protonen, die auf 920 GeV beschleunigt wurden. Dabei wirkt das Elektron wie eine winzige Sonde, mit der sich das Innere des Protons detailliert untersuchen lässt. Mit HERA wird eine lange, außerordentlich erfolgreiche und mit mehreren Nobelpreisen ausgezeichnete Forschungsrichtung fortgesetzt, die ihre Vorläufer in den Experimenten von Ernest Rutherford (Nobelpreis für Chemie 1908), Robert Hofstadter (Nobelpreis für Physik 1961) sowie Jerome Friedman, Henry Kendall und Richard Taylor (Nobelpreis für Physik 1990) hat. Die HERA-Experimente untersuchen die Struktur des Protons bei bisher unerreichten Energien und Auflösungen bis hinunter zu Dimensionen von 10^{-18} m sowie die Eigenschaften der starken, elektromagnetischen und schwachen Kraft.

In der ersten Messphase von HERA (HERA-I, 1991 bis 2000) gelang es den Experimenten H1 und ZEUS (mit insgesamt fast 800 beteiligten Wissenschaftlern aus 18 Ländern) auf direkte Weise zu zeigen, dass elektromagnetische und schwache Wechselwirkung bei sehr hohen Impulsüberträgen gleich stark werden und sich zur elektroschwachen Wechselwirkung vereinigen lassen. Diese Vereinigung zeigt sich deutlich im Vergleich der Wirkungsquerschnitte der Elektron-Proton-Streuung für neutrale Ströme (Austausch von Photonen oder neutralen Z-Bosonen zwischen Elektron und Proton) und für geladene Ströme (Austausch von geladenen W-Bosonen) (siehe Abb. 2.5). Die innere Struktur des Protons, d. h. die Dichten von Quarks und Gluonen in Abhängigkeit vom Impuls, konnten wesentlich genauer als bisher und in bislang unzugänglichen Bereichen gemessen werden. Die Quarks und Gluonen haben sich im Rahmen der bisher erzielten Auflösung von 10^{-18} m als punktförmige Objekte ohne weitere Unterstruktur erwiesen. Eine der Überraschungen der genauen Messungen der letzten Jahre war die Erkenntnis, dass die Dichte der im Proton vorhandenen Gluonen und Quark-Antiquark-Paare sehr viel größer ist, als gemeinhin erwartet wurde.

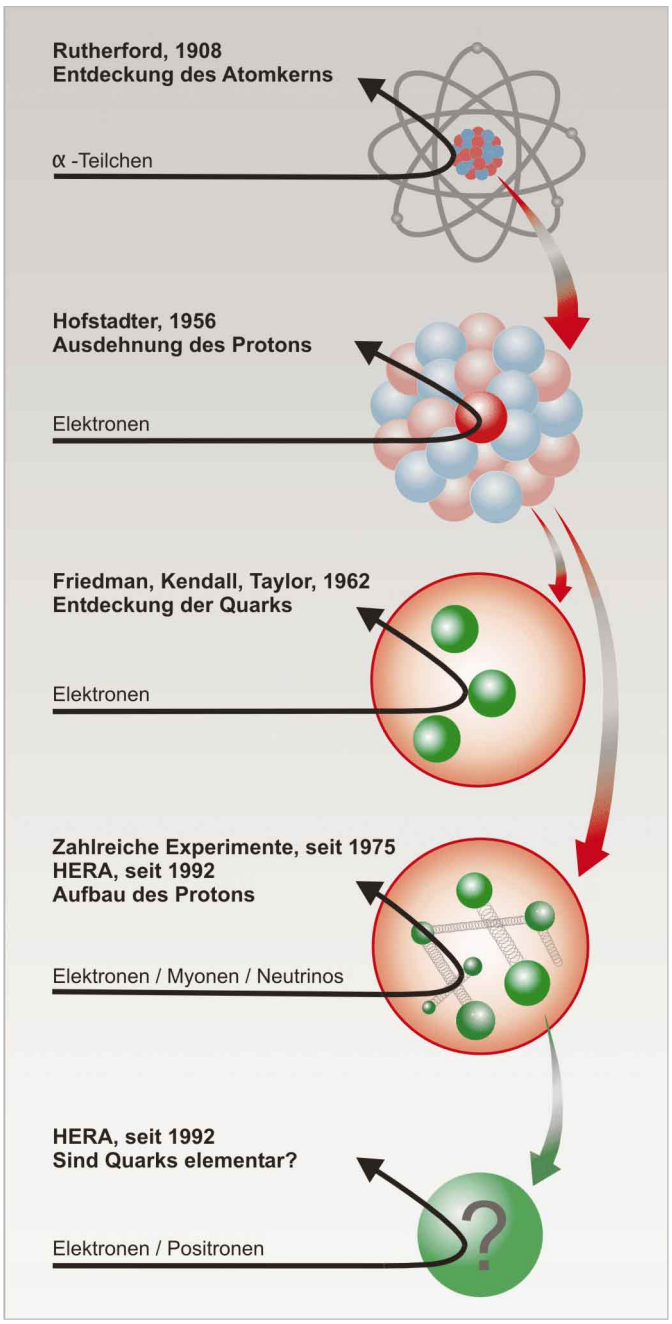


Abb. 3.2: Die Experimente an HERA stehen in direkter Linie zu berühmten Streuexperimenten, die zur Entdeckung von immer kleineren Unterstrukturen der Materie geführt haben. Seit 1992 hat HERA die höchste Auflösung und deckt die Struktur des Protons bei immer kleineren Abständen auf.

HERA ist besonders gut dazu geeignet, den Übergangsbereich zwischen kleinen und großen Abständen experimentell zu untersuchen, bei dem die in der Theorie der starken Wechselwirkung übliche Rechenmethode – die so genannte Störungstheorie – keine gute Beschreibung mehr liefert, sondern neue theoretische Konzepte herangezogen werden müssen. Dabei fanden die HERA-Experimente eine Überraschung: Mit einer unerwartet hohen Wahrscheinlichkeit von etwa 10 % bleibt das Proton selbst bei den heftigsten Elektron-Proton-Zusammenstößen nahezu ungestört und intakt. In enger Zusammenarbeit mit Theoretikern wird derzeit versucht, die Physik dieser „diffraktiven Phänomene“ zu verstehen.

Das dritte HERA-Experiment HERMES wurde speziell dafür gebaut, die Spinstruktur der Nukleonen mit Hilfe von polarisierten Elektronen zu untersuchen – also zu ergründen, wie der innere Drehimpuls (der „Spin“) der Protonen und Neutronen genau zustande kommt. Ein verwandtes Experiment bei CERN, COMPASS, ist kürzlich angelaufen und untersucht ähnliche Fragestellungen. Die Aufteilung des Gesamtspins des Protons auf die Spins und Bahndrehimpulse seiner einzelnen Bausteine erwies sich als komplexer als ursprünglich angenommen. Die „Valenzquarks“, die

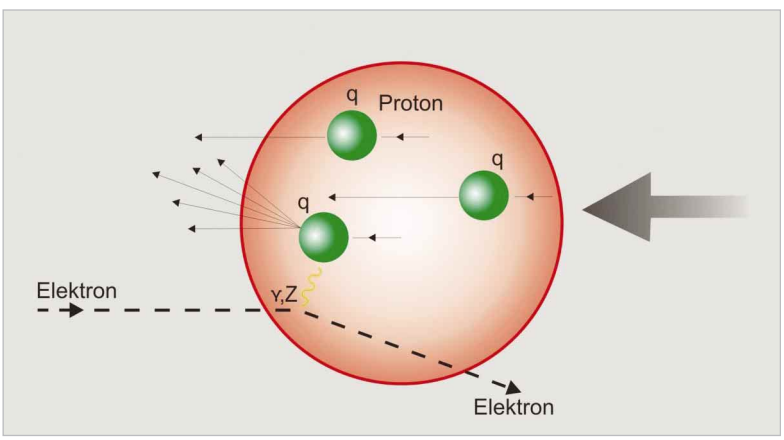


Abb. 3.3: Schematische Darstellung der Kollision eines Elektrons (von links kommend) mit einem Proton (von rechts kommend). Das punktförmige Elektron dringt in das Proton ein und wird an einem der Quarks gestreut. Die Streuung wird durch den Austausch eines Kraftteilchens der elektromagnetischen oder schwachen Wechselwirkung (gelbe Linie) vermittelt. Das getroffene Quark erzeugt ein enges Bündel von Teilchen (Jet).

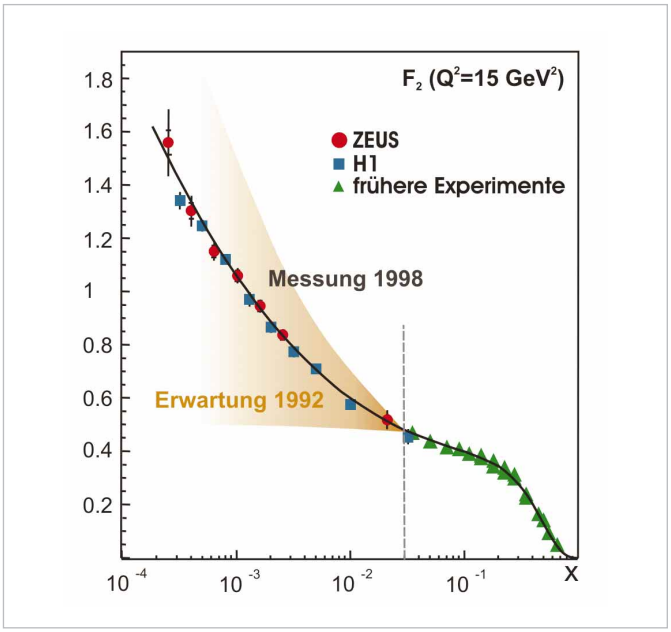


Abb. 3.4: Die Strukturfunktion des Protons, wie sie an HERA gemessen wird: Der starke Anstieg links zeigt an, dass sich im Proton eine große Anzahl von elementaren Bausteinen befindet, die im Mittel einen relativ geringen Anteil x zum Gesamtimpuls des Protons beitragen. Vor dem Start von HERA gab es keine gesicherten Vorhersagen (gelber Bereich).

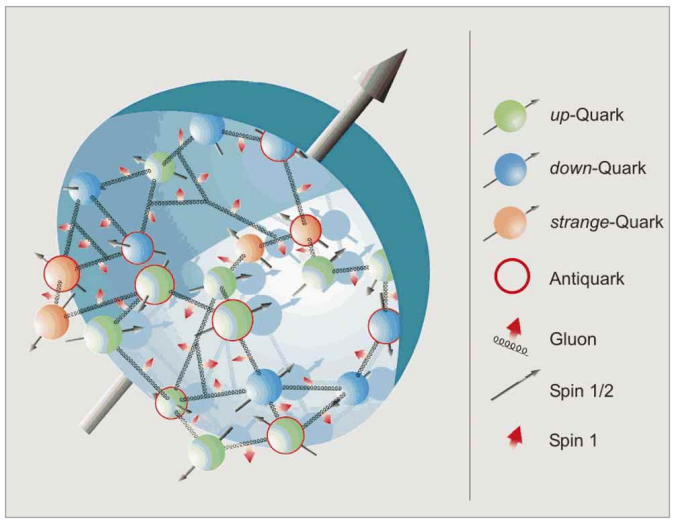


Abb. 3.5: Je genauer man in ein Proton hineinblickt, desto mehr Teilchen werden beobachtet: Es enthält eine komplexe Struktur aus Quarks und Antiquarks, die von Gluonen zusammengehalten werden. Alle tragen ihren eigenen Drehimpuls („Spin"). Zudem entsteht durch ihre unablässige Bewegung ein Bahndrehimpuls, der ebenfalls zum Gesamtspin des Protons beiträgt. Wie sich die einzelnen Drehimpulse in diesem komplexen Zustand zum Gesamtspin des Protons zusammensetzen, wird im HERMES-Experiment bei HERA in Hamburg und im COMPASS-Experiment bei CERN untersucht.

Eigenschaften wie Ladung und Baryonenzahl der Nukleonen bestimmen, tragen bei kleinen Impulsüberträgen offenbar nur wenig zum Gesamtdrehimpuls bei. Im Gegensatz zu bisherigen Experimenten ermöglicht HERMES, nicht nur das gestreute Elektron, sondern auch die bei der Kollision erzeugten Teilchen nachzuweisen und zu identifizieren. Zu der Frage, inwieweit der Spin auf die verschiedenen Quarkkomponenten, auf Gluonen und/oder auf Bahndrehimpulse zurückgeht, kann das Experiment HERMES wesentliche Beiträge leisten.

Das vierte HERA-Experiment HERA-B wurde zur Untersuchung von B-Mesonen konzipiert, also von Teilchen, die aus einem Quark und einem Antiquark bestehen („Mesonen") und ein Bottom-Quark enthalten. Ziel war es, die hohe Rate, mit der diese Teilchen an HERA erzeugt werden, zu vielfältigen Messungen zu nutzen. Die experimentellen Herausforderungen bei diesem Experiment haben sich als außerordentlich anspruchsvoll herausgestellt; sie sind denen der LHC-Experimente ähnlich, in einigen Aspekten wie z. B. den Untergrundverhältnissen sogar noch schwieriger. HERA-B ging im Jahr 2000 in Betrieb und liefert jetzt interessante Ergebnisse zur starken Wechselwirkung, wenn auch das ursprüngliche Ziel, die CP-Verletzung im System der B-Mesonen zu beobachten, nicht zu erreichen ist.

Im Jahr 2002/2003 geht der HERA-Beschleuniger mit einer viermal höheren Luminosität und mit verbesserten Detektoren in die zweite Forschungsrunde (HERA-II). Diese höhere Leistung wird das Entdeckungspotenzial von HERA für mögliche Unterstrukturen von Quarks sowie für Leptoquarks („Zwitterteilchen" aus Leptonen und Quarks) und weitere neue Phänomene deutlich vergrößern und Tests der starken Wechselwirkung mit neuer Präzision erlauben.

Das Engagement der deutschen Hochenergiephysik an den Experimenten bei HERA ist sehr groß. Insgesamt sind 28 Arbeitsgruppen aus 16 deutschen Universitäten, zwei Max-Planck-Instituten und zwei Forschungszentren an HERA beteiligt. Das Experimentierprogramm mit HERA-II soll bis mindestens Ende 2006 fortgeführt werden.

Tabelle 3.1: Die Beteiligung deutscher Gruppen an den HERA-Experimenten (Stand 2002)

H1	RWTH Aachen, HU Berlin, U Dortmund, U Hamburg, U Heidelberg, MPI Heidelberg, U Kiel, MPI München, BUGH Wuppertal, DESY
ZEUS	U Bonn, U Freiburg, U Hamburg, FZ Jülich, U Siegen, DESY
HERMES	U Erlangen, U Freiburg, U Gießen, LMU München, U Regensburg, DESY
HERA-B	HU Berlin, U Dortmund, U Heidelberg, MPI Heidelberg, U Mannheim, MPI München, U Rostock, U Siegen, DESY

3.1.2 Experimente am Tevatron

Im Tevatron-Beschleuniger bei Fermilab (Chicago, Illinois) prallen Protonen und Antiprotonen mit einer Schwerpunktsenergie von 2 TeV aufeinander. Damit können Stöße der elementaren Bausteine der Protonen von einigen hundert GeV erzielt werden. Dies ist bis zum Start des LHC die

höchste erreichbare Energie für Teilchenkollisionen und bietet deshalb die besten Chancen, Phänomene möglicher neuer Physik direkt nachzuweisen.

In der ersten Messperiode (Run-1) am Tevatron-Beschleuniger, die bis 1996 dauerte, wurden eine Reihe wichtiger Erkenntnisse gewonnen. Zu diesen gehörte neben Messungen von Eigenschaften des Bottom-Quarks auch eine genaue Bestimmung der Masse des W-Bosons, ein wichtiger Eckstein für Konsistenztests des Standardmodells. Der Höhepunkt der erfolgreichen Messperiode war die Entdeckung des Top-Quarks. Seine Masse wurde gemessen und stimmte mit derjenigen überein, die indirekt durch elektroschwache Präzisionsmessungen vorhergesagt wurde (Abb. 3.6). Dieser direkte Nachweis ist eine weitere hervorragende Bestätigung des Standardmodells. Er zeigt außerdem erneut das notwendige Zusammenspiel von Experimenten an Elektron-Positron- und Proton-(Anti-)Proton-Collidern. Die Ergänzung dieser beiden Experimentiermethoden wird sich möglicherweise für das Higgs-Boson wiederholen: Die elektroschwachen Präzisionsmessungen deuten auf eine Masse des Higgs-Bosons hin, bei der es unter günstigen Umständen bereits von den Experimenten am Tevatron entdeckt werden kann.

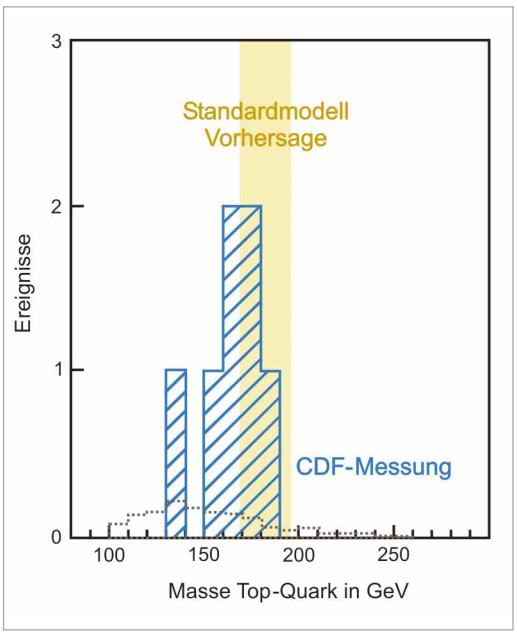


Abb. 3.6: Erste Hinweise auf das Top-Quark 1994 am Tevatron. Das Bild vom CDF-Experiment zeigt eine Anhäufung von Ereignissen bei derselben Masse, die aus elektroschwachen Präzisionsmessungen bei LEP, SLC und am Tevatron unter Benutzung der Standardtheorie vorhergesagt wurde.

Im Jahr 2001 begann für den Tevatron-Beschleuniger eine neue Forschungsphase mit erheblich verbesserten Detektoren und einer stärkeren Maschine, die bei leicht erhöhter Energie (von 1,8 TeV auf 2 TeV) eine um den Faktor 16 erhöhte Kollisionsrate (Luminosität) erreichen soll. Bis zum Jahre 2007 wird die Aufzeichnung einer 150-mal größerer Anzahl von Kollisionsereignissen angestrebt als in der ersten Messperiode. Zusätzlich zu einer bereits seit vielen Jahren bestehenden Beteiligung an CDF haben sich 2001 fünf deutsche Arbeitsgruppen dem D0-Experiment angeschlossen. Die deutschen Gruppen engagieren sich bei Betrieb und Überwachung neuer Detektorkomponenten, beteiligen sich bei der Entwicklung von Rekonstruktionssoftware sowie beim Aufbau der weltweiten Computing-Infrastruktur (GRID-Computing, siehe auch Kap. 5) und arbeiten bei der Analyse der Daten der Experimente mit.

Die verbesserten Bedingungen weiten das Physikprogramm am Tevatron erheblich aus. So können Untersuchungen zur CP-Verletzung und zu Teilchen-Antiteilchen-Oszillationen an verschiedenen Arten von B-Hadronen durchgeführt werden, welche die Messungen an B-Mesonen in den in Kapitel 3.1.3 beschriebenen B-Mesonen-Fabriken ausgezeichnet ergänzen. Neben einer erheblichen Verbesserung der Bestimmung der Masse des W-Bosons wird die Untersuchung des Top-Quarks weiterhin ein Schwerpunkt der zweiten Messperiode sein. Dabei spielt die präzisere Bestimmung seiner Masse eine bedeutende Rolle, weil sie einen wichtigen Parameter des Standardmodells darstellt. In den nächsten Jahren werden mehrere tausend Ereignisse mit Top-Quarks (statt der bisherigen ca. 100) identifiziert werden. Damit ist zum ersten Mal eine genauere Untersuchung der Eigenschaften dieses bisher schwersten fundamentalen Teilchens möglich. Für die Entdeckung des Higgs-Bosons eröffnen sich den Tevatron-Experimenten Chancen in einem eng begrenzten Massenbereich. Allerdings ist die statistisch aussagekräftige Abtrennung des Higgs-Signals vom Untergrund ein sehr schwieriges Unterfangen. Weiterhin bietet das Tevatron in den nächsten Jahren vor Anlaufen des LHC die größten

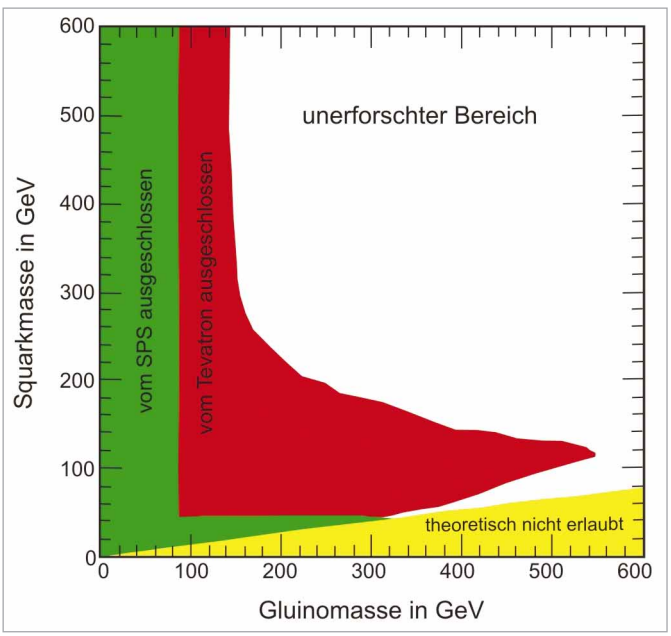


Abb. 3.7: Bereits mit den in der ersten Messperiode des Tevatron-Beschleunigers durchgeführten Messungen konnten wesentliche Bereiche des möglichen Parameterraums von supersymmetrischen Theorien getestet werden. Die Darstellung zeigt ausgeschlossene Bereiche der Squark-Masse als Funktion der Gluino-Masse in so genannten *Minimal Supergravity*-Modellen. Die Squarks sind die supersymmetrischen Partnerteilchen der Quarks, die Gluinos entsprechend die der Gluonen. Der bisher vom Tevatron abgesuchte Bereich kann mit den kommenden Daten noch erweitert werden und bietet ein Entdeckungspotenzial für supersymmetrische Teilchen.

Aussichten, neue Teilchen und Effekte zu entdecken, die über die Theorie des Standardmodells hinausweisen. Dazu gehören Teilchen der Supersymmetrie, Leptoquarks, schwere neue Kraftteilchen und Effekte zusätzlicher Raumdimensionen.

Die Experimente am Tevatron sind ein idealer Zwischenschritt auf dem Weg zum LHC und stellen das zentrale Forschungsprogramm für einige beteiligte deutsche Arbeitsgruppen dar. Sie bieten eine intensive Vorbereitung auf die Herausforderungen der Experimentiertechnik und die Physikanalysen am LHC.

Tabelle 3.2: Beteiligung deutscher Gruppen an den Tevatron-Experimenten (Stand 2002)

CDF	U Karlsruhe
D0	RWTH Aachen, U Bonn, U Mainz, LMU München, U Wuppertal

3.1.3 Experimente an den B-Mesonen-Fabriken KEK-B und PEP-II

Die Entdeckung von James Cronin, Val Fitch und Mitarbeitern im Jahr 1964, dass sich Materie und Antimaterie bei „K-Mesonen“ genannten Teilchen nicht genau gleich verhalten (die Verletzung der CP-Symmetrie, siehe Box 2.3 Seite 15), gehört gewiss zu den großen Überraschungen, welche die Natur gelegentlich bereithält. Ihre Bedeutung für die Frage, warum das Universum aus Materie besteht, während Antimaterie so gut wie nicht beobachtet wird, kann nicht überschätzt werden, wenn auch bereits klar ist, dass die CP-Verletzung bei schweren Quarks die kosmologische Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie nicht allein erklären kann. Die CP-Verletzung im System der neutralen K-Mesonen – also bei Teilchen, die jeweils ein Strange-Quark enthalten – wurde in mehreren Experimenten vor allem bei CERN (NA31 und NA48 mit Beteiligung mehrerer deutscher Arbeitsgruppen) und bei Fermilab sehr genau untersucht. Dabei wurde sowohl die „indirekte“ CP-Verletzung gemessen, die durch Teilchen-Antiteilchen-Oszillationen ausgelöst wird, als auch vor wenigen Jahren die „direkte“ CP-Verletzung, die im Zerfall der K-Mesonen selbst auftritt.

An den B-Mesonen-Fabriken PEP-II (bei SLAC, Stanford, USA) und KEK-B (bei KEK, Tsukuba, Japan), die 1999 angelaufen sind, wird die CP-Verletzung an einem zweiten System schwerer Teilchen detailliert untersucht: dem System der B-Mesonen, die jeweils ein Bottom-Quark enthalten. Die B-Mesonen-Fabriken sind asymmetrische Speicherringe, in denen die Teilchenstrahlen mit ungleichen Energien kollidieren, um die Messung von Zerfallszeitdifferenzen zu erlauben. Basis dieser Untersuchungen sind jeweils 50 Millionen pro Jahr erzeugte Paare von neutralen B-Mesonen (B^0) und ihren Antiteilchen ($\bar{B}^0$), die bei der Kollision von Elektronen und Positronen bei einer Energie von etwa 10 GeV erzeugt werden.

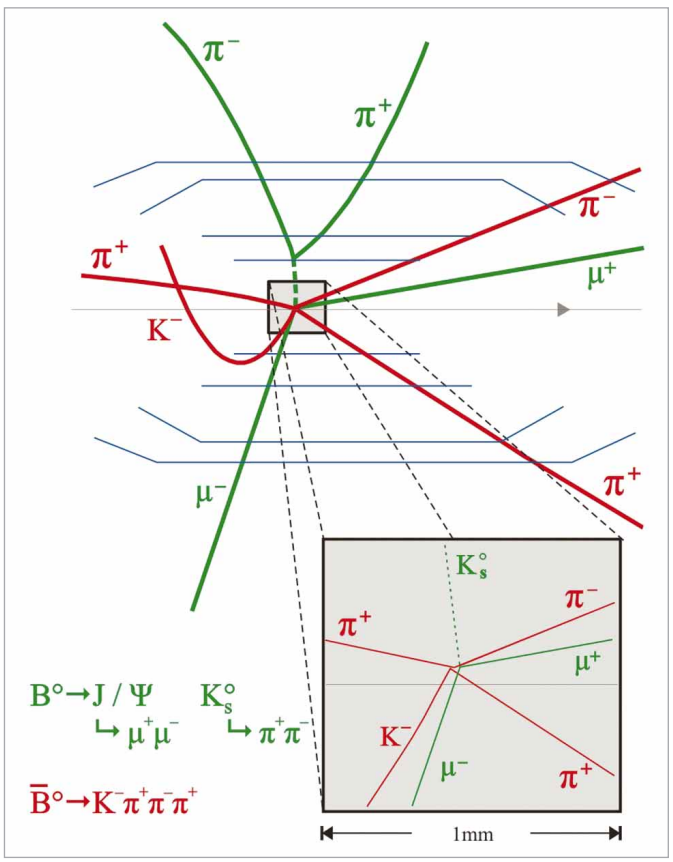


Abb. 3.8: Darstellung eines B^0-$\bar{B}^0$-Ereignisses im BaBar-Detektor. Was man mit dem Auge kaum erkennen kann, bleibt dem Detektor nicht verborgen: Das $\bar{B}^0$-Meson ist auf seinem Weg entlang der Strahlachse einen kurzen Moment vor seinem Partner, dem B^0-Meson, zerfallen.

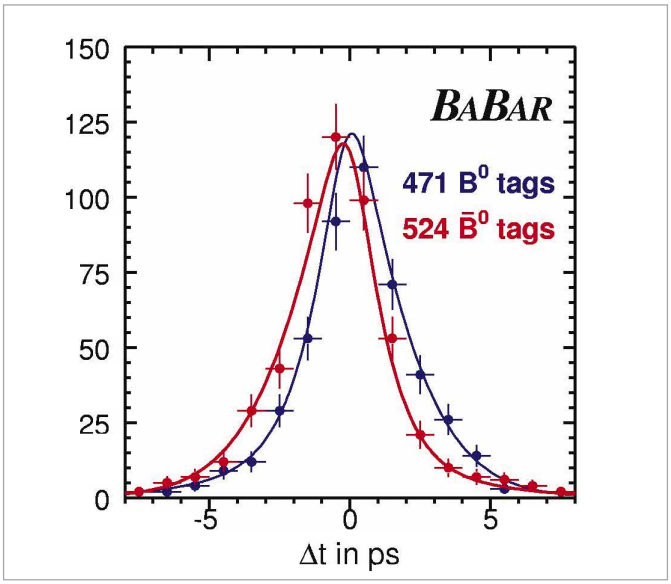


Abb. 3.9: Im BaBar-Experiment wird der Zeitpunkt des Zerfalls von B-Mesonen in die Teilchen J/ψ, K^0_s und andere mit dem Zerfall des begleitenden Mesons verglichen. Ist das begleitende Meson ein B^0-Meson („B^0 tag“), findet der Zerfall im Mittel früher statt als bei einem begleitenden $\bar{B}^0$-Meson („$\bar{B}^0$ tag“). Materie (B^0) und Antimaterie ($\bar{B}^0$) verhalten sich unterschiedlich, die CP-Symmetrie ist verletzt.

Die beiden Beschleuniger lieferten schon unmittelbar nach der Inbetriebnahme die geplanten hohen Kollisionsraten. Die erwartete Entdeckung der CP-Verletzung in diesem Teilchen-Antiteilchen-System gelang bereits kurz nach Anlaufen der Experimente. Inzwischen gibt es genauere Messungen, die die Vorhersagen des Standardmodells ausgezeichnet bestätigen.

Die weitere detaillierte Untersuchung der CP-Verletzung ist die vordringlichste Aufgabe dieser Experimente in den nächsten Jahren. Die zu erwartenden Messergebnisse werden unser derzeitiges Verständnis der CP-Verletzung grundlegend prüfen. Das experimentelle Programm, das mindestens noch bis 2010 andauern wird, weist außer der Erforschung der Verletzung der CP-Symmetrie viele weitere interessante Forschungsfelder auf, so zum Beispiel Teilchen-Antiteilchen-Oszillationen bei Mesonen, die Charm-Quarks enthalten, und Experimente zur Theorie der starken Wechselwirkung in Mesonen mit Charm- oder Bottom-Quarks. Da in den B-Mesonen-Fabriken außerdem sehr viele Tau-Leptonen erzeugt werden, können diese Partner der Elektronen hier ausgezeichnet studiert werden. Darüber hinaus können mit diesen Hochstatistik-Experimenten viele Fragestellungen angegangen werden, die gegebenenfalls eine Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik nötig machen. Derzeit sind vier Arbeitsgruppen aus Deutschland an den Experimenten BaBar (PEP-II) und BELLE (KEK-B) beteiligt.

Tabelle 3.3: Die Beteiligung deutscher Gruppen an den Experimenten an PEP-II und KEK-B sowie am Experiment NA48 zur CP-Verletzung im System der K-Mesonen (Stand 2002)

BaBar (PEP-II)	U Bochum, U Dresden, U Rostock
BELLE (KEK-B)	U Frankfurt
NA48 (CERN)	U Mainz, U Siegen

3.1.4 Beschleunigerexperimente zu speziellen Fragestellungen

Eigenschaften von Neutrinos

Zu den wichtigen Entdeckungen der letzten Jahre gehört, dass sich Neutrinos verschiedener Art mischen – dass also die beobachteten Neutrinos Überlagerungen von verschiedenen Neutrinosorten sind – und dass die Neutrinos deshalb eine Masse besitzen müssen (siehe Kap. 3.5). Die Umwandlung von Myon-Neutrinos wurde zuerst bei Neutrinos beobachtet, die durch kosmische Strahlung in der Atmosphäre erzeugt wurden. Sie kann mit Neutrinostrahlen aus Beschleunigern bestätigt und weiter untersucht werden.

Der vom LSND-Experiment in Los Alamos, USA, veröffentlichte Hinweis auf Oszillationen zwischen Myon-Neutrinos und Elektron-Neutrinos wird vom KARMEN-Experiment am *Rutherford Appleton Laboratory* in Großbritannien über einen großen Bereich der möglichen Parameter nicht bestätigt. Eine endgültige Antwort auf diese offene Frage sollte das MiniBooNE-Experiment bei Fermilab geben.

Das Long-Baseline-Experiment K2K von der Ost- zur Westküste Japans zwischen dem Forschungszentrum KEK und dem Superkamiokande-Detektor misst einen Verlust von Myon-Neutrinos über eine Strecke von 250 km, in Übereinstimmung mit den Messungen der Astroteilchenphysik. Nach der Reparatur des Superkamiokande-Detektors, der im November 2001 bei einem Unfall einen wesentlichen Schaden erlitten hat, wird man mit der Datennahme fortfahren, um ein statistisch überzeugendes Ergebnis zu erhalten. Das neu konzipierte MINOS-Experiment von Fermilab zur 735 km entfernten Soudan-Mine soll im Jahr 2004 die Datennahme aufnehmen und den durch Oszillationen verursachten Verlust von Myon-Neutrinos im gesamten Parameterbereich, in dem Neutrinomischungen erwartet werden, untersuchen.

Die bisherigen Ergebnisse aus Experimenten mit atmosphärischen Neutrinos legen nahe, dass sich Myon-Neutrinos überwiegend in Tau-Neutrinos umwandeln. Direkte Hinweise für die Wechselwirkung von Tau-Neutrinos wurden bislang nur im DONUT-Experiment bei Fermilab gefunden. Die Umwandlung von Myon-Neutrinos in Tau-Neutrinos über 730 km vom CERN zum Gran Sasso Laboratorium in Italien soll über den Nachweis einiger Tau-Neutrinos in dem ursprünglich reinen Myon-Neutrino-Strahl erfolgen. An dem Projektvorschlag für das OPERA genannte Experiment (geplanter Beginn 2006) sind auch deutsche Gruppen beteiligt.

Seltene Zerfälle

Empfindliche Experimente zu seltenen Zerfällen von Leptonen und Mesonen – insbesondere solchen, die Strange- oder Charm-Quarks enthalten – erlauben es, nach überraschenden Effekten zu suchen, die im Standardmodell verboten oder sehr selten sind, wie z. B. der Zerfall eines Myons in ein Elektron unter Aussendung eines Photons. Dazu ist es notwendig, bestimmte einzelne Zerfallsreaktionen aus einigen 100 000 Milliarden Standardzerfällen herauszufiltern. Experimente zu seltenen Zerfällen finden in Japan (KEK), USA (Brookhaven, Fermilab, Cornell), Italien (Frascati), in der Schweiz (PSI) und bei CERN in Genf statt.

Quantenmechanische Mischungen von verschiedenen Quarktypen können in extrem seltenen Zerfällen von K-Mesonen untersucht werden. Da bei diesen Reaktionen nicht nachweisbare Neutrinos auftreten, sind diese Experimente allerdings sehr schwierig durchzuführen. K-Mesonen bieten sich ebenso für die Suche nach neuen CP-verletzenden Effekten und für die Untersuchung des Wechselspiels zwischen schwacher und starker Kraft bei niedrigen Energien an.

Elektroschwache Wechselwirkung bei niedrigen Energien

Eine andere Klasse von Experimenten dient dazu, die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung präzise zu testen. Beispiele hierfür sind die Untersuchung des magnetischen Moments von Myonen in Brookhaven mit einer Genauigkeit von 0,0001 % und Vergleiche zwischen den gemessenen Parametern des Standardmodells bei der Streuung von Neutrinos und der Elektron-Positron-Vernichtung.

Wichtig für Vorhersagen des Standardmodells ist auch eine genaue Kenntnis davon, wie die Kopplungsstärke der elektromagnetischen Wechselwirkung von der Energie abhängt. Die Unsicherheit in ihrer Bestimmung kann erheblich reduziert werden, wenn die Erzeugung von Hadronen in der Elektron-Positron-Vernichtung so genau wie möglich auch bei niedrigeren Energien gemessen wird. Präzise Untersuchungen von Zerfällen von Mesonen, die Charm-Quarks enthalten, und von Tau-Leptonen werden ab 2003 an so genannten Tau-Charm-Fabriken möglich sein.

Tabelle 3.4: Eine Auswahl von Experimenten an Beschleunigern mit besonderer Fragestellung

Zentrale Themen	Experimente	geplante Laufzeit	deutsche Beteiligung?
Pion-, Myon- und Neutronzerfälle	Experimente am PSI (Villigen)	bis 2007	
$K_L^0 \to \pi^0 \nu_e \bar{\nu}_e$	K0PI0 (Brookhaven), E391a (KEK)	2003-2013	
$K^{+/-} \to \pi^{+/-} \nu_e \bar{\nu}_e$	CKM (Fermilab)	2008-2013	
K_S^0 und Hyperonzerfälle	NA48/1 (CERN)	2002	ja
$K^{+/-}$-Zerfälle, direkte CP-Verletzung	NA48/2 (CERN)	2003-2004	ja
Φ-, K_S^0-, K_L^0-Zerfälle, CP-Verletzung	KLOE (Frascati)	bis 2012	ja
hadr. e^+e^--Wirkungsquerschnitt	Novosibirsk, Peking, Frascati	bis 2012	ja
τ- und charm-Zerfälle	CESR-C (Cornell), Peking (geplant)	2003-2007	

3.2 Der Large Hadron Collider LHC

Der nach einer langjährigen Planungs- und Vorbereitungsphase derzeit im Bau befindliche *Large Hadron Collider* LHC am CERN in Genf wird allgemein als das „Flaggschiff" der Hochenergiephysik in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren angesehen. Hier werden in Proton-Proton-Kollisionen die Zusammenstöße zwischen ihren elementaren Bausteinen – den Quarks und Gluonen – bei bisher unerreichten Energien im TeV-Bereich untersucht. Sowohl der Beschleuniger als auch die vier Detektoren (ATLAS, CMS, LHCb und ALICE) werden in weltweiter Kooperation von Forschergruppen aus 34 Ländern entwickelt und gebaut. Mit einer geplanten Proton-Proton-Schwerpunktsenergie von 14 TeV wird der LHC für lange Zeit der weltweit leistungsfähigste Teilchenbeschleuniger sein und Bedingungen für Reaktionen erzeugen, die zu Zeiten von etwa 10^{-13} bis 10^{-14} s nach dem Urknall von Bedeutung waren. Die Protonkollisionsenergie von 14 TeV ist hoch genug, um elementare Reaktionen – also Reaktionen zwischen Quarks und Gluonen – im TeV-Bereich zu erzeugen. Der LHC kann alternativ mit schweren Ionen betrieben werden, wobei die pro Kollision frei werdende Energie 1150 TeV beträgt – 30-mal mehr als am Schwerionenbeschleuniger RHIC in Brookhaven (USA), der die derzeit höchste Energie für Schwerionenkollisionen liefert. Damit können experimentelle Bedingungen für Reaktionen erzeugt werden, wie sie

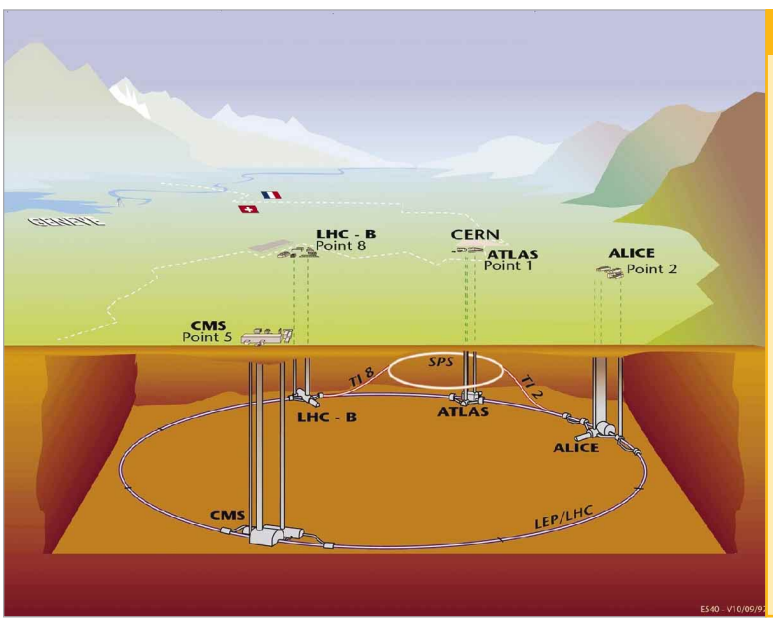


Abb. 3.10: Schematische Darstellung des LHC-Ringbeschleunigers und der vier Experimente am CERN. Der *Large Hadron Collider* LHC wird im Tunnel des Teilchenbeschleunigers LEP aufgebaut, der im Jahr 2001 abgebaut wurde. In vier unterirdischen Hallen stehen die Experimente ALICE, ATLAS, CMS und LHCb.

LHC – die wichtigsten Parameter

Umfang: 26,659 km

Magnete: supraleitend bei 1,9 K (Dipole und Quadrupole) bzw. 4,5 K

Magnetfeld: max. 9 T

Kollidierende Teilchen: Protonen und schwere Ionen

Schwerpunktsenergie: 14 TeV für Protonen, 1150 TeV für Schwerionen

max. Luminosität: 10^{34} cm^{-2} s^{-1}

Kollisionsrate: max. 40 Millionen pro Sekunde

Experimente:

- ALICE: Vielzweckdetektor, optimiert für Kollisionen von Schwerionen
- ATLAS: Vielzweckdetektor für Proton-Proton-Kollisionen
- CMS: Vielzweckdetektor für Proton-Proton-Kollisionen
- LHCb: Proton-Proton-Kollisionen, spezialisiert auf die Messung der Eigenschaften von Hadronen mit Bottom-Quarks

kurz vor dem so genannten QCD-Phasenübergang etwa 10^{-6} s nach dem Urknall existierten, bevor aus den ursprünglich vorhandenen freien Quarks und Gluonen Hadronen wurden.

Bautechnisch in demselben Beschleunigertunnel aufgebaut wie LEP, steht der LHC als Hadronbeschleuniger eher in historischer Linie mit den Proton-Antiproton-Collidern $Sp\bar{p}S$ bei CERN und Tevatron bei Fermilab. Es wird erwartet, dass das wissenschaftliche Potenzial von LHC an die mit der Entdeckung der schweren Kraftteilchen W und Z (am $Sp\bar{p}S$) und des Top-Quarks (am Tevatron) herausragenden Leistungen seiner Vorläufer anknüpfen wird. In dieser Hinsicht wird die Inbetriebnahme des LHC die Experimente am Tevatron im Jahr 2007 ablösen. Allgemein werden von den Experimenten am LHC fundamentale Entdeckungen erwartet, die das derzeitige Verständnis der Materie und ihrer Wechselwirkungen erweitern – allen voran die Entdeckung von Higgs-Teilchen und/oder von supersymmetrischen Teilchen.

3.2.1 Das wissenschaftliche Potenzial des LHC

Die hohen wissenschaftlichen Erwartungen an das LHC-Projekt beruhen auf der Tatsache, dass der am LHC zugängliche Energiebereich von etwa 100 GeV bis zu mehreren TeV einen Schlüsselbereich für die Teilchenphysik darstellt. Zum einen schließt er den Energiebereich ein, der für die Vereinigung von elektromagnetischer und schwacher Kraft zur elektroschwachen Kraft charakteristisch ist, zum anderen eröffnet er den Zugang zu möglichen neuen physikalischen Phänomenen jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik.

Der LHC wird es erlauben, alle im Standardmodell möglichen Massenwerte für das Higgs-Teilchen zu erforschen und den entsprechenden Parameterbereich verwandter Szenarien zu überdecken. Falls es in der Natur tatsächlich vorkommt, kann das Higgs-Boson den LHC-Experimenten nicht entrinnen. Wenn die elektroschwache Symmetriebrechung – also die Tatsache, dass sich die elektroschwache Kraft bei sinkender Energie des Universums in elektromagnetische und schwache Kraft aufgespalten hat – durch andere Mechanismen bewirkt wird, so müsste man Anzeichen dieser neuen Wechselwirkungen am LHC entdecken. Supersymmetrische Teilchen mit Massen von bis zu 3 TeV können am LHC erzeugt und nachgewiesen werden. Bisher ist kein überzeugendes Szenario aufgezeigt worden, bei dem die Signale der Supersymmetrie grundsätzlich außer Reichweite des LHC lägen. Viele weitere neue Phänomene sind denkbar, die am LHC gefunden werden können: Anzeichen für mögliche höhere Raumdimensionen; schwere, mit den W- oder Z-Teilchen verwandte Bosonen, die neuen Symmetrien entspringen, und vieles mehr. Zusätzlich verspricht das Experimentieren am LHC, die Messung von fundamentalen Parametern des Standardmodells zu verfeinern, insbesondere, was die Eigenschaften schwerer Teilchen wie der W-Bosonen und der Top-Quarks betrifft.

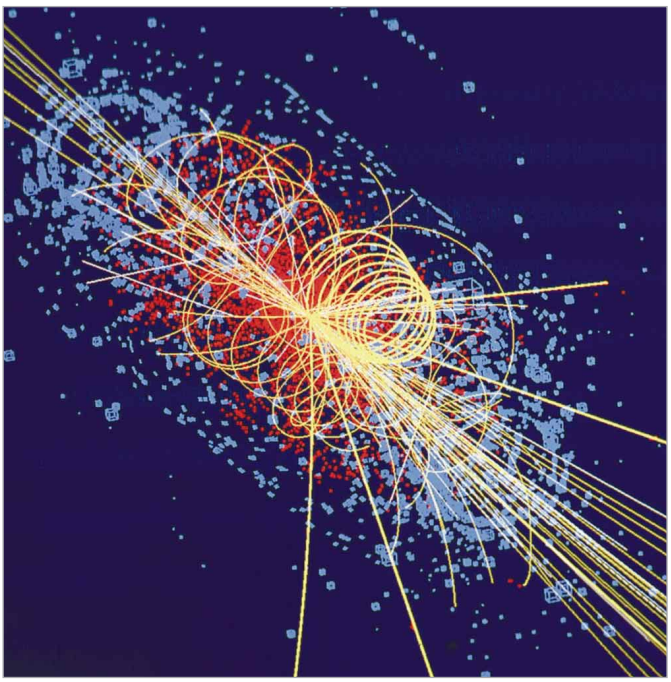


Abb. 3.11: Computersimulation eines Proton-Proton-Zusammenstoßes am Large Hadron Collider LHC. Die Protonenstrahlen kollidieren alle 25 ns miteinander und erzeugen dabei im Mittel 1600 geladene und ebenso viele neutrale Teilchen. Die Rekonstruktion dieser Ereignisse stellt eine große Herausforderung an die Experimente dar. In der abgebildeten Reaktion wird auch ein Higgs-Bosons produziert. Solche Ereignisse sind äußerst selten: In 10^8 Kollisionen wird höchstens ein Higgs-Boson erzeugt.

Das Forschungsprogramm mit B-Mesonen beruht auf der außerordentlich hohen Zahl von Paaren von Bottom-Quarks und Anti-Bottom-Quarks, die bei den Proton-Proton-Zusammenstößen im LHC produziert werden. Diese ist für die Untersuchung sehr seltener Reaktionen bzw. von Zerfällen z. B. mit CP-Verletzung von Bedeutung, an denen sich neue Phänomene erkennen lassen. Das Schwerionenprogramm des LHC schöpft seine Stärke aus der hohen Materiedichte, die bei der Kollision schwerer Ionen erzeugt werden kann.

3.2.2 Der LHC-Beschleuniger

Einer bei CERN fest verankerten Tradition folgend wird der LHC-Beschleuniger auf der existierenden Beschleuniger-Infrastruktur aufgebaut. Diese besteht aus dem 27 km langen ehemaligen LEP-Tunnel sowie den vorhandenen Injektoren und Vorbeschleunigern. Unter der Federführung des CERN mit seinen europäischen Mitgliedstaaten konnten viele Nicht-Mitgliedstaaten (unter anderem die USA, Kanada, Indien, Japan, Russland und Israel) für eine Beteiligung am Bau dieser komplizierten Maschine gewonnen werden.

Der LHC-Beschleuniger kann mit Protonen und Schwerionen betrieben werden, die zur Beschleunigung in zwei getrennten Vakuumröhren geführt und bei Erreichen der Endenergie im Zentrum der Detektoren zur Kollision gebracht werden. Zu den wichtigsten Komponenten des

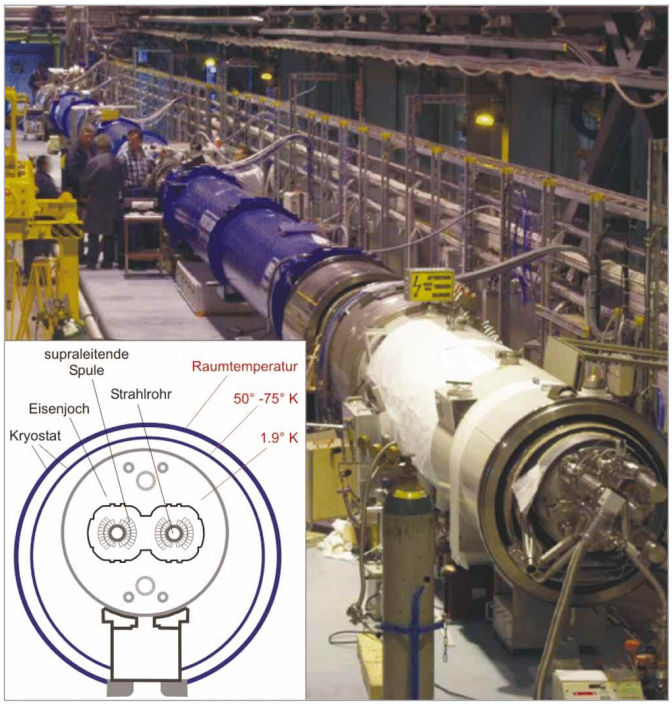


Abb. 3.12: Magnetentwicklung bei LHC: Der „String 2" genannte Aufbau entspricht einer vollen LHC-Zelle, was das Vakuum, die Kältetechnik, die Schutzeinrichtungen und die Stromversorgung betrifft. Ebenfalls gezeigt ist der Querschnitt durch einen LHC-Dipolmagneten.

Beschleunigers gehören die supraleitenden Magnete, welche die Teilchen auf ihrer Bahn halten. Eine technische Herausforderung ersten Ranges ist die einwandfreie Produktion von ca. 1300 solcher Dipolmagnete mit Feldstärken, wie sie noch nie zuvor in einem Beschleuniger erreicht wurden (9 Tesla). Die jeweils 15 m langen Dipolmagnete wurden speziell für LHC bei CERN entwickelt. Sie sind so konzipiert, dass sie beide Vakuumröhren beinhalten (Abb. 3.12) und in einem einzigen Kryostaten Platz finden. Die Dipol- und Quadrupolmagnete, die zur Fokussierung der Teilchenstrahlen notwendig sind, werden bei einer Temperatur von 1,9 K betrieben, der Rest des Beschleunigers bei 4,5 K. Auch die acht Beschleunigungsstrukturen, die für jeden Protonenstrahl ein Beschleunigungsfeld von 5 Megavolt pro Meter (MV/m) erzeugen, werden supraleitend gebaut. Die Supraleitungstechnologie findet somit im LHC eine Anwendung von bisher noch nie dagewesenem Maßstab.

Mit dem LHC können für die elementaren Bausteine der Protonen, die Quarks und Gluonen, Kollisionsenergien erreicht werden, die eine Größenordnung größer sind als die bei LEP oder Tevatron erreichbaren Energien. Damit die sehr seltenen, interessanten Wechselwirkungen der Quarks und Gluonen im Proton hinreichend häufig auftreten, muss die Luminosität des Beschleunigers proportional zum Quadrat der Energie erhöht werden. In der Vergangenheit erreichten Hochenergiebeschleuniger Luminositäten von typischerweise 10^{32} cm^{-2} s^{-1}. Die Luminosität des LHC wird 10^{34} cm^{-2} s^{-1} betragen, ein Wert, in dessen Nähe die bei niedriger Energie laufenden B-Mesonen-Fabriken (siehe Kap. 3.1.3) kürzlich zum ersten Mal vorgestoßen sind. Bei LHC erreicht man diese hohe Luminosität dadurch, dass die beiden Vakuumröhren mit 2808 Protonenpaketen gefüllt werden, wobei jedes Paket 10^{11} Protonen beinhaltet. Der daraus resultierende große Strahlstrom von 0,56 Ampere ist bei einem Beschleuniger mit empfindlichen supraleitenden Magneten, die bei niedrigsten Temperaturen betrieben werden, eine besondere Herausforderung. Die Protonenpakete werden für ungefähr zehn Stunden in der Anlage gespeichert, bis die Zahl der Wechselwirkungen durch Protonenverluste so weit abgesunken ist, dass ein Nachfüllen erforderlich ist. Technische Möglichkeiten, die Luminosität substantiell über 10^{34} cm^{-2} s^{-1} hinaus zu steigern, werden untersucht für den Fall, dass die Ergebnisse der LHC-Experimente einen solchen Ausbau physikalisch sinnvoll erscheinen lassen.

3.2.3 Die LHC-Experimente

Die interessanten Kollisionen sind etwa 10^8-mal seltener als die als Untergrund betrachteten Standardereignisse bekannten physikalischen Ursprungs. Deshalb lässt man die Protonenstrahlen beim LHC besonders häufig zusammenstoßen: In einem zeitlichen Abstand von nur 25 ns kollidieren die Protonenstrahlen mit einer Energie von jeweils 7 TeV miteinander. Dabei finden im Mittel etwa 25 Proton-Proton-Wechselwirkungen gleichzeitig statt, mit ca. 1600 den Detektor durchquerenden geladenen und ebenso vielen neutralen Teilchen. Pro Sekunde muss der Detektor also gut 10^{11} Teilchen mit Datenraten in der Größenordnung von Terabyte pro Sekunde verarbeiten. Zusammen mit der zusätzlich damit verbundenen Materialschädigung durch Strahlung stellt diese extrem hohe Datenrate enorme Anforderungen an die Detektorentwicklung. Die Strahlungsdosis, welche die Detektoren in der Nähe der Wechselwirkungszone in zehn Jahren verkraften müssen, beträgt 10^{15} Teilchen/cm^2 oder 600 kGy. Zum Vergleich: Dies ist zwei Milliarden Mal mehr als die bei einer Röntgenaufnahme der Lunge absorbierte Strahlendosis.

Diese extremen Verhältnisse stellen hohe Anforderungen an die Experimentierkunst. Neue Konzepte zu Nachweis und Identifikation von Teilchen und Strahlung, neue Ideen zur Elektronik und Mechanik sowie innovatives Computing wurden für den Aufbau der Experimente bei LHC in Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt. Viele dieser Ideen führten zu interessanten „spin-off"-Entwicklungen in andere Bereiche der Wissenschaft und der Medizin (siehe Kap. 5).

Die Analyse der aufgezeichneten Kollisionen erfolgt durch ein internationales Netz verteilter Computer. Um der großen Datenflut zu begegnen, wurde dazu zusammen mit der Europäischen Union das „DataGrid"-Projekt ins Leben gerufen (siehe Kap. 5.2.2).

Die Konstruktion der LHC-Detektoren ist weit fortgeschritten. Für die beiden größten Experimente, ATLAS und CMS, werden neue große Untergrundhallen errichtet.

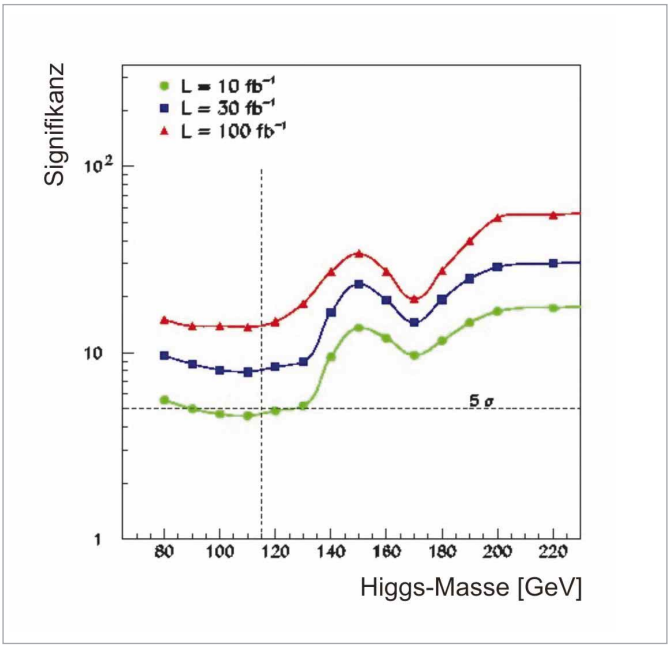
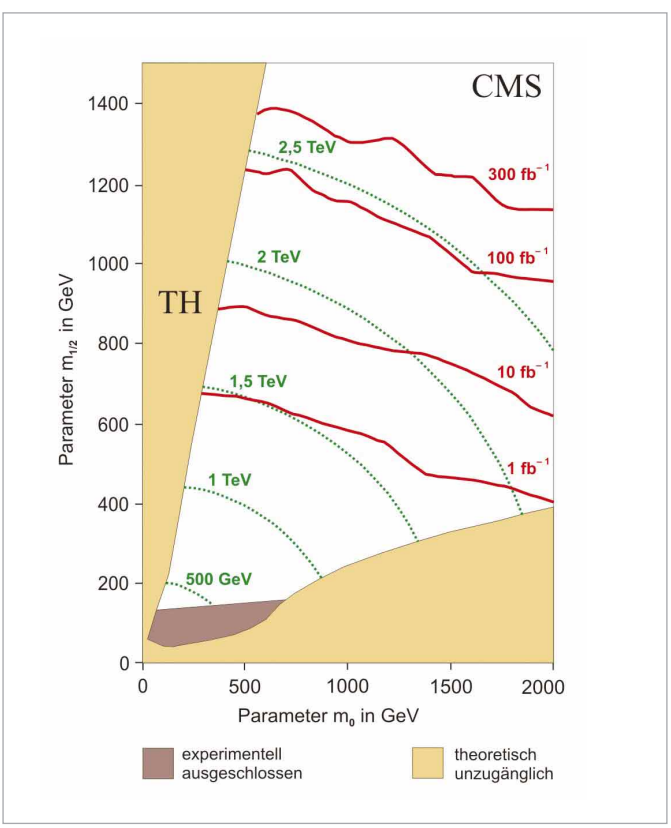


Abb. 3.13: Die Experimente müssen sicherstellen, dass sie die Produktion des gesuchten Higgs-Bosons bis zu einer Masse von 1 TeV auf jeden Fall nachweisen können. Wie die Abbildung zeigt, ist die statistische Signifikanz der Experimente für das Auffinden des Higgs-Bosons bei allen angenommenen Massen größer als 5 σ (1 σ = eine Standardabweichung). Dies entspricht einer Wahrscheinlichkeit von etwa 99,9999 %.

Abb. 3.14: Auch was supersymmetrische Erweiterungen des Standardmodells betrifft, müssen die Experimente eine große Empfindlichkeit für neue Phänomene vorweisen. Die Abbildung zeigt, dass die LHC-Experimente auf diesem Gebiet (hier für so genannte *Minimal Supergravity*-Modelle) gut gewappnet sind.



ALICE und LHCb können dagegen existierende Experimentierhallen benutzen. Die insgesamt mehr als 5000 Wissenschaftler aus 46 Nationen, die an den LHC-Experimenten beteiligt sind, machen das LHC-Projekt zur größten gemeinschaftlichen Anstrengung der Physik in der Grundlagenforschung.

Aufbauend auf dem Standardmodell der Teilchenphysik wurde das Entdeckungspotenzial der LHC-Experimente im Detail studiert – insbesondere im Hinblick auf neue Phänomene und auf Erweiterungen der Standardtheorie. Die Detektoren müssen für verschiedene wichtige Fragestellungen optimale Nachweisbedingungen schaffen. Sie sind auf den genauen Nachweis von Elektronen, Myonen und hochenergetischen Photonen optimiert, auf „Jets" von Quarks und Gluonen sowie auf fehlende transversale Energie, die eine indirekte Messung der direkt nicht nachweisbaren Neutrinos erlaubt. Anhand von hochauflösenden Vertexdetektoren, die direkt um den Wechselwirkungspunkt herum angeordnet sind, lassen sich längerlebige Teilchen erkennen. Dadurch wird es möglich, schwere Quarks – wie insbesondere Bottom-Quarks – zu identifizieren, die ein Indiz sowohl für viele Reaktionen der supersymmetrischen Theorie und als auch für Higgs-Zerfälle darstellen. Bei der Planung und Entwicklung der LHC-Experimente wurde insbesondere sichergestellt, dass das Higgs-Boson auf jeden Fall gefunden werden kann, falls es eine Masse zwischen 100 GeV und 1 TeV besitzt.

Die beiden Großdetektoren ATLAS und CMS sind die komplexesten Nachweisgeräte, die je gebaut wurden. Sie sind in der Lage, die Frage nach dem Higgs-Boson zu klären und die von Theorien jenseits des Standardmodells erwarteten neuen Phänomene zu entdecken. Bei der Planung wählte man zwei Detektorkonzepte, die ähnlich genug sind, damit eine gegenseitige Überprüfung der wissenschaftlichen Resultate garantiert ist. Andererseits unterscheiden sich ATLAS und CMS in ihren Nachweisstrategien. ATLAS besitzt zur Bestimmung der Impulse geladener Teilchen einen inneren supraleitenden Solenoidmagneten mit einer Feldstärke von 2 Tesla und im Außenraum einen großen Toroidmagneten ohne Eisenkern, um Myonen sehr genau messen zu können. Die Spuren der Teilchen lassen sich bei derart hohen Teilchenraten nicht mehr mit konventionellen, gasgefüllten Spurkammern verfolgen. Stattdessen werden hochauflösende Halbleiterstreifen- und -pixeldetektoren sowie Übergangsstrahlungs-Spurdetektoren eingesetzt. Ein Kalorimeter für elektromagnetisch und hadronisch wechselwirkende Teilchen, ein in Ort und Energie hochauflösendes Flüssig-Argon-Kalorimeter und ein Eisen-Szintillator-Kalorimeter sowie präzise, großflächige Driftkammern für den Myonnachweis vervollständigen den ATLAS-Detektor.

Die Besonderheit des CMS-Experiments ist ein Kalorimeter aus Blei-Wolframat-Kristallen, die eine ausgezeichnete Auflösung für hochenergetische Photonen (z. B. aus Higgs-Zerfällen) besitzen. Die Spuren der Teilchen werden ebenfalls mit Hilfe eines sehr großen Halbleiterspurdetek-

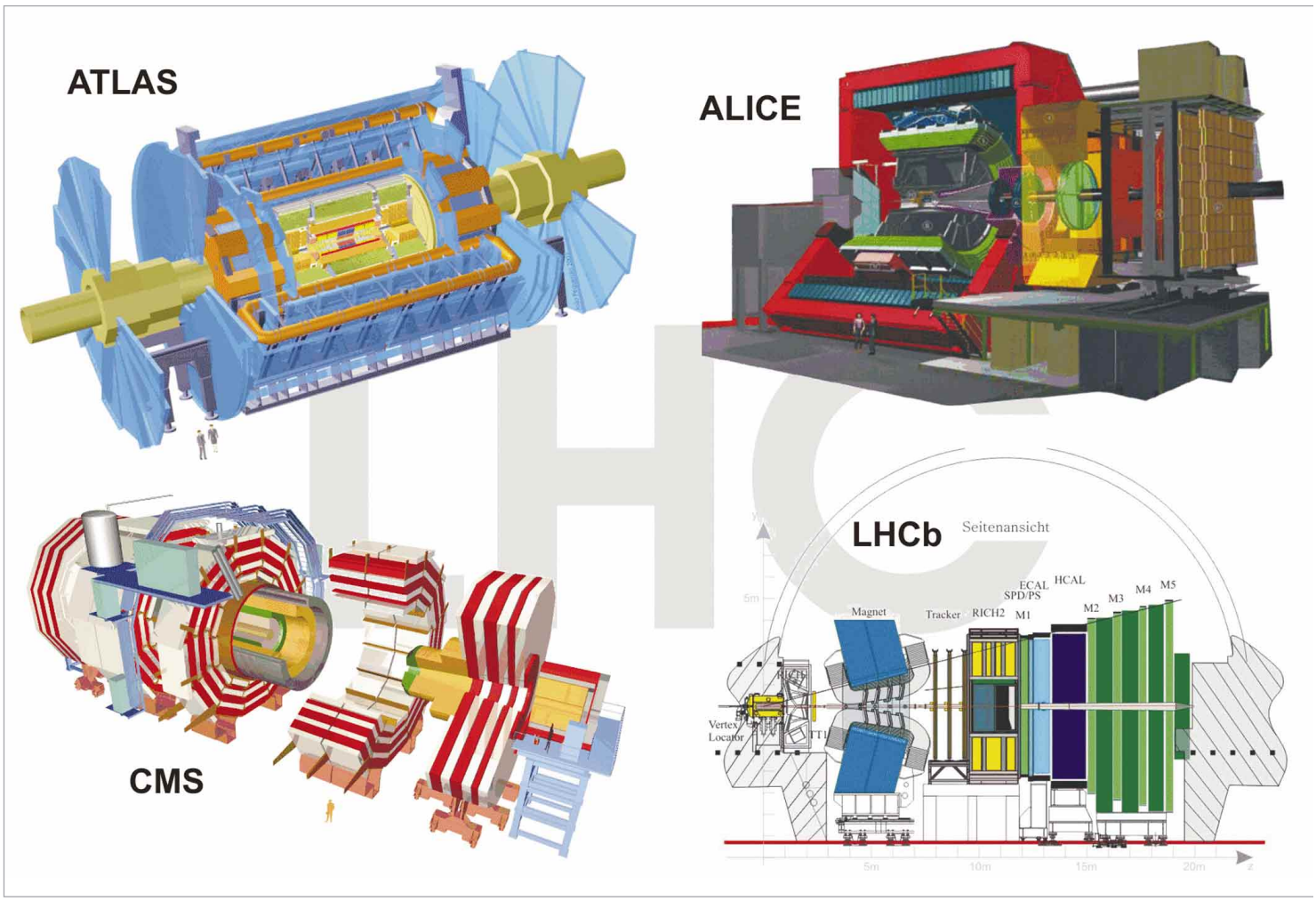


Abb. 3.15: Bei LHC sind zunächst vier Experimente vorgesehen. Die Abbildung zeigt Aufrisszeichnungen von ATLAS, CMS, LHCb und ALICE. Die eingezeichneten menschlichen Figuren deuten die Größenverhältnisse an.

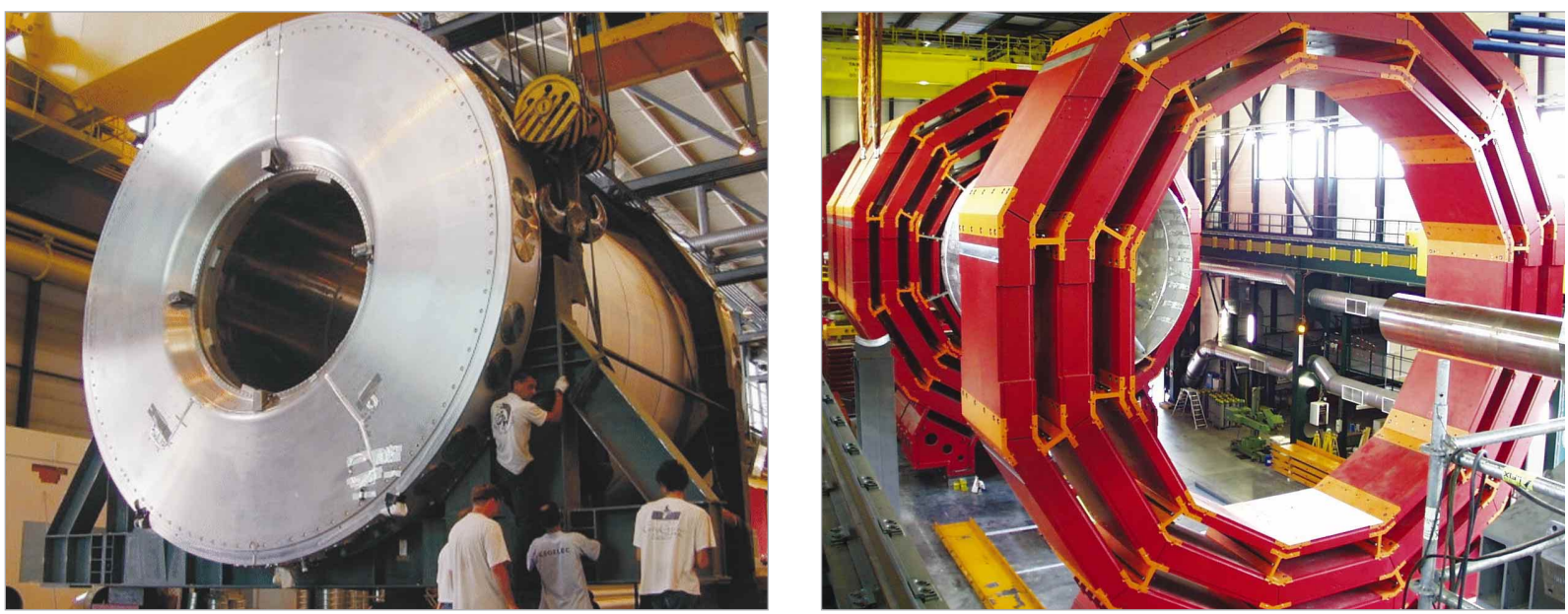


Abb. 3.16: Im linken Bild ist der Kryostat für das Flüssig-Argon-Kalorimeter des ATLAS-Detektors zu sehen, im rechten Bild die Eisenstrukturen des Magneten für das CMS-Experiment.

tors in einem Solenoidmagneten von 4 Tesla nachgewiesen. Zum Bau dieses Spurdetektors wurden spezielle Automaten entwickelt, um die fast 200 m² große Gesamtfläche von Silizium-Mikrostreifendetektoren fertigen zu können. Das aus Driftröhren bestehende Myonsystem sorgt für den Nachweis von Myonen mit genauer Positions- und Winkelauflösung.

LHCb ist ein Experiment, das auf die Erforschung der CP-Verletzung im System der B-Mesonen spezialisiert ist und an die bei den B-Mesonen-Fabriken KEK-B und PEP-II erwarteten Erkenntnisse anknüpft. Wichtige Fragestellungen auf diesem Gebiet zu erforschen, ist nur mit den sehr hohen Ereigniszahlen möglich, wie sie bei LHC erzeugt werden (10^{12} Paare von B-Mesonen und Anti-B-Mesonen pro Jahr). Dazu gehören z. B. Präzisionsmessungen von CP-Asymmetrien und Prozessen, welche die „Flavour" – die Teilchensorte – von Quarks und Leptonen verändern. Das LHCb-Experiment überdeckt insbesondere die Winkelbereiche nahe der Strahlachse. Optimiert wird es durch Spurdetektoren auf Halbleiterbasis und Ring-Cherenkovdetektoren zur Teilchenidentifikation. Eine besondere Herausforderung stellen die hohe Wechselwirkungsrate und das Verhältnis von Untergrund und Signal von 1000 zu 1 dar, weshalb die Rekonstruktion der Ereignisse bei LHCb bereits „online" erfolgen muss.

Tabelle 3.5: Beteiligung der deutschen Gruppen an den LHC-Experimenten (Stand 2002)

Experiment	Institute	
ATLAS	U Bonn	Pixeldetektor
	U Dortmund	Pixeldetektor
	U Freiburg	Myonkammern, Silizium-Tracker
	U Heidelberg	Trigger
	U Mainz	Kalorimeter, Trigger
	U Mannheim	Trigger
	LMU München	Myonkammern
	MPI München	Kalorimeter, Myonkammern, Silizium-Tracker
	U Siegen	Pixeldetektor
	U Wuppertal	Pixeldetektor
CMS	RWTH Aachen	Myonkammern, Silizium-Tracker
	U Karlsruhe	Silizium-Tracker
LHCb	U Dresden	Gas-Tracker
	U Heidelberg	Silizium- und Gas-Tracker, Trigger
	MPI Heidelberg	Silizium-Tracker
ALICE	TU Darmstadt	
	GSI Darmstadt	
	U Frankfurt	
	U Heidelberg	
	U Münster	

ALICE schließlich ist ein Experiment zur Untersuchung von Schwerionenreaktionen, d. h. von Materiewechselwirkungen bei extremen Energiedichten – 100-mal größer als in normaler Materie in Atomkernen. Bei diesen hohen Dichten wird ein neuer Materiezustand, das Quark-Gluon-Plasma, erwartet. Darunter versteht man die Koexistenz von Quarks und Gluonen ohne Bildung von Hadronen. Die Existenz dieses Plasmas und seine Eigenschaften sind Kernfragen der Quantenchromodynamik, sowohl für das Verständnis des *Confinements* (siehe Kap. 2.1.1), dem Übergang von der hadronischen in die Quark-Gluon-Phase, als auch bezüglich der Wiederherstellung der „chiralen Symmetrie" – einer Symmetrie zwischen links- und rechtshändigen Teilchen. Im frühen Universum wurde ein solcher Plasmazustand der Materie etwa eine Mikrosekunde nach dem Urknall erreicht. Mit dem ALICE-Detektor wird man die Anzeichen für solch einen Zustand beobachten können. ALICE kann sowohl Elektronen, Myonen und Photonen als auch die Energieflüsse von Hadronen nachweisen.

Deutsche Gruppen haben sich von Anfang an mit großem Einsatz an Entwicklung und Aufbau der LHC-Experimente beteiligt. Derzeit arbeiten dort Gruppen aus 15 Universitäten, zwei Max-Planck-Instituten und der GSI in Darmstadt mit. Die Herausforderungen im Detektorbau und die Aussicht auf aufregende Entdeckungen in einem neuen Energiebereich faszinieren Wissenschaftler und Studierende gleichermaßen.

3.3 Der Elektron-Positron-Linearcollider TESLA

Die Teilchenphysiker stimmen weltweit darin überein, dass ein Elektron-Positron-Linearcollider (LC) mit einer Schwerpunktsenergie im Bereich von 500 bis 1000 GeV als nächster großer Beschleuniger höchste Priorität hat. Dies ist das Ergebnis von Studien, die vom *European Committee for Future Accelerators* (ECFA), dem *High Energy Physics Advisory Panel* (HEPAP) der USA und dem entsprechenden Komitee der asiatischen Länder (ACFA) durchgeführt wurden. Mit dieser Einschätzung stimmt auch die *Consultative Group on High Energy Physics* des OECD *Global Science Forum* überein. Ziel der Studien war es, die Strategie der nächsten 20 Jahre festzulegen und Entdeckungspotenzial, Realisierbarkeit und Aufwand zukünftiger Hochenergiebeschleuniger auszuloten. Alle Studien heben die hohe wissenschaftliche Bedeutung des LC hervor und seine Komplementarität zu den Hadronbeschleunigern Tevatron und LHC.

Ein Linearcollider ermöglicht einmalige und entscheidende Einsichten in Aufbau und Gesetzmäßigkeiten des Mikrokosmos. Beim LC sind die Stoßpartner Elektron und Positron, also elementare Bausteine der Materie im Gegensatz etwa zu Protonen. Deshalb steht beim LC die gesamte Kollisionsenergie für elementare Prozesse zur Verfügung. Der LC dient der Erforschung der fundamentalen Kräfte, der fundamentalen Bausteine der Materie und ihrer Verbindung zur Kosmologie. Die Ergebnisse der Teilchenphysik der letzten zehn Jahre weisen alle auf neue physikalische Phänomene in dem Energiebereich hin, der mit einem LC zugänglich wird (siehe Kap. 2).

Umfangreiche Untersuchungen sowie die Erfahrung mit LEP und Tevatron zeigen, wie gut sich LC und LHC ergänzen. Sie ermöglichen unterschiedliche Erkenntnisse und die Kombination ihrer Ergebnisse erlaubt eine ent-

scheidende Vertiefung unserer heutigen Kenntnis des Mikrokosmos. Der LHC wird voraussichtlich erste Hinweise auf neue Aspekte der Teilchenphysik liefern, deren vollständige Interpretation im Rahmen einer weiterführenden Theorie aber präzise Messungen am LC erfordern. Am LHC wird vermutlich das Higgs-Boson entdeckt werden. Die genaue Bestimmung seiner Eigenschaften wie Spin, Parität, Kopplungsstärke an Materie- und Kraftteilchen sowie spezifische Fragen zu dem dahinter liegenden physikalischen Prinzip (Dynamik der Symmetriebrechung, Higgs-Mechanismus) erfordern jedoch einen Linearcollider. Was immer darüber hinaus zu entdecken sein wird, neue fundamentale Teilchen, neue Wechselwirkungen und/oder zusätzliche Raumdimensionen, die wissenschaftlichen Perspektiven für einen LC sind ausgezeichnet.

Im Linearcollider werden intensive Strahlen von Elektronen und Positronen auf 250 bis 500 GeV beschleunigt, auf Querschnitte von wenigen Nanometern Durchmesser gebündelt und unter präzise kontrollierten Bedingungen zur Kollision gebracht. Die technischen Anforderungen an einen solchen Linearbeschleuniger sind sehr groß: Die Schwerpunktsenergie soll 500 bis 1000 GeV betragen, fünf- bis zehnmal höher als die des ersten und einzigen bisher gebauten Linearcolliders, des SLC bei SLAC (Stanford), und bis zu fünfmal höher als die des LEP-Speicherrings bei CERN. Die Luminosität soll 1000-mal höher sein als bei LEP und 10 000-mal höher als beim SLC.

Seit mehr als einem Jahrzehnt werden technologische Entwicklungsarbeiten für einen LC in Europa (TESLA, CLIC), in den USA (NLC) und in Japan (JLC) durchgeführt. Die Projekte unterscheiden sich im Wesentlichen in der Wahl der Technologie: Während das TESLA-Projekt auf supraleitende Beschleunigungsstrecken setzt, beruhen CLIC (siehe Kap. 3.4.1), NLC und JLC auf normal leitenden Beschleunigungsresonatoren. Im Fall von TESLA haben die Entwicklungsarbeiten 2001 zu einem konkreten technischen Designvorschlag geführt. Auch die Studien für die Beschleuniger mit normalleitender Technologie haben durch intensive Anstrengungen in den letzten Jahren signifikante Fortschritte erzielt.

Die Empfehlungen der Teilchenphysiker in Asien, Europa und Nordamerika, als nächstes Projekt einen Linearcollider in internationaler Zusammenarbeit zu bauen, enthält auch klare Aussagen über den Zeitplan für seine Realisierung: In einem ersten Schritt sollte ein Collider mit einer Schwerpunktsenergie von 500 GeV gebaut werden, der später auf Energien bis zu 1000 GeV, d. h. 1 TeV, ausgebaut werden kann. Der Collider sollte zeitlich so realisiert werden, dass sein Betrieb mit dem von LHC überlappt, da sich die Ergebnisse beider Anlagen und ihre Interpretation ergänzen werden. Das HEPAP-Komitee der USA empfiehlt, mit dem Bau möglichst 2005 zu beginnen und rechnet mit einer Bauzeit von acht Jahren.

3.3.1 Das wissenschaftliche Potenzial des Linearcolliders

Das Physikprogramm eines Elektron-Positron-Linearcolliders mit Energien, die von der Masse des Z-Bosons bei 91 GeV bis in den TeV-Bereich reichen, ist in weiten Teilen komplementär zu dem des LHC. Beide Anlagen sind notwendig, um die Physik bei der TeV-Energieskala zu erforschen, neue Phänomene zu entdecken und durch präzise Bestimmung ihrer Eigenschaften eine Einordnung in das Gebäude der Physik vornehmen zu können.

Die entscheidende Eigenschaft des Linearcolliders ist die hohe Präzision, mit der die Experimente an einer solchen Anlage ausgeführt werden können. Dank dieser Genauigkeit können die LC-Experimente über die Analyse von Quantenfluktuationen indirekt in Energiebereiche nahe der Großen Vereinigungsskala (10^{16} GeV) oder gar der Planck-Skala (10^{19} GeV) vorstoßen, die direkten Experimentiermethoden nur in einzelnen isolierten Problemstellungen wie dem Protonzerfall zugänglich sind. Ein hervor-

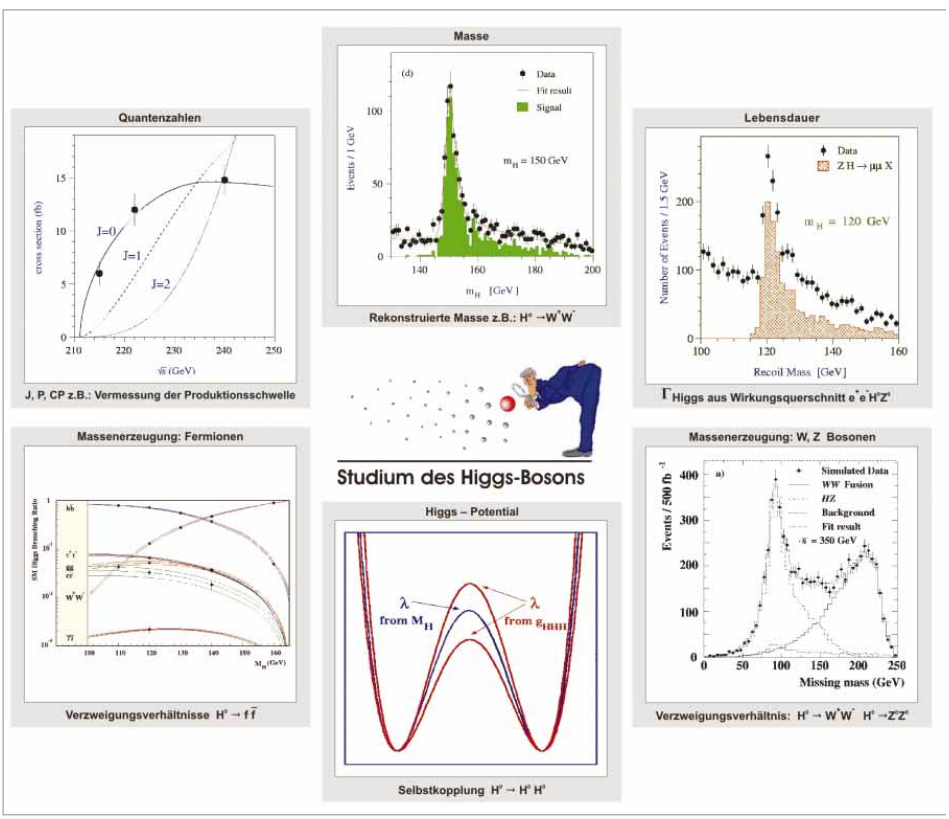


Abb. 3.17: Der Steckbrief des Higgs-Bosons. Mit dem Linearcollider wird es möglich sein, das Higgs-Boson und den Mechanismus, der die Massen der fundamentalen Teilchen erzeugt, im Detail zu erforschen. Die Abbildung verdeutlicht die mit dem Linearcollider erzielbaren Genauigkeiten bei der Bestimmung von Masse, Quantenzahlen, Lebensdauer, der Stärke der Higgs-Kopplung an andere Teilchen und von Parametern, welche die Form des Higgs-Potenzials bestimmen.

ragendes Beispiel für ein derartiges Vorgehen stellt die Messung der Kopplungsstärken der Wechselwirkungen und ihrer Energieabhängigkeit dar. Diese bilden die beste Stütze sowohl dafür, dass sich die fundamentalen Wechselwirkungen des Standardmodells in einem Energiebereich von 10^{15} bis 10^{16} GeV zu einer einzigen Kraft vereinigen, als auch für die Hypothese der Supersymmetrie.

Durch die sehr präzisen Experimente bei LEP, SLC und Tevatron wird im Rahmen der Standardtheorie bereits jetzt ein „leichtes" Higgs-Teilchen unterhalb von 200 GeV vorhergesagt. Wenn die Masse des Higgs-Teilchens in dem erwarteten Bereich liegt, dann stellt ein Linearcollider eine wahre „Higgs-Fabrik" dar. Wegen der großen Zahl von Higgs-Bosonen, die am LC unter sehr „sauberen" Experimentierbedingungen erzeugt werden, gelingt es, das Profil dieses wichtigen Teilchens mit hoher Genauigkeit zu bestimmen, wie etwa seine Kopplungen an Bosonen und an die verschiedenen Quark- und Leptontypen. Mit deren Hilfe kann der Higgs-Mechanismus, d. h. die Erzeugung der Massen von Materie- und Kraftteilchen, überprüft werden. Auch die Selbstkopplung des Higgs-Teilchens, durch die das Higgs-Feld im Universum erzeugt wird und die somit für die Realisierung des Higgs-Mechanismus in der Natur von großer Bedeutung ist, lässt sich am LC ermitteln.

Das Vereinigungsprinzip der Supersymmetrie ordnet jedem bekannten Elementarteilchen einen supersymmetrischen Partner zu. Konkrete Hinweise dafür werden bereits unterhalb von TeV-Energien erwartet. Weiterhin gibt es begründete Vermutungen, dass die „dunkle Materie" aus supersymmetrischen Partnerteilchen bestehen könnte.

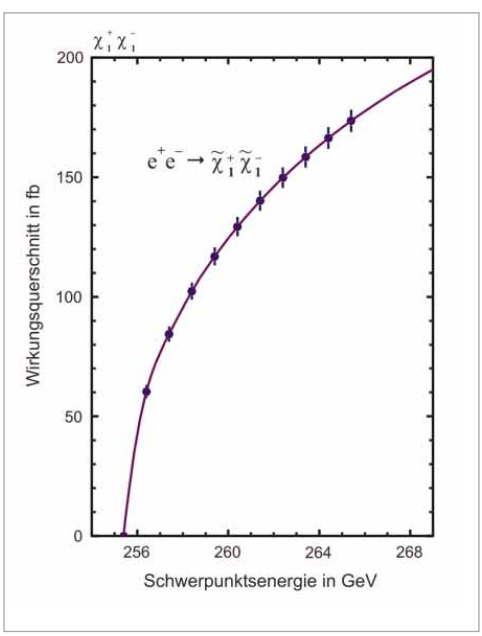


Abb. 3.18: Ein Elektron-Positron-Linearcollider kann paarweise neue Teilchen erzeugen. Das Bild zeigt die Erzeugungsrate supersymmetrischer Teilchen (so genannter Charginos) mit einer angenommenen Masse von 127,7 GeV in Abhängigkeit von der Schwerpunktsenergie des Beschleunigers, die präzise auf verschiedene Werte eingestellt wird.

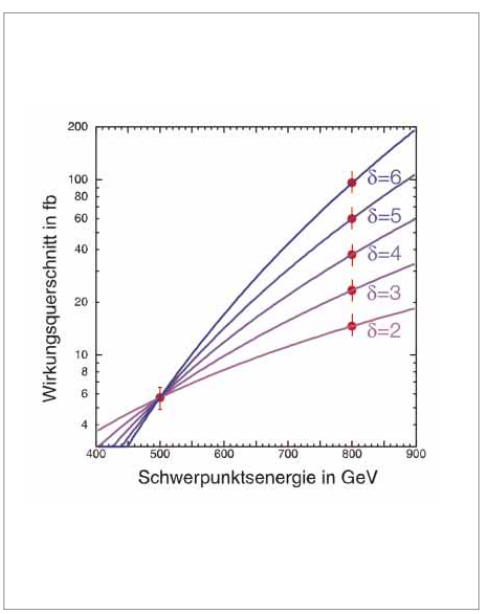


Abb. 3.19: Am Linearcollider kann die Anzahl der zusätzlichen Raumdimensionen (δ) in Ereignissen gemessen werden, bei denen Teilchen in die Extradimensionen verschwinden. Die dargestellte Simulationsrechnung verwendet als Annahme eine integrierte Luminosität von 500 (1000) fb^{-1} bei Schwerpunktsenergien von 500 (800) GeV mit Strahlpolarisation.

Falls die Natur tatsächlich supersymmetrisch ist, wird man mit LHC und Linearcollider eine ganze Reihe dieser neuen „Superteilchen" entdecken und versuchen, ihre Rolle zu verstehen. Genaue Messungen an einem LC werden es ermöglichen, zu untersuchen, ob die von der Theorie vorhergesagten Eigenschaften dieser Teilchen – wie Spin und Kopplungsstärke – zutreffen. Die bei TESLA verfügbaren polarisierten Teilchenstrahlen, bei denen die Spins der Elektronen und Positronen alle ausgerichtet sind, sind dazu ein wichtiges Hilfsmittel.

Die hohe Messgenauigkeit des LC wird benötigt, um die Parameter einer solchen supersymmetrischen Theorie von der TeV-Skala zu Energien zu extrapolieren, bei denen die Vereinigung von starker und elektroschwacher Wechselwirkung erwartet wird (siehe Abb. 2.12). Insbesondere kann mit Hilfe der Präzisionsmessungen am LC geprüft werden, wie genau die drei Kopplungskonstanten bei hohen Energien am Vereinigungspunkt zusammentreffen. Auf diese Weise kann die Physik in der Nähe der Vereinigungsskala erforscht werden. Das Ergebnis der Messung hat wichtige Konsequenzen dafür, ob gewöhnliche Materie, wie Protonen und Atome, stabil ist oder nicht. Sie ist auch von außerordentlicher Bedeutung für unser Verständnis von der Entwicklung des Universums zu ganz frühen Zeiten.

Die Eigenschaften supersymmetrischer Teilchen lassen sich an einem Elektron-Positron-Linearcollider mit Genauigkeiten im Promillebereich messen. Dadurch wird es möglich, die fundamentalen Parameter der supersymmetrischen Theorie zu hohen Energien hin zu extrapolieren – was wiederum gestattet, den Brechungsmechanismus der Supersymmetrie zu ergründen und die Theorie bei Energien nahe der Planck-Skala zu rekonstruieren, bei der die Verbindung der Teilchenphysik mit der Gravitation zum Ausdruck kommen sollte. Damit bieten sich einzigartige Möglichkeiten, die erwartete Universalvereinigung aller Wechselwirkungen experimentell zu studieren.

Jüngste theoretische Ansätze zur Erklärung der Universalvereinigung aller Kräfte sagen über die bekannten vier Raumzeitdimensionen hinaus weitere, zusätzliche Raumdimensionen voraus. Diese bleiben uns normalerweise verborgen, da sie in sich geschlossen beziehungsweise „aufgerollt" sind. Teilchen, die sich in diesen Extradimensionen bewegen, können jedoch messbare Effekte im TeV-

Energiebereich hervorrufen. Am LHC könnten solche Extradimensionen entdeckt werden, am LC können ihre Struktur und Größe bestimmt werden. Sollten die Extradimensionen am LHC und LC nicht direkt zugänglich sein, so können dennoch indirekte Effekte der zusätzlichen Dimensionen, deren Ursprung bei noch höheren Energien als dem TeV-Bereich liegt, in Präzisionsmessungen aufgedeckt werden. Die Entdeckung neuer Raumzeitdimensionen wäre sicherlich ein epochales Ereignis in der Geschichte der Wissenschaft.

Präzisionsmessungen an neuen schweren W- und Z-artigen Kraftteilchen sind ein weiterer Bereich, in dem der Linearcollider zum LHC komplementär ist. Dies gilt für viele weitere Beispiele für physikalische Phänomene jenseits des Standardmodells.

Was die Teilchen des Standardmodells selbst und ihre Wechselwirkungen betrifft, so können die Messungen am Linearcollider Genauigkeiten erreichen, die diejenige bei LEP um das Zehnfache übertreffen, wenn der Collider im so genannten GigaZ-Modus betrieben wird, wenn also die Schwerpunktsenergie genau der Masse des Z-Bosons entspricht. Dabei werden eine Milliarde Z-Bosonen pro Jahr erzeugt. Ein Beispiel für Messungen, bei denen solch eine extreme Genauigkeit erreicht werden kann, ist der elektroschwache Mischungswinkel. Ferner kann, bei höheren Energien von etwa 350 GeV, die Strahlenergie so genau eingestellt werden, dass die Masse des Top-Quarks im Promillebereich gemessen werden kann – die höchste voraussehbare Genauigkeit im Bereich der Quarks.

Der parallele Betrieb von LHC und LC wird es erlauben, das Potenzial beider komplementärer Anlagen maximal auszuschöpfen. Auf diese Weise kann der für die Physik so wichtige Bereich zwischen der Masse des Z-Bosons und der TeV-Energieskala optimal untersucht werden.

3.3.2 Technologie und Realisierung eines Linearcolliders

Ein Linearcollider muss eine Schwerpunktsenergie von zunächst 500 GeV (erweiterbar auf etwa 1 TeV) erreichen, um die oben ausgeführten wissenschaftlichen Ziele am besten zu erreichen. Da die interessanten Prozesse nur mit äußerst geringen Raten auftreten, muss der LC eine integrierte Luminosität von 100 fb^{-1} pro Jahr erreichen, also Luminositäten von mehr als 10^{34} cm^{-2} s^{-1}. Um Teilchenspins und Wechselwirkungsstärken zu messen, müssen die Elektronenstrahlen polarisierbar sein.

Bis auf den Linearbeschleuniger SLC in Stanford wurden bisher alle Elektron-Positron-Collider als Speicherringe gebaut. Der größte war der Speicherring LEP bei CERN mit 27 km Umfang und einer Maximalenergie pro Strahl von 100 GeV. Das Konzept der Speicherringe lässt sich jedoch nicht auf Beschleuniger noch höherer Energie anwenden, da die Teilchen auf einer Kreisbahn Synchrotronstrahlung abstrahlen und damit Energie verlieren. Das Konzept des Linearcolliders umgeht dieses Problem: Hier werden Elektronen und Positronen aus zwei aufeinander gerichteten Linearbeschleunigern zur Kollision gebracht. Jeder der beiden Beschleuniger besteht aus einer großen Zahl von Hochfrequenzresonatoren, die hohe elektrische Beschleunigungsfelder erzeugen.

Die schwierigsten technischen Probleme, die es bei der Entwicklung eines Linearcolliders für hohe Energien zu lösen galt, waren die Erzeugung von hohen Beschleunigungsgradienten und der zuverlässige Betrieb derartiger Resonatoren sowie deren Herstellung zu möglichst niedrigen Kosten. Eine weitere große Herausforderung ist es, eine hohe Rate von Zusammenstößen (Luminosität) zu erzielen. Dazu müssen die Teilchenstrahlen eine hohe Strahlleistung aufweisen und am Ort der Kollision auf winzige Strahldurchmesser gebündelt werden.

Seit Ende der 1980er Jahre wurden verschiedene technologische Konzepte für die Realisierung eines Linearcolliders studiert, mit dem die Physik der TeV-Energieskala untersucht werden kann. DESY schlägt dazu das TESLA-Projekt vor, SLAC den NLC und KEK den JLC. Die NLC- und JLC-Konzepte sind einander sehr ähnlich. Zwischen den drei Entwicklungsrichtungen gibt es Zusammenarbeit auf verschiedenen technischen Gebieten. Schlussendlich soll ein einziges Konzept in internationaler Zusammenarbeit realisiert werden.

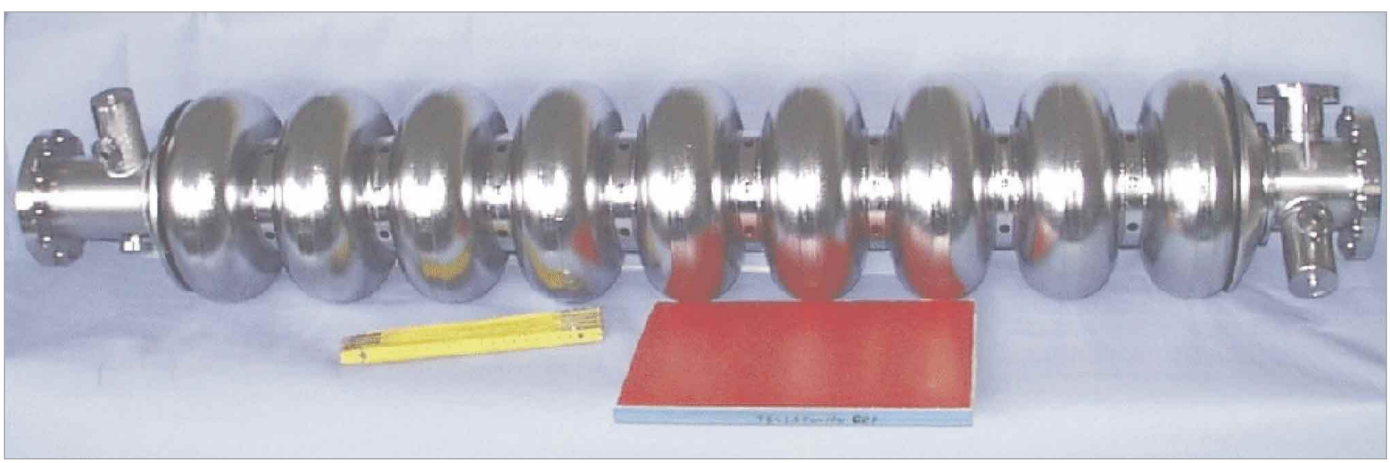


Abb. 3.20: Ein supraleitender Hohlraumresonator zur Beschleunigung der Elektronen und Positronen bei TESLA

TESLA

Das TESLA-Konzept verwendet supraleitende Beschleunigungsstrukturen. Diese sind besonders dazu geeignet, kleine Strahldimensionen und damit hohe Kollisionsraten zu erreichen. Der Vorteil der supraleitenden Technologie, zusammen mit der hohen Effektivität für die Umwandlung von elektrischer Energie in Teilchenenergie, ist seit langem bekannt, die Technologie wurde jedoch lange Zeit für zu teuer erachtet. Der internationalen TESLA-Kollaboration gelang es durch ein gezieltes Entwicklungsprogramm in Zusammenarbeit mit der Industrie, die Beschleunigungsleistung (den Feldgradienten) um das Fünffache zu steigern und gleichzeitig die Kosten um einen Faktor vier zu senken. Hiermit wurde die Grundlage für einen realistischen, supraleitenden Linearcollider geschaffen.

Der vorgeschlagene Beschleuniger ist 33 km lang und erstreckt sich vom DESY-Gelände ausgehend in nordwestliche Richtung nach Schleswig-Holstein hinein (Abb. 3.23). Die Elektronen- und Positronenstrahlen werden in der ersten Ausbaustufe auf 250 GeV beschleunigt und zur Kollision gebracht. Der Linearcollider erreicht damit eine Luminosität von 3×10^{34} cm^{-2} s^{-1}. Zur Aufzeichnung der Kollisionsereignisse ist ein Großdetektor vorgesehen mit der Möglichkeit, diesen später durch einen zweiten zu ergänzen.

Seit 1997 ist bei DESY eine Testanlage (*TESLA Test Facility* TTF) in Betrieb, an der die wesentlichen Komponenten für einen supraleitenden Linearcollider entwickelt und getestet wurden. Insbesondere konnten hier die supraleitenden Beschleunigungsstrukturen und die Klystrons zur Erzeugung der benötigten Hochfrequenzfelder erfolgreich erprobt werden. Die Beschleunigungsfeldstärken lagen bereits in der ersten Serienproduktion deutlich über dem für die Testanlage angestrebten Wert von 15 MV/m. Die für einen Betrieb von TESLA bei 500 GeV notwendigen Feldstärken von 23 MV/m werden derzeit (2002) bereits serienmäßig übertroffen. Es wurde gezeigt, dass durch eine spezielle Oberflächenbehandlung (Elektropolitur) noch höhere Feldstärken von 35 MV/m erzielt werden können, mit denen knapp 800 GeV bei derselben Beschleunigerlänge erreichbar sind. Die industrielle Fertigung von Beschleunigungsstrukturen mit 35 MV/m ist voraussichtlich bereits bei Baubeginn möglich. Der Linearcollider ist dann in Bezug auf Hochfrequenz und Kühlung auf einen optimalen Betrieb bei 500 GeV ausgelegt, es besteht jedoch die Möglichkeit, ihn mit niedrigerer Luminosität ohne zusätzliche Investitionen bei höheren Energien zu betreiben.

Der Prototyp des supraleitenden Linearbeschleunigers an der TESLA-Testanlage wurde bereits

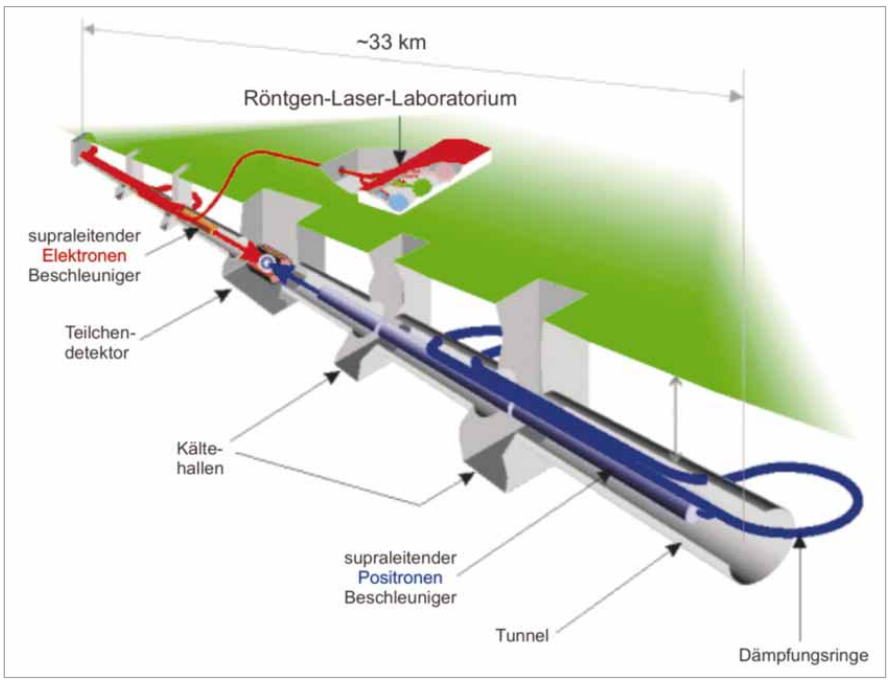


Abb. 3.21 Schematische Darstellung der TESLA-Anlage mit der unterirdischen Experimentierhalle und dem oberirdischen Röntgenlaser

Abb. 3.22: Aufbau eines supraleitenden Beschleunigungsmoduls für die TESLA-Testanlage im Reinraum. Im Vordergrund rechts ist ein Beschleunigungsresonator zu sehen.

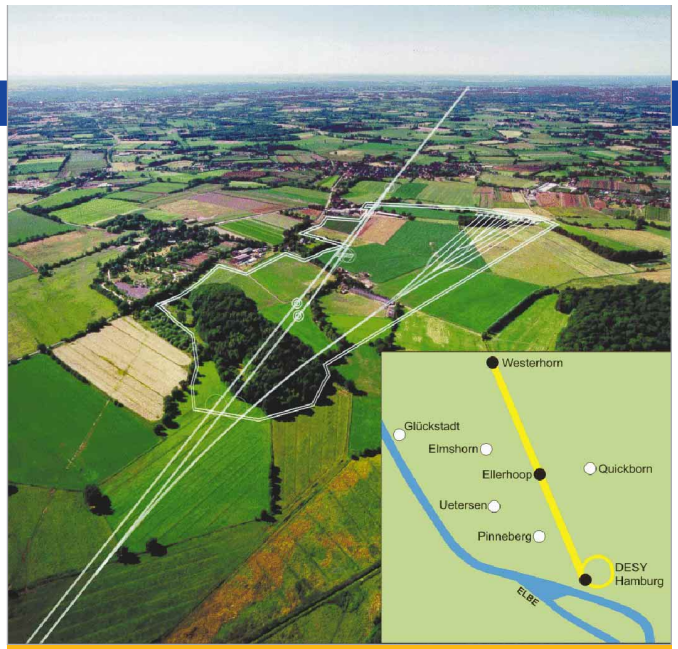


Abb. 3.23: Lageplan der TESLA-Anlage mit dem zentralen Experimentiergelände nordwestlich von Hamburg.
TESLA, der *TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator,* also supraleitender Linearbeschleuniger für Teraelektronenvolt-Energien, soll sich vom DESY-Gelände in Hamburg bis an die Nordgrenze des Kreises Pinneberg in Schleswig-Holstein erstrecken. In der Mitte der Strecke, in Ellerhoop, soll das Forschungsgelände mit Hallen für die Röntgenlaser- und Teilchenphysikexperimente liegen.

TESLA – die wichtigsten Parameter

Gesamtlänge der Anlage: 33 km, davon 2 mal 15 km Beschleunigungsstrecke
Innendurchmesser des Tunnels: ca. 5 m
Tiefe unter der Erde: 10 - 30 m (8 m unter Normalnull)
Größe des Forschungsgeländes in Ellerhoop: 54 Hektar (540 000 m^2)
Bauzeit: ca. 8 Jahre
Elektron-Positron-Kollisionsenergie: 500 GeV, ausbaubar auf 800 GeV
Kollisionspunkte/Teilchenphysikexperimente: zunächst 1, ausbaubar auf 2
Anzahl der 1 m langen supraleitenden Resonatoren: 21 024
Betriebstemperatur der Resonatoren: 2 K
Luminosität: 3,4 x 10^{34} cm^{-2} s^{-1}
Röntgenlaserhalle: 20 Messplätze, ausbaubar auf 30
Wellenlänge der Röntgenstrahlung: 1 nm bis 0,1 nm

mehr als 13 000 Stunden betrieben, wobei alle Komponenten des Beschleunigers erfolgreich im Langzeitbetrieb getestet wurden. Gleichzeitig lieferten die Erfahrungen mit der Testanlage zusammen mit Industriestudien die Grundlage für die Kostenermittlung für das TESLA-Projekt.

Auf diesen Ergebnissen beruht der *Technical Design Report,* ein technischer Projektvorschlag, der im März 2001 vorgestellt und den Regierungen von Bund und Ländern zur Begutachtung vorgelegt wurde. In ihm wird vorgeschlagen, TESLA als internationales Projekt in der Nähe von Hamburg zu bauen.

Die supraleitende Beschleunigertechnologie von TESLA ist gleichzeitig ideal dafür geeignet, einen Röntgenlaser zu bauen, der durch seine hohe Intensität, seine extrem kurzen Pulse von 100 Femtosekunden (fs), die durchstimmbare Wellenlänge bis hinunter zu 0,1 Nanometern (nm) und die Kohärenz der Strahlung völlig neue Möglichkeiten für die Forschung in der Physik, Chemie, Biologie, Medizin und den Materialwissenschaften eröffnet. Die TESLA-Anlage beinhaltet deshalb zusätzlich einen Freie-Elektronen-Laser (FEL) (siehe Kap. 5.3).

Projekte der Größe und Komplexität von TESLA können und sollten nur in internationaler Zusammenarbeit realisiert werden. Deshalb wurde TESLA von Anfang an im

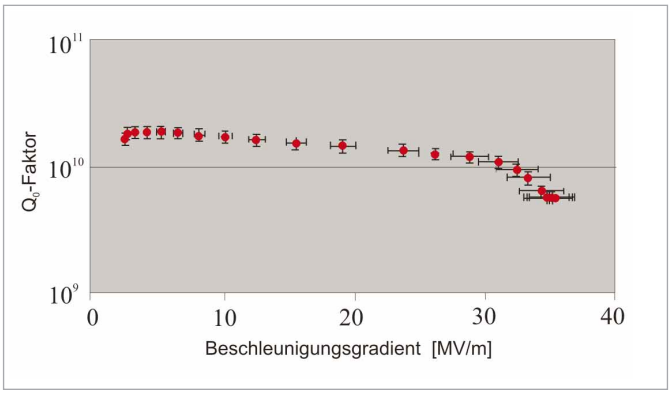


Abb. 3.24: Beschleunigungsgradient des ersten Prototyps eines Hohlraumresonators (Neunzeller), dessen Oberfläche mit dem bei KEK in Japan entwickelten Verfahren der Elektropolitur behandelt wurde. Damit lässt sich ein Gradient von 35 MV/m erreichen. Ein so hoher Wert erlaubt es, TESLA bei einer Schwerpunktsenergie von 800 GeV zu betreiben.

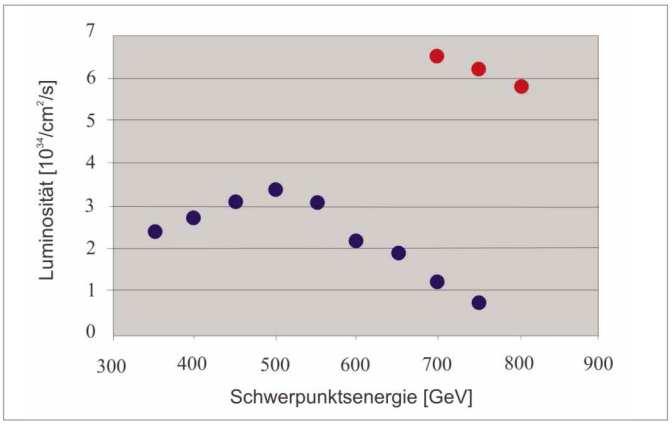


Abb. 3.25: Der TESLA-Beschleuniger kann mit etwas geringerer Datenrate auch bei höheren Energien betrieben werden (blaue Punkte). Um die Datenrate zu steigern (rote Punkte), müssen Hochfrequenz- und Kühlleistung erhöht werden.

Abb. 3.26: Blick entlang der TESLA-Testanlage. Im Vordergrund ist die Elektronenquelle zu sehen, im Hintergrund erkennt man die gelben Beschleunigungsmodule.

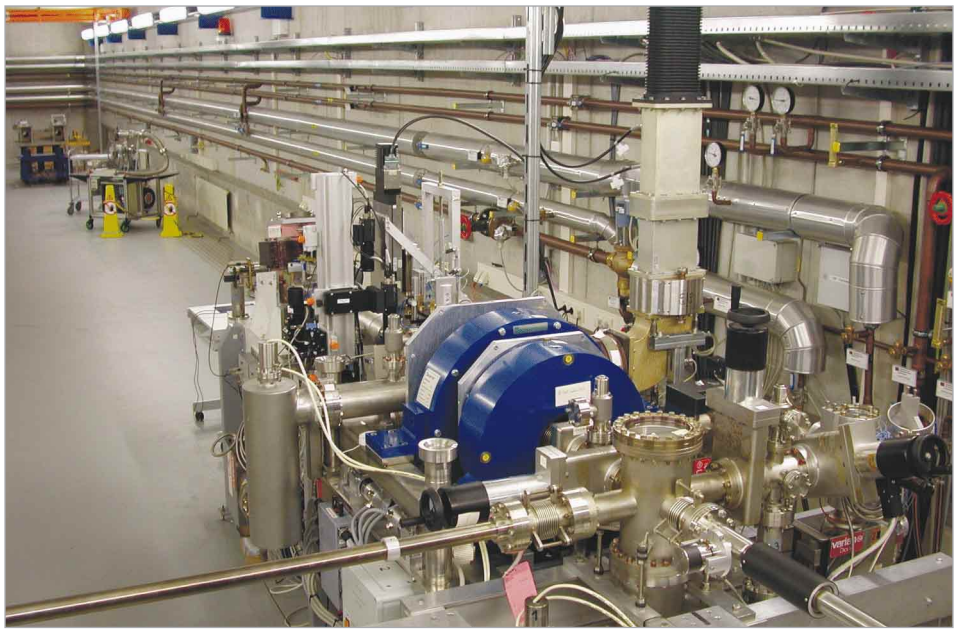


Abb. 3.27: Teststand für die Entwicklung der Elektronenquellen für TESLA (DESY Zeuthen). Im Innern der blauen Magnete werden Elektronen durch Laserbeschuss einer Photokathode freigesetzt und beschleunigt. In der anschließenden Diagnosesektion können die Eigenschaften der erzeugten Strahlpakete genau vermessen werden.

Rahmen einer internationalen Kollaboration entwickelt, die heute mehr als 45 Institute aus elf Ländern umfasst. Der Vorschlag ist, TESLA als internationales Projekt von begrenzter Dauer (zunächst 25 Jahre) zu bauen und zu betreiben. Dazu hat DESY das Konzept des *Global Accelerator Network* als Grundlage für weitere Diskussionen vorgeschlagen.

NLC und JLC

In den USA und in Japan werden, zum Teil in Zusammenarbeit, alternative Konzepte verfolgt, die auf normalleitenden Beschleunigungsstrukturen beruhen.

Die Entwicklung des *Next Linear Collider* NLC in den USA wird von SLAC angeführt, in Zusammenarbeit mit Fermilab und KEK. Fermilab ist gleichzeitig seit vielen Jahren auch ein Partner in der TESLA-Kollaboration. Das Forschungszentrum SLAC kann bei den Entwicklungsarbeiten auf Erfahrungen mit dem ersten jemals gebauten Linearcollider (SLC) aufbauen, der eine Energie von 90 GeV erreichte. Beim NLC strebt man zunächst Energien um 500 GeV bei Luminositäten von einigen 10^{34} cm^{-2} s^{-1} an, die in einer zweiten Stufe auf 1 TeV erhöht werden sollen. Die Gesamtlänge des Beschleunigers beträgt ca. 30 km. Fortschritte wurden in letzter Zeit insbesondere im Bereich der sehr hohen Beschleunigungsgradienten mit Feldstärken von über 50 MV/m erzielt. Die extreme Bündelung der Strahlen, die eine entscheidende Voraussetzung für die hohe Luminosität ist, konnte bei SLAC am *Final Focus Test Beam* demonstriert werden, wo Strahlquerschnitte im Bereich von 60 nm erzielt werden konnten.

Das in Japan bei KEK verfolgte Konzept für einen Linearcollider (*Japan Linear Collider* JLC) zielt auf eine Schwerpunktsenergie von 250 bis 500 GeV mit einer möglichen Erweiterung in den Energiebereich von 1 TeV. Die Entwicklung erfolgte in enger Zusammenarbeit mit SLAC. Dabei wurden bisher mehrere wichtige Meilensteine erreicht, wie z. B. ein Prototyp für einen Dämpfungsring, durch den Strahlen von sehr hoher Qualität erzeugt werden, oder der Bau von Hochleistungsklystrons in dem angestrebten Frequenzbereich. Das JLC-Projekt wird vom *Asian Committee for Future Accelerators* ACFA als eine mögliche internationale Einrichtung unterstützt. In Japan wird der JLC als das nächste Großprojekt der Hochenergiephysik angesehen, wenn auch ein formaler Vorschlag bisher nicht eingereicht wurde.

Das *International Committee for Future Accelerators* ICFA hat ein *Technical Review Committee* eingesetzt, um einen technischen Vergleich zwischen TESLA und den anderen Technologien CLIC, NLC und JLC durchzuführen. Zurzeit werden die verschiedenen Aspekte dieser Anlagen – wie Energie, technische Reife und Energiereichweite – untersucht, im Herbst 2002 soll eine Zusammenfassung veröffentlicht werden.

Abb. 3.28: Ein für die Linearcollider NLC und JLC entwickeltes Hochleistungsklystron. Es erzeugt die Hochfrequenzwelle, mit der die Elektronen beschleunigt werden. (Mit freundlicher Genehmigung des *Stanford Linear Accelerator Center,* SLAC)

3.3.3 Der Linearcollider als nächstes Großprojekt der Hochenergiephysik

Eine im Januar 2002 veröffentlichte Studie des amerikanischen Beratergremiums für Hochenergiephysik HEPAP zur Langzeitperspektive der Hochenergiephysik aus der Sicht der Vereinigten Staaten empfiehlt den Bau eines Linearcolliders mit höchster Priorität als internationales Projekt. Sie empfiehlt zudem eine Beteiligung an dem Bau des Linearcolliders, wo immer dieser in der Welt gebaut wird. Sie empfiehlt wegen der Bedeutung des Projekts ebenfalls, dass die Vereinigten Staaten einen Standort in ihrem Land anbieten sollten.

Angesichts des weltweiten Konsenses über die herausragende Bedeutung eines Elektron-Positron-Linearcolliders im Energiebereich von 500 bis 1000 GeV und der Führungsrolle, die DESY mit seinen internationalen Partnern bei der Entwicklung von TESLA gespielt hat, haben sich die deutschen Teilchenphysikerinnen und -physiker auf ihrem Jahrestreffen im Dezember 2000 mit überwältigender Mehrheit für einen Linearcollider als dem Projekt mit höchster Priorität ausgesprochen. Das TESLA-Projekt ist in technischer Hinsicht, in der Kostenanalyse und in der Planung sehr weit fortgeschritten und hat einen deutlichen Vorsprung vor den Projekten in Asien und den Vereinigten Staaten. Die Synergie, die durch die mit TESLA eng verbundene Entwicklung des Röntgenlasers entstanden ist, wird nachdrücklich begrüßt und sollte ausgebaut werden.

Im Juli 2002 hat der Wissenschaftsrat der Bundesregierung seine Stellungnahme zu neun Großgeräten der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung, darunter TESLA, und zur Weiterentwicklung der Investitionsplanung von Großgeräten vorgelegt. Darin unterstreicht der Wissenschaftsrat zunächst die allgemeine Bedeutung der Großgeräte und empfiehlt die beiden Aspekte von TESLA – den LC und den Röntgenlaser – als Großgeräte, die mit Auflagen förderungswürdig sind.

Im Wortlaut ist die Stellungnahme des Wissenschaftsrats zum TESLA-Linearcollider wie folgt:

„Die mit dem Linearcollider TESLA zu bearbeitenden wissenschaftlichen Fragestellungen lassen nach Auffassung des Wissenschaftsrates einen besonders hohen Wissensgewinn in fundamentalen Fragestellungen des Mikro- und Makrokosmos erwarten. Die generelle Machbarkeit der supraleitenden Beschleunigertechnologie wurde durch den bei DESY installierten Testbeschleuniger (TTF) überzeugend bewiesen.

Der Wissenschaftsrat bittet den Bund, nach Vorlage des hinsichtlich der internationalen Finanzierung und der internationalen Kooperation konkretisierten Projektvorschlags möglichst bald die verbindliche Zusage einer deutschen Beteiligung zu erbringen.“

Die deutschen Teilchenphysikerinnen und -physiker haben mit großem Interesse die Stellungnahme des Wissenschaftsrats zu TESLA zur Kenntnis genommen und warten nun auf dessen Empfehlungen, die im nächsten halben Jahr erwartet werden, sowie auf die darauf aufbauenden politischen Beschlüsse im Jahr 2003. Mit einer positiven Entscheidung für TESLA wird Deutschland ein international gebautes und genutztes interdisziplinäres Forschungszentrum gewinnen und den Forschungsstandort Europa und Deutschland auf Jahrzehnte nachdrücklich stärken. Mit dem TESLA-Projekt und dem vorgeschlagenen Standort bei DESY haben Deutschland und seine Partner im internationalen Vergleich eine Vorreiterrolle übernommen. Ein Elektron-Positron-Linearcollider im Energiebereich von anfangs 500 GeV, erweiterbar bis in den TeV-Bereich, ist nun realisierbar.

3.4 Langfristige Perspektiven für Experimente an Beschleunigern

Die Zeiträume zur Vorbereitung, Planung und Realisierung neuer Projekte in der Teilchenphysik sind inzwischen groß. Obwohl man noch nicht weiß, welche Resultate und Überraschungen LHC oder LC bringen werden, sollte bereits jetzt über weiterführende Projekte nachgedacht werden, die den nächsten Schritt ermöglichen. Hieraus können sich in der längerfristigen Zukunft realisierbare Konzepte entwickeln, die neue Perspektiven eröffnen. Neben verbesserten Technologien zum Erreichen höherer Energien und Kollisionsraten für die Beschleunigung konventioneller stabiler Teilchen wie Protonen oder Elektronen studiert man derzeit auch Ideen zur Erzeugung intensiver Neutrinostrahlen und zur Konstruktion eines Myoncolliders. Viele dieser neuen Möglichkeiten sind durch die Entwicklungen für einen Linearcollider erst aufgetan worden.

Die Forschung und Entwicklung für einen Linearcollider, der im Energiebereich von mehreren TeV arbeiten soll, wird bei CERN im Rahmen des CLIC-Projekts vorangetrieben (*Compact Linear Collider*). Ein mögliches Nachfolgeprojekt für den LHC ist ein Hadronbeschleuniger im Bereich von 100 bis 200 TeV, der *Very Large Hadron Collider* VLHC. Das wissenschaftliche Potenzial eines Lepton-Nukleon-Colliders als möglicher Nachfolger von HERA wird ebenfalls als langfristige Perspektive studiert. Die Option, in TESLA hochenergetische Photonenkollisionen zu ermöglichen, wird unter dem Namen „Gamma-Gamma-Collider“ diskutiert.

Die Entdeckung von Neutrino-Oszillationen hat weltweit Forschungs- und Entwicklungsstudien zu dedizierten Neutrinoquellen ins Leben gerufen, mit denen eine genaue Bestimmung der Neutrino-Mischungseigenschaften und die Suche nach CP-Verletzung im Bereich der Neutrinos möglich werden kann. Als Entwicklungsstufen dahin werden ein Hochstrom-Protonenbeschleuniger mit sekundärem Neutrinostrahl und eine Neutrinofabrik angesehen, mit der Neutrinos aus dem Zerfall von gespeicherten Myonen nahezu untergrundfrei erzeugt werden können.

Ein Myonspeicherring zur Kollision von Myonen und Antimyonen schließt sich „natürlich“ an diese Entwicklungen an. Die Realisierung würde vom Hochstrombeschleuniger über die Neutrinofabrik bis hin zu einem Myoncollider in einer durch die notwendigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten festgelegten Reihenfolge erfolgen.

Um den Bedarf an Forschungs- und Entwicklungsarbeiten besser einschätzen zu können, werden die technischen Perspektiven einiger Projektideen in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

3.4.1 Multi-TeV-Elektron-Positron-Collider (CLIC)

Unter der Abkürzung CLIC (*Compact Linear Collider*) wird seit fast zehn Jahren bei CERN in internationaler Zusammenarbeit ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm für einen Multi-TeV-Elektron-Positron-Linearcollider verfolgt. CLIC zielt auf einen Energiebereich von 3 bis 5 TeV mit Luminositäten von 10^{34} bis 10^{35} cm^{-2} s^{-1} ab. Im Rahmen dieses Programms wird untersucht, ob eine Strahlbeschleunigung durch Wanderwellen bei Raumtemperatur und sehr hoher Frequenz (30 GHz) technisch realisierbar ist. Diese Wanderwelle wird durch einen Treiberstrahl (*drive beam*) in einem eigenen, parallel laufenden Elektronenbeschleuniger bei niedriger Energie und hoher Intensität erzeugt. Ziel sind extrem hohe Beschleunigungsgradienten von 150 MV/m. CERN bereitet im Rahmen dieses Programms eine Testanlage vor, um die technische Machbarkeit des neuen Beschleunigungskonzepts zu beweisen. Als Linearcollider im Multi-TeV-Bereich stellt CLIC ein mögliches Nachfolgeprojekt für den in Kapitel 3.3 vorgestellten Linearcollider im Energiebereich von 0,5 bis 1 TeV dar. Jedoch werden noch langjährige Vorarbeiten notwendig sein, bis man sicher weiß, dass ein Multi-TeV-Linearcollider auf der Basis der CLIC-Technologie gebaut werden kann.

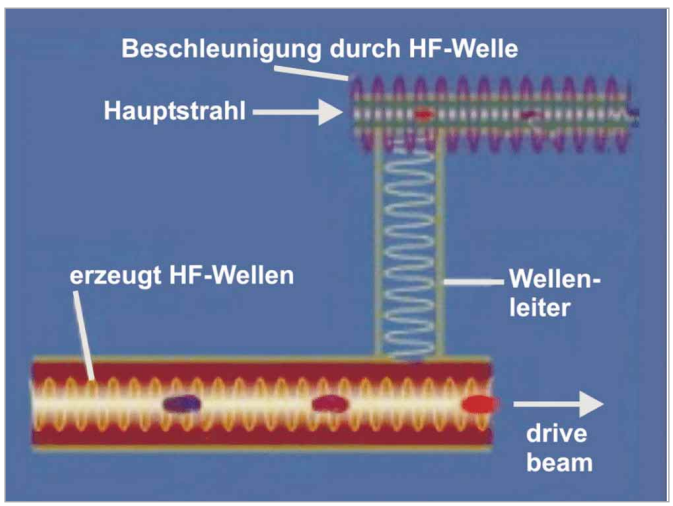


Abb. 3.29: Das Prinzip der *Wakefield*-Beschleunigung: Ein intensiver Elektronenstrahl (*drive beam*) erzeugt starke elektromagnetische Felder. Diese werden in die Beschleunigungsstrukturen des Hauptstrahls gespeist. Ist der *drive beam* verbraucht, wird er durch einen neuen ersetzt, der den Hauptstrahl weiter beschleunigt.

3.4.2 Hochstrom-Protonenbeschleuniger als intensive Neutrinoquelle

Hochstrom-Protonenbeschleuniger werden weltweit im Zusammenhang mit Hochfluss-Neutronenquellen, mit Konzepten zur Kernumwandlung von langlebigem radioaktivem Abfall und zu beschleunigergetriebenen Kernreaktoren studiert. Sie bilden einen „Startpunkt“ auf dem Weg zu einer Neutrinofabrik und stellen einen idealen Anschluss an bisherige Neutrinoprojekte mit Beschleunigern dar. Bereits existierende und im Bau befindliche Experimentiereinrichtungen könnten dafür genutzt werden.

Ein Beschleuniger, der einen hohen Strom von Protonen auf ein festes Ziel – ein so genanntes Target – schießt, produziert dabei einen Sekundärstrahl von Neutrinos mit hoher Intensität. Diese konventionelle Methode zur Erzeugung von Neutrinostrahlen entspricht den Techniken, mit denen bisher bei CERN, Fermilab oder KEK Neutrinostrahlen an Beschleunigern erzeugt werden. Im Bau befindlich sind die *Long-Baseline*-Projekte NuMi (Fermilab) und CERN - Gran Sasso (CNGS) sowie das bereits laufende Projekt K2K, bei dem Neutrinos von KEK zum Superkamiokande-Detektor geschickt werden. Für eine Hochstrom-Protonenanlage ist ein 4 MW-Protonenstrahl am Target vorgesehen. Die Energie der erzeugten Neutrinostrahlen sollte zwischen 1 GeV und 50 GeV betragen. Alternativ dazu werden niederenergetische Realisierungen mit Neutrinos von 250 MeV diskutiert, die zwar durch einen kleineren Wirkungsquerschnitt gekennzeichnet sind, bei denen die Analyse jedoch einfacher und die systematischen Fehler kleiner sind. Die Abstände zwischen Quelle und Detektor betragen zwischen 200 und 7000 km.

3.4.3 Neutrinofabrik

Im Unterschied zu einem konventionellen Neutrinostrahl werden in einer Neutrinofabrik die Teilchen nur über den Zerfall eines Myons in ein Elektron, ein Myon-Neutrino und ein Anti-Elektron-Neutrino erzeugt. Daher enthält der Neutrinostrahl nur Myon-Neutrinos und Anti-Elektron-Neutrinos und ist nicht durch andere Neutrinosorten verunreinigt. Mit konventionellen Methoden lassen sich dagegen keine untergrundfreien Strahlen von Anti-Elektron-Neutrinos mit hoher Intensität herstellen. Die angestrebte Intensität ist hundertmal höher als bei konventionellen Neutrinostrahlen. Die Empfindlichkeit einer Neutrinofabrik für Oszillationen zwischen Myon-Neutrinos und Elektron-Neutrinos wächst linear mit der Anzahl der nachgewiesenen Myon-Neutrinos (in konventionellen Strahlen dagegen nur mit der Wurzel).

Die Neutrinofabrik besteht aus einem Hochstrom-Protonenbeschleuniger, aus dessen Sekundärstrahlen Myonen herausgefiltert werden, und einem anschließenden Myonspeicherring mit langen geraden Strecken (Abb. 3.30), auf denen die Myonen in Neutrinos zerfallen. Die hohe Intensität des Myonenstrahls (10^{21} bis

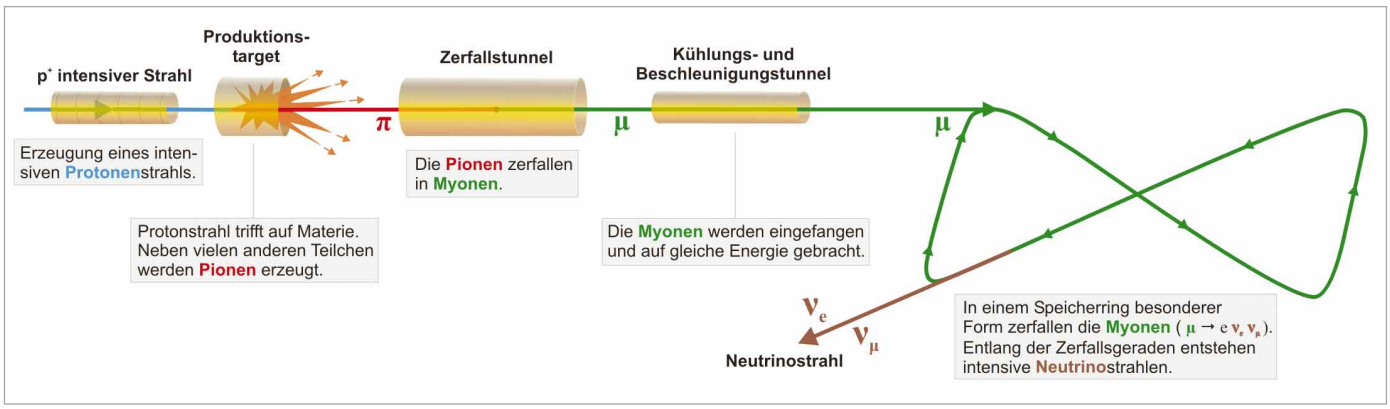


Abb. 3.30: Entwurfsskizze einer Neutrinofabrik

10^{22} Myonen pro Jahr) verlangt die Entwicklung neuartiger Techniken wie z. B. der Ionisationskühlung. Die Zerfallsneutrinos aus einem Myonspeicherring können auf experimentelle Einrichtungen von bis zu einigen tausend Kilometern Entfernung gerichtet werden.

Eine Neutrinofabrik bildet die logische Weiterführung bisheriger Forschung mit Neutrinos an Beschleunigern. Mit ihr können die mit Neutrinos von der Sonne und aus der Atmosphäre entdeckten Neutrino-Oszillationen im Detail untersucht werden. Besonders hervorzuheben ist dabei die Möglichkeit, den Neutrinomischungswinkel θ_{13} genau zu messen und die Verletzung der CP-Symmetrie im Bereich der Neutrinos zu studieren. Als Voraussetzung für den Bau einer solchen Anlage sind noch dedizierte Entwicklungsarbeiten zu leisten. Eine erste Stufe dazu ist der Hochstrom-Protonenbeschleuniger.

3.4.4 Myoncollider

Eine intensive Myonenquelle, wie sie für eine Neutrinofabrik benötigt wird, liefert auch die Möglichkeit, Myonen und Antimyonen in einem Speicherring zur Kollision zu bringen. Die prinzipiellen Vorteile eines Myon-Antimyon-Colliders im Vergleich zu einem Elektron-Positron-Collider sind die durch die geringeren Strahlungsverluste der Myonen bedingte bessere Energieschärfe des Strahls, die exzellente Energiekalibrierung und die genaue Bestimmung der Strahlpolarisation durch Messung der Myon-Zerfallsasymmetrie. Deshalb lassen sich Teilchenmassen sehr präzise messen. Ein Myonspeicherring kann wegen der erheblich geringeren Strahlungsverluste vergleichsweise kompakt gebaut werden. So würde der Radius für einen 3 TeV-Collider typischerweise zwischen 100 m und 1000 m betragen. Betreibt man die Anlage zunächst im Bereich niedriger Energien, so können Higgs-Bosonen ohne andere begleitende Teilchen erzeugt und deren Masse mit einer extremen Genauigkeit von wenigen MeV bestimmt werden. Ein Myoncollider im Multi-TeV-Bereich kann das Forschungsprogramm des 0,5 - 1 TeV-Elektron-Positron-Linearcolliders mit neuem Entdeckungspotenzial und sehr hoher Auflösung fortsetzen.

Myonen sind instabile Teilchen, die nach 10^{-6} s zerfallen. Myonen zu erzeugen und den Strahl innerhalb der – durch die relativistische Zeitdilatation verlängerten – Lebenszeit der Teilchen zu kühlen und zu beschleunigen, ist eine große technische Herausforderung. Ein weiteres Problem für den Bau eines Myoncolliders stellt die als Begleiterscheinung auftretende intensive Neutrinostrahlung dar. Diese reagiert zwar nur sehr schwach mit Materie, kann aber dennoch je nach Energie eine Strahlenbelastung nahe der zulässigen maximalen Strahlungsdosis von 20 mSv/Jahr erzeugen.

Das gesamte Entwicklungsprogramm (Hochstrom-Protonenbeschleuniger, Neutrinofabrik, Myoncollider) zeigt eine attraktive Richtung auf, in der sich die auf Experimenten an Beschleunigern beruhende Teilchenphysik in den nächsten 30 Jahren weiterentwickeln kann. Für die kommenden fünf bis zehn Jahre werden diese Projekte jedoch mehr den Status reiner Forschungs- und Entwicklungsprojekte beibehalten. In Japan ist ein Hochstrom-Protonenbeschleuniger allerdings bereits im Bau.

3.4.5 Very Large Hadron Collider (VLHC)

Die unter dem Begriff *Very Large Hadron Collider* (VLHC) vor allem in den USA laufenden Studien fassen Ideen und Vorstellungen für eine Hadronanlage im Energiebereich von 100 bis 200 TeV zusammen, die als Nachfolger zu LHC (14 TeV) betrachtet werden kann. Mit einer solchen Anlage ließen sich neue Fragestellungen im Multi-TeV-Bereich weit jenseits der LHC-Energien lösen. Die physikalischen Möglichkeiten lassen sich aber erst konkretisieren, wenn Resultate von LHC (und LC) vorliegen. Insbesondere am Fermilab wurden Designstudien durchgeführt, die einen ersten Entwurf einer solchen Anlage bei einem Kreisumfang von ca. 200 km ansiedeln. Die technologische Herausforderung liegt hier in der notwendigen Entwicklung von Niedrigpreis-Magneten.

Verglichen mit den Entwicklungsprogrammen zu Hochstrom-Protonenbeschleunigern und Neutrinofabriken ist für eine derartige Anlage zum jetzigen Zeitpunkt kein

dringendes F&E-Programm notwendig, mit Ausnahme vielleicht von Entwicklungen in der Magnettechnologie. In Deutschland gibt es für diese Entwicklungsrichtung derzeit keine nennenswerte Beteiligung.

3.4.6 Folgerungen für Forschung und Entwicklung in der Beschleunigerphysik

Die Weiterentwicklung der Teilchenphysik war und ist ohne Hochenergiebeschleuniger nicht denkbar. Alle bisher angesprochenen langfristigen Projekte erfordern wesentliche Fortschritte in der Beschleunigertechnologie, bei der Weiterentwicklung von supraleitenden Resonatoren mit hohen Feldgradienten, von supraleitenden Magneten mit hohen Magnetfeldstärken und von Teilchenstrahlen mit Querschnitten im Nanometerbereich. Bei dieser Entwicklung hat sich in der Vergangenheit gezeigt, dass die enge Zusammenarbeit zwischen den Beschleunigerzentren und den Universitäten essentiell ist. Diese Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Beschleunigerphysik muss auch in Zukunft weiter gepflegt werden.

3.5 Experimente ohne Beschleuniger

In den letzten 10 bis 15 Jahren haben Teilchenphysikexperimente, die keine Beschleuniger benötigen, enorm an Bedeutung gewonnen. Ihre Rolle für Fragestellungen der Teilchenphysik, der Astrophysik und der Kosmologie ist so wichtig geworden, dass daraus das Gebiet der Astroteilchenphysik mit einem eigenem Förderprogramm entstanden ist. Als Teilchenquellen für die Experimente dienen die Sonne, explodierende Sterne, die kosmische Strahlung sowie Kernzerfälle und Kernspaltung in Reaktoren. Diese Experimente besitzen oft einen direkten Bezug zu Fragestellungen der Kosmologie, in denen häufig teilchenphysikalische Ansätze zur Erklärung herangezogen werden. Es zeigt sich, dass die Teilchenphysik, außer für das Verständnis der ersten Sekunden nach dem Urknall und der Anfangsbedingungen der Strukturbildung, auch für die Entwicklung des expandierenden Universums und für dessen Ende von entscheidender Bedeutung ist (siehe Kap. 2).

Die verwendeten experimentellen Methoden sind zum Teil sehr unterschiedlich im Vergleich zu denen von Experimenten an Beschleunigern, zum Teil aber auch sehr ähnlich. Das Spektrum reicht von Protonzerfalls- und Neutrinoexperimenten, deren wissenschaftliche Fragestellung und Methodik noch am eindeutigsten der Teilchenphysik zuzuordnen sind, über Höhenstrahlungsexperimente bis zu Experimenten zur kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung, Gravitationswellenexperimenten und Supernova-Durchmusterungen, die eher der Astrophysik angehören. An dieser Stelle sollen nur die ersten beiden Arten von Experimenten beschrieben werden.

3.5.1 Protonzerfallsexperimente

Die Frage der Stabilität des Protons ist von großer Bedeutung für unser Verständnis der Vereinheitlichung aller fundamentalen Wechselwirkungen. In der Tat sagen Theorien, in denen die Kräfte auf ein gemeinsames Symmetrieprinzip zurückgeführt werden, voraus, dass Protonen zerfallen. Dies konnte experimentell allerdings noch nicht nachgewiesen werden. Wie eine Reihe von Experimenten bis hin zum Superkamiokande-Experiment gezeigt haben, leben Protonen extrem lange. Ihre mittlere Lebensdauer beträgt mehr als 10^{32} Jahre. Dies schließt die naheliegendste Erweiterung des Standardmodells zu einer einheitlichen Theorie aller Kräfte auf der Basis der so genannten SU(5)-Symmetrie aus, da diese eine deutlich kürzere Protonlebensdauer voraussagt. Um die Empfindlichkeit auf einen weiten Bereich vereinheitlichter Theorien auszuweiten, wird eine Reihe von Experimentiervorschlägen mit bis zu 500-fach höherer Empfindlichkeit als bisher diskutiert. Darunter befinden sich auch Experimente mit intensiven Neutrinostrahlen aus Beschleunigern, da die dazu notwendigen Detektoren Nachweiseigenschaften besitzen, die auch für die Suche nach dem Protonzerfall verwendet werden können. Deutsche Gruppen sind bis jetzt allerdings an Protonzerfallsexperimenten nicht beteiligt.

3.5.2 Experimente zur direkten Suche nach dunkler Materie

Falls Elementarteilchen die dunkle Materie des Universums ausmachen, kann man versuchen, diese direkt oder über ihre Vernichtungsprozesse nachzuweisen. Massive Neutrinos könnten im Prinzip, da sie in ähnlicher Anzahl wie die Photonen der Mikrowellenhintergrundstrahlung rund eine Sekunde nach dem Urknall freigesetzt wurden, einen großen Beitrag zur Materie des Universums liefern. Allerdings sind die beobachteten Strukturen im Universum (Galaxienhaufen, Leerräume) nur verständlich, wenn schwere, langsam fliegende Teilchen die dominierende Rolle spielen. Die besten Kandidaten hierfür sind die leichtesten und daher stabilen supersymmetrischen Teilchen (*Weakly Interacting Massive Particles* WIMPs). Diese Teilchen sollten durch normale Materie elastisch gestreut werden können und dabei Energie auf diese übertragen. Die als sehr gering erwartete Rückstoßenergie kann z. B. in mehreren Kilogramm schweren, hochempfindlichen Kristalldetektoren nachgewiesen werden, die in Untergrundlaboratorien gegen kosmische Strahlung und Störeinflüsse abgeschirmt sind.

Das unter deutscher Federführung betriebene Experiment CRESST (Gran Sasso Laboratorium) verwendet neuartige Tieftemperaturdetektoren. Nach Beendigung der ersten Datennahmephase wird derzeit eine Untergrundunterdrückung eingeführt, die Voraussetzung für die Nutzung erheblich größerer Detektoren ist. Eine ähnliche Sensitivität wird auch das im Gran Sasso Laboratorium

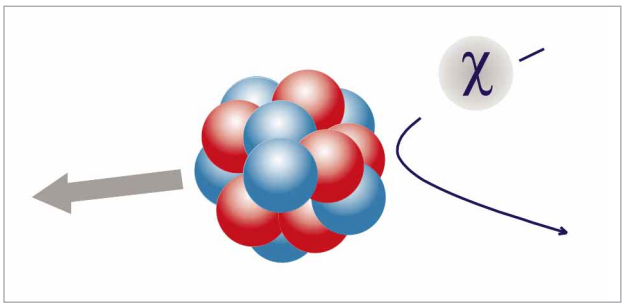


Abb. 3.31: Rückstoß durch elastische Streuung eines WIMP-Teilchens (χ): Ein Teilchen der dunklen Materie des Universums trifft einen Atomkern und überträgt Energie auf diesen.

vorgeschlagene GENIUS-Projekt aufweisen, das empfindliche Germaniumdetektoren einsetzen wird. Diese geplanten Experimente decken einen wichtigen Teil der möglichen Parameter supersymmetrischer Modelle ab. Mit dem Axionteleskop CAST bei CERN werden Axionen aus dem Zentrum der Sonne gesucht. Axionen wurden postuliert, um zu erklären, warum die CP-Verletzung nur in der schwachen, nicht aber der starken Wechselwirkung auftritt. Sie können zur Erklärung der beobachteten Galaxienverteilung im Universum und der dunklen Materie herangezogen werden.

An all diesen Experimenten und Experimentiervorschlägen sind deutsche Gruppen maßgeblich beteiligt.

3.5.3 Detektoren für Neutrinos

Die Neutrinophysik konnte in den letzten 10 bis 20 Jahren große Erfolge vorweisen. Die Experimente benutzen Neutrinos aus verschiedenen Quellen: der Sonne, der kosmischen Strahlung, Reaktoren und schwachen Kernzerfällen. Dabei liefern die Experimente jeweils komplementäre Informationen. Wie kürzlich gezeigt werden konnte, wandeln sich Neutrinos unter dem Einfluss der schwachen Wechselwirkung ähnlich wie Quarks ineinander um. Aus diesen Neutrino-Oszillationen lassen sich Rückschlüsse auf Massendifferenzen ziehen, jedoch nicht auf die Masse einer Neutrinospezies direkt. Eine direkte Bestimmung der Neutrinomassen wird jedoch dringend benötigt. Die beste Grenze für die Masse von Neutrinos kommt aus dem Tritiumzerfall. Elektron-Neutrinos sind leichter als 2,3 eV, mindestens 200 000-mal leichter als Elektronen. Die Untersuchung des Elektronspektrums im Tritiumzerfall wird voraussichtlich in den kommenden Jahren mit dem neuen KATRIN-Experiment am Forschungszentrum Karlsruhe weitergeführt, um einen Massenbereich bis 0,35 eV untersuchen zu können.

Da Neutrinos keine Ladung tragen, könnten sie ihre eigenen Antiteilchen sein. In diesem Fall ist ein doppelter Betazerfall ohne Aussendung von Neutrinos möglich. Nach solchen Zerfällen sucht u. a. das Heidelberg-Moskau-Experiment im Untergrundlabor Gran Sasso in Italien. Ein weiterführendes Experiment (GENIUS) ist in Planung.

Neutrinos aus der Kernfusion in der Sonne werden seit vielen Jahren vom Pionierexperiment Homestake in einem Bergwerk in South Dakota, USA, nachgewiesen. Anfang der 1990er Jahre gelang erstmals der Nachweis von Neutrinos aus dem einleitenden Proton-Proton-Zyklus, dem vorherrschenden Energieerzeugungsprozess in der Sonne, mit den Experimenten GALLEX (Gran Sasso Laboratorium) und SAGE (Baksan Neutrino-Observatorium, Kaukasus, Russland). Die Fusionsprozesse im Zentrum der Sonne sind recht gut bekannt, sodass die Kombination der verschiedenen Ergebnisse weit reichende Rückschlüsse auf die Natur der Neutrinos ermöglicht: Neutrinos unterschiedlicher Familien scheinen sich ineinander umzuwandeln, eine Interpretation, die durch Beobachtungen an Neutrinos, die in der Erdatmosphäre erzeugt werden, erhärtet wird (siehe unten). Die Experimente Superkamiokande (Japan) und SNO (Kanada) haben die frühen Hinweise auf Oszillationen bei Neutrinos aus der Sonne zweifelsfrei bestätigt. Obwohl die Sonne nur Elektron-Neutrinos produziert, sind nur 30 bis 50 % der auf der Erde nachgewiesenen Neutrinos von dieser Art. Mit niederenergetischen Neutrinos aus Reaktoren können die

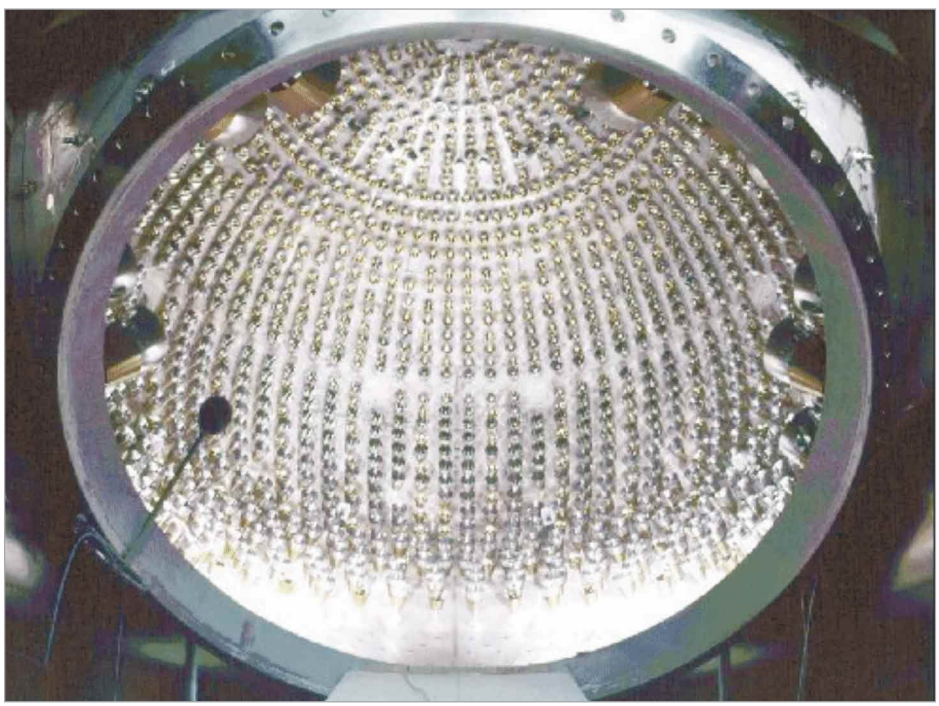


Abb. 3.32: Ein Blick in den BOREXINO-Detektor (Gran Sasso Laboratorium, Italien). Der Durchmesser des kugelförmigen Detektors beträgt ungefähr 14 m.

Oszillationen weiter untersucht werden. Ziel einer neuen Generation von Experimenten zum Nachweis solarer Neutrinos ist die quantitative Bestimmung der Parameter der Neutrino-Oszillationen. Deutsche Arbeitsgruppen sind maßgeblich an den europäischen Experimenten GNO, BOREXINO sowie dem geplanten Experiment LENS, alle im Gran Sasso Laboratorium in Italien, beteiligt.

Neutrinos entstehen auch durch Wechselwirkung von Protonen und Atomkernen in der oberen Erdatmosphäre. Neutrino-Oszillationen können dabei durch die Messung der Zusammensetzung der Neutrinostrahlung in Abhängigkeit der Flugdistanz untersucht werden. Das Experiment Superkamiokande in Japan hat auf eindrucksvolle Weise gezeigt, dass sich der Anteil der Elektron-Neutrinos über diese Distanzen von 20 bis 6000 km kaum verändert, während Myon-Neutrinos dagegen „verloren" gehen.

3.5.4 Experimente mit kosmischer Strahlung

Die Experimente der hochenergetischen Teilchenphysik haben mit kosmischer Höhenstrahlung begonnen. Die ersten Antiteilchen und instabilen Teilchen wurden in der kosmischen Strahlung gefunden, die viele Jahre lang alleinige Quelle von hochenergetischen Teilchen war, bis die ersten Hochenergiebeschleuniger aufkamen. Seit einigen Jahren erlebt die Untersuchung der Höhenstrahlung eine Renaissance. Verbesserte experimentelle Techniken öffnen neue Fenster für Untersuchungen ultrahoher Energien mit geladenen Teilchen, Photonen und Neutrinos.

Ein wichtiges Ziel von Experimenten auf diesem Gebiet ist die Suche nach den Quellen der kosmischen Strahlung und die Untersuchung ihrer Beschleunigungsmechanismen. Als potenzielle Quellen hochenergetischer Teilchen werden u. a. galaktische Supernovae-Überreste und aktive Galaxien diskutiert. Die Energie der nachgewiesenen Teilchen reicht bis zu acht Größenordnungen über die von erdgebundenen Beschleunigern wie dem LHC hinaus. Da die Rate der Teilchen mit zunehmender Energie stark abnimmt, beziehungsweise die Größe der in der Atmosphäre von ihnen erzeugten Kaskadenschauer zunimmt, müssen die entsprechenden Detektoren sehr groß sein.

Anhand von Experimenten mit kosmischer Strahlung lassen sich auch teilchenphysikalische Aspekte im engeren Sinn betrachten. Beispielsweise können die Massen aller drei Neutrinoarten in Supernova-Explosionen mit einigen eV Empfindlichkeit untersucht werden. Wieso kosmische Strahlung mit Energien oberhalb von 10^{19} eV beobachtet wird, obwohl diese aufgrund ihrer Wechselwirkung mit der im Universum überall vorhandenen Hintergrundstrahlung sehr stark absorbiert sein sollte, ist nicht verstanden. Als Ursache werden z. B. neuartige superschwere Teilchen und topologische Defekte aus Phasenübergängen des frühen Universums diskutiert. Auch nach supersymmetrischen Teilchen kann gefahndet werden. Für die Untersuchung dieser Fragen werden geladene Teilchen, Photonen und Neutrinos herangezogen.

Nachweis geladener Teilchen

Die Untersuchung der Zusammensetzung der kosmischen Strahlung aus chemischen Elementen trägt dazu bei, die Erzeugungs- und Beschleunigungsmechanismen der kosmischen Strahlung zu verstehen. Erd- und weltraumgebundene Experimente untersuchen Energien bis zu einigen 100 GeV. Das Satelliten-Experiment PAMELA und das weit größere AMS-Experiment auf der internationalen Raumstation ISS sind auf die Suche nach Antimaterie in der kosmischen Strahlung optimiert. Das KASCADE-Experiment

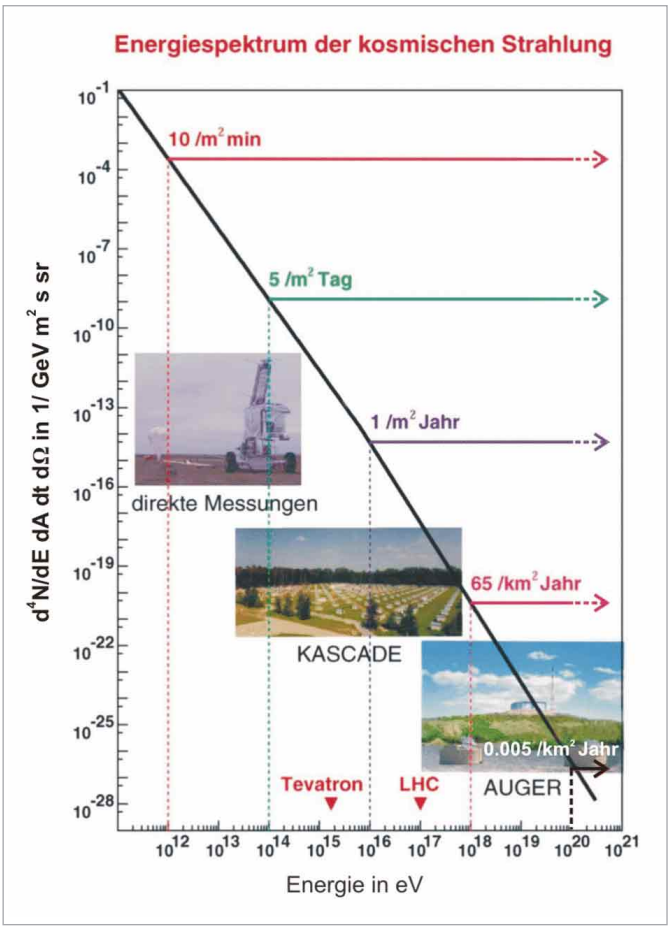


Abb. 3.33: Anzahl kosmischer Teilchenschauer, die pro Sekunde pro Quadratmeter auf die Erde auftreffen. Die Größe ist ferner auf ein Einheitsintervall in der Energie und in der Richtung normiert.

am Forschungszentrum Karlsruhe hat erfolgreich den Energiebereich um 10^{15} eV untersucht, einen Bereich, in dem man eine Änderung der Elementzusammensetzung erwartet. Das Pierre-Auger-Projekt in Argentinien befindet sich im Aufbau und besteht aus 1600 Detektoren für geladene Teilchen, die eine Fläche größer als die des Saarlands überdecken sollen. Der Nachweis wird ergänzt durch mehrere „Weitwinkel"-Fluoreszenzdetektoren. Das NRW-Schulprojekt „Sky-View" befindet sich in Planung. An all diesen Experimenten sind deutsche Gruppen stark, z. T. federführend, beteiligt.

Hochenergie-Gammateleskope

Nachdem mit den HEGRA-Teleskopen auf der Kanarischen Insel La Palma eine Reihe von Quellen hochenergetischer Gammastrahlung, wie aktive Galaxien, untersucht werden konnten, bauen deutsche Gruppen derzeit die Cherenkovteleskope H.E.S.S. und MAGIC auf. H.E.S.S., eine Anordnung aus zurzeit vier Teleskopen mit 13 m Durchmesser in Namibia, wird die beste Überdeckung des Südhimmels erlauben, insbesondere auch des galaktischen Zentrums. Das Einzelteleskop MAGIC mit 17 m Durchmesser hat eine niedrigere Energieschwelle von zunächst 30 GeV, sodass sein Empfindlichkeitsbereich mit dem von satellitengestützten Experimenten überlappt. Durch die rasche Ausrichtbarkeit sollten Gammastrahlenblitze, die nur kurz aufleuchten und dann die hellsten Objekte des Himmels darstellen, zu beobachten sein. In Kapitel 3.5.2 wurden schwach wechselwirkende massive Teilchen, so genannte WIMPs, als aussichtsreiche Kandidaten für dunkle Materie erwähnt. Neben dem oben erwähnten direkten Nachweis von WIMPs kann die Anreicherung von bis zu mehreren TeV schweren, langsam fliegenden WIMPs in Gravitationsfeldern experimentell ausgenutzt werden. Bei genügend hoher Dichte von WIMP-Teilchen können sich diese gegenseitig vernichten. Die dabei entstehenden Gammastrahlen lassen sich mit Cherenkov-Gammateleskopen nachweisen.

Neutrinoteleskope

Deutsche Gruppen sind an allen aktiven (NT-Experiment im Baikalsee, AMANDA im Eis des Südpols) und im Bau bzw. in Planung befindlichen Neutrinoteleskopen beteiligt (IceCube am Südpol, ANTARES und NESTOR im Mittelmeer). Diese Detektoren müssen extrem groß gebaut werden, um Neutrinos in genügender Zahl nachweisen zu können. Der geplante IceCube-Detektor wird mit 4800 optischen Sensoren in 1000 bis 2000 m Tiefe im Eis des Südpols ein instrumentiertes Volumen von einem Kubikkilometer aufweisen. Bislang wurden in den existierenden Detektoren hochenergetische Myon-Neutrinos aus der Atmosphäre beobachtet und damit der Beweis für das Funktionieren der Teleskope erbracht; der Nachweis von Neutrinos extraterrestrischen Ursprungs steht jedoch noch aus. Bisher können für die Neutrinoflüsse aus astronomischen Objekten nur Grenzen angegeben werden, die allerdings bereits für die Modelle der Erzeugung von Neutrinos in astrophysikalischen Prozessen von Bedeutung sind. Abschätzungen aus dem Fluss geladener kosmischer Strahlen zeigen, dass der Nachweis von Neutrinoquellen mit dem IceCube-Detektor mit einer um zwei Größenordnungen höherer Empfindlichkeit als bisher gelingen sollte. Wie mit Hochenergie-Gammateleskopen kann auch mit Neutrinoteleskopen nach Signalen für die Vernichtung von WIMP-Teilchen gesucht werden, zum Beispiel im Zentrum der Sonne. Die AMANDA/IceCube-Experimente sind zudem empfindlich auf Neutrinos mit niedriger Energie, die in Supernova-Explosionen entstehen. Magnetische Monopole und andere Relikte aus dem Urknall werden als mögliche Ursachen für kosmische Strahlung mit ultrahoher Energie diskutiert und können mit Neutrinoteleskopen ebenfalls untersucht werden.

Tabelle 3.6 fasst Experimente, die ohne Beschleuniger arbeiten, zu Fragen der Astroteilchenphysik und Neutrinophysik zusammen; nur Experimente mit deutscher Beteiligung sind aufgeführt.

Abb. 3.34: Ein Foto eines der H.E.S.S.-Cherenkovteleskope in Namibia

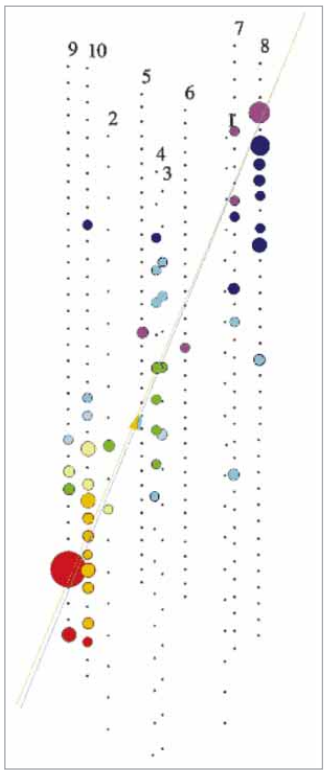


Abb. 3.35: Darstellung eines Neutrinos im AMANDA-Detektor. Die farbigen Punkte symbolisieren die angesprochenen Photomultiplier, die Signalhöhe wird durch die Größe der Kugeln angezeigt. Die Farbe gibt den Zeitpunkt an, zu dem das Licht eintraf: rot bedeutet früh, blau spät. Folglich kam das Neutrino von unten durch die Erde.

Tabelle 3.6: Experimente mit deutscher Beteiligung zu Fragen der Astroteilchen- und Neutrinophysik

Quelle	Untersuchungsgegenstand	Experimente mit deutscher Beteiligung
Mikrowellenhintergrund	Weltmodelle	PLANCK
Gravitationswellen	Gravitonen	**GEO600, LISA**
dunkle Materie	WIMPs	**CRESST**
solare Neutrinos atmosphärische Neutrinos	ν_e-Mischung ν_μ-Mischung	**GNO,** BOREXINO, *LENS*
Tritium β-Zerfall	absolute ν_e-Masse	**Mainz,** KATRIN
neutrinoloser 2β-Zerfall	absolute Majorana-Neutrinomasse	**Heidelberg-Moskau,** *GENIUS*
kosmische Strahlung	geladene Strahlung (direkt) geladene Strahlung (indirekt) hochenergetische γ-Strahlung hochenergetische Neutrinos	**ISOMAX,** PAMELA, AMS **KASCADE,** AUGER **HEGRA, GRAAL,** H.E.S.S., MAGIC **BAIKAL, AMANDA,** ANTARES, ICECUBE

Derzeit laufende Experimente sind fett, im Aufbau befindliche Experimente normal und Experimente, die sich in Planung befinden, kursiv gedruckt.

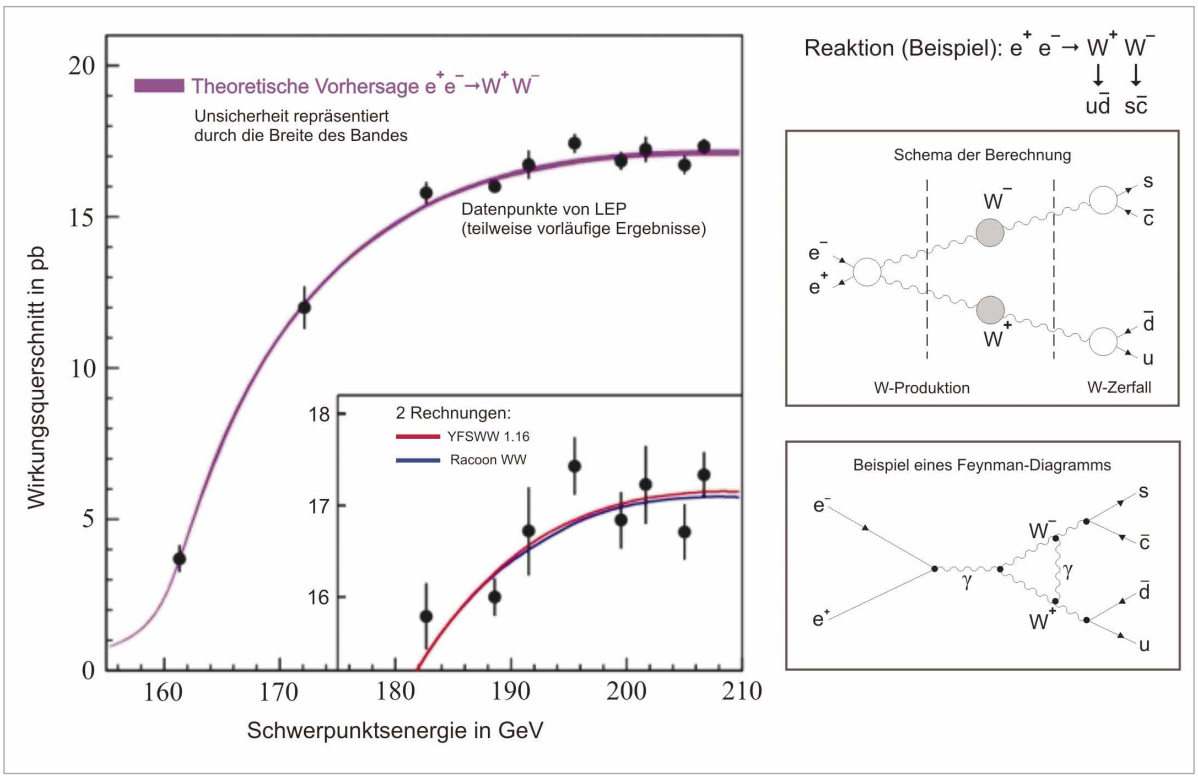


Abb. 3.36: Tausende von Feynman-Diagrammen müssen in die Berechnung von Reaktionsraten mit einbezogen werden, um Experiment und Theorie mit hoher Präzision zu vergleichen – hier am Beispiel der Erzeugung von Paaren schwerer Kraftteilchen am Elektron-Positron-Speicherring LEP. Jeder Kreis im rechten oberen Diagramm fasst symbolisch jeweils eine Vielzahl verschiedener Diagramme zusammen.

3.6 Verknüpfung von Experiment und Theorie

Experimentelle Entwicklungen erfordern eine stete und enge Wechselwirkung mit neuen theoretischen Konzepten und konkreten Berechnungen für beobachtbare Phänomene. Die theoretische Teilchenphysik hat die Formulierung der grundlegenden Gesetzmäßigkeiten der fundamentalen Wechselwirkungen mit Hilfe mathematischer Methoden zum Ziel. Als geeigneter konzeptioneller Rahmen hat sich dabei die Quantenfeldtheorie herausgestellt, welche die physikalischen Prinzipien der Speziellen Relativitätstheorie und der Quantentheorie konsistent miteinander verbindet. Ein markanter Meilenstein wird durch das Standardmodell (siehe Kap. 2) gesetzt, welches das derzeitige theoretische Bild von der starken und der elektroschwachen Wechselwirkung maßgeblich prägt. Auf dem Weg zu einer weiteren Vereinheitlichung der Grundkräfte zu einer gemeinsamen Urkraft erweist sich das Konzept der Supersymmetrie als besonders Erfolg versprechend. Eine Universalvereinigung, welche die Gravitation einschließt, erfordert allerdings Konsistenz auch mit der Allgemeinen Relativitätstheorie, was im Rahmen der Quantenfeldtheorie jedoch zu unüberwindbaren Problemen führt. Möglicherweise findet sich die Lösung in einer Stringtheorie, bei der die Punkte der Raumzeit durch eindimensional ausgedehnte Objekte ersetzt werden. Andere, zurzeit noch sehr spekulative Ideen suchen einen Zugang durch eine Erweiterung der Anzahl der Raumdimensionen oder über einen nicht-kommutativen Charakter der Raumzeitgeometrie bei sehr kleinen Abmessungen. All diese Ideen sind eng verbunden mit neuartigen mathematischen Ansätzen und Strukturen. Sie erfordern daher auch in rein mathematischer Hinsicht die Entwicklung neuer Konzepte und Methoden.

Zur Überprüfbarkeit der in einer Theorie niedergelegten Strukturen bedarf es quantitativer Vorhersagen, die sich mit mathematischen Methoden aus den Grundgleichungen gewinnen lassen und die der experimentellen Untersuchung zugänglich sind. Typische Vorhersagen sind z. B. die Teilchenspektren und die genaue Form von Reaktionswahrscheinlichkeiten – „Wirkungsquerschnitten"– für Teilchenreaktionen bis hin zur Simulation von Ereignissen in Detektoren mit Hilfe umfangreicher Computerprogramme, so genannter Monte-Carlo-Generatoren.

Experimentelle Strategien orientieren sich vielfach an solchen phänomenologischen Konsequenzen der Theorie; andererseits werden aber auch von experimenteller Seite neue Anforderungen an die Theorie gestellt, wie etwa eine besonders hohe Genauigkeit in den Vorhersagen. Das Niveau der mit der nächsten Generation von Collidern erwarteten Präzision der Experimente erfordert auf der theoretischen Seite die laufende Entwicklung neuer und effizienter Methoden zur Handhabung der umfangreichen mathematischen und konzeptionellen Probleme bei der Berechnung der messbaren Größen.

Als besonders erfolgreiche theoretische Methoden sind die näherungsweise Berechnung von Streuamplituden, also von Wahrscheinlichkeitsamplituden für Streuprozesse, mit Hilfe von Feynman-Diagrammen (siehe Box 2.4 Seite 16) zu nennen sowie die Gitterapproximation, also die Berech-

nung der Quantenfeldtheorie auf einem diskreten Gitter von Raumzeitpunkten. Die Methode der Feynman-Diagramme erweist sich als besonders geeignet für Streuprozesse auf der Ebene von Leptonen und Quarks; sie lieferte die theoretische Basis für die großen Erfolge der Präzisionstests des Standardmodells bei LEP und anderen Experimenten. Allerdings nimmt die Zahl der Diagramme zur Berechnung von komplizierten Reaktionsquerschnitten für die zukünftigen Collider mit steigender Genauigkeit rapide zu, sodass sie nur noch mit computeralgebraischen Methoden und Automatisierungstechniken unter Nutzung moderner Rechner mit hoher Rechengeschwindigkeit und Speicherkapazität zu bewältigen sind. Als Beispiel sei die genaue Bestimmung der Masse des W-Bosons an einem Elektron-Positron-Linearcollider angeführt, für welche die Anzahl der benötigten Feynman-Diagramme bereits in den ersten Berechnungsstufen in die Zehntausende geht. Um koordiniert und möglichst effizient die Komplexität der mit Hilfe der Störungstheorie berechenbaren Aufgaben zu meistern, wurde eine internationale Arbeitsgruppe, der „LoopVerein", eingerichtet, die auf europäischer Ebene experimentelle Studien für zukünftige Collider begleitet und ergänzt.

Für die starke Wechselwirkung ist die Methode der Feynman-Diagramme bei kleinen Impulsüberträgen und großen Werten der Kopplungsstärke nicht anwendbar. Hier entfaltet die Gitterapproximation, deren Fortschritte durch den erheblichen Anstieg der Rechnerleistung wesentlich unterstützt wird, als komplementäre Methode ihr Potenzial. Typische Anwendungen sind die Berechnung des Potenzials zwischen Quarks und Antiquarks sowie Analysen des Hadronspektrums als eine Vorhersage der Quantenchromodynamik QCD. Damit einher geht die Bestimmung der starken Kopplungskonstanten. Zu den Perspektiven für die Zukunft gehören aber auch die

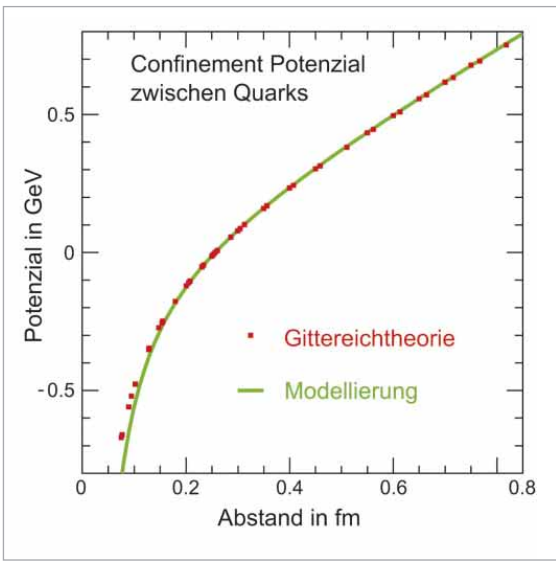


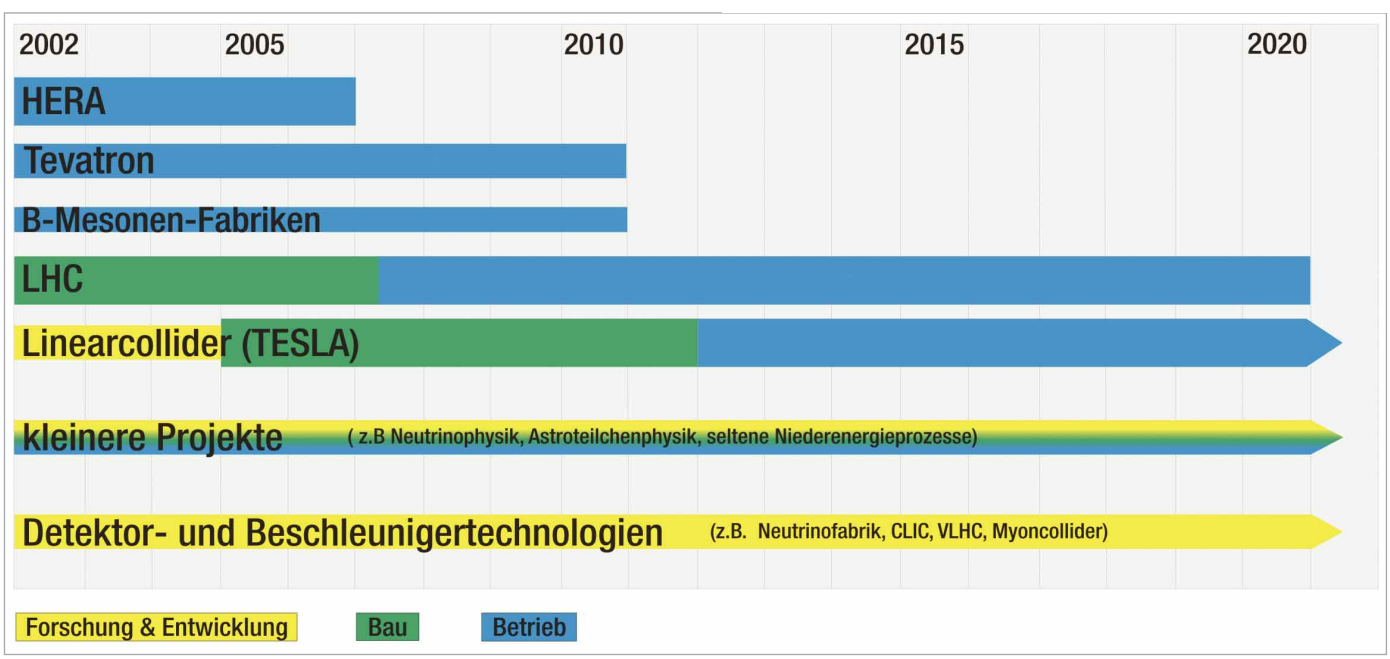
Abb. 3.37: Das QCD-Potenzial zwischen Quarks und Antiquarks, berechnet nach der Gittermethode. Das Potenzial wächst mit dem Abstand an, sodass keine freien Quarks existieren können (*Confinement*).

Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für die Zerfälle leichter und schwerer instabiler Hadronen. Für hochenergetische Kollisionsprozesse mit Protonen ist außerdem – zusätzlich zu den Streuamplituden für die Elementarprozesse zwschen Quarks und Gluonen – auch die Kenntnis der Verteilungsfunktionen der Quarks und Gluonen im Proton erforderlich, zu denen von den Gitterrechnungen neue theoretische Ergebnisse erwartet werden.

3.7 Zeitliche Einordnung der Projekte

In Abbildung 3.38 sind die in diesem Zukunftsbericht vorgeschlagenen Projekte aufgeführt und zur Orientierung in einen möglichen Zeitrahmen gestellt. Es wird unterschieden zwischen Entwicklungsphase, Bauphase und Betriebsphase.

Abb. 3.38: Mögliches Zeitprofil der empfohlenen Projekte



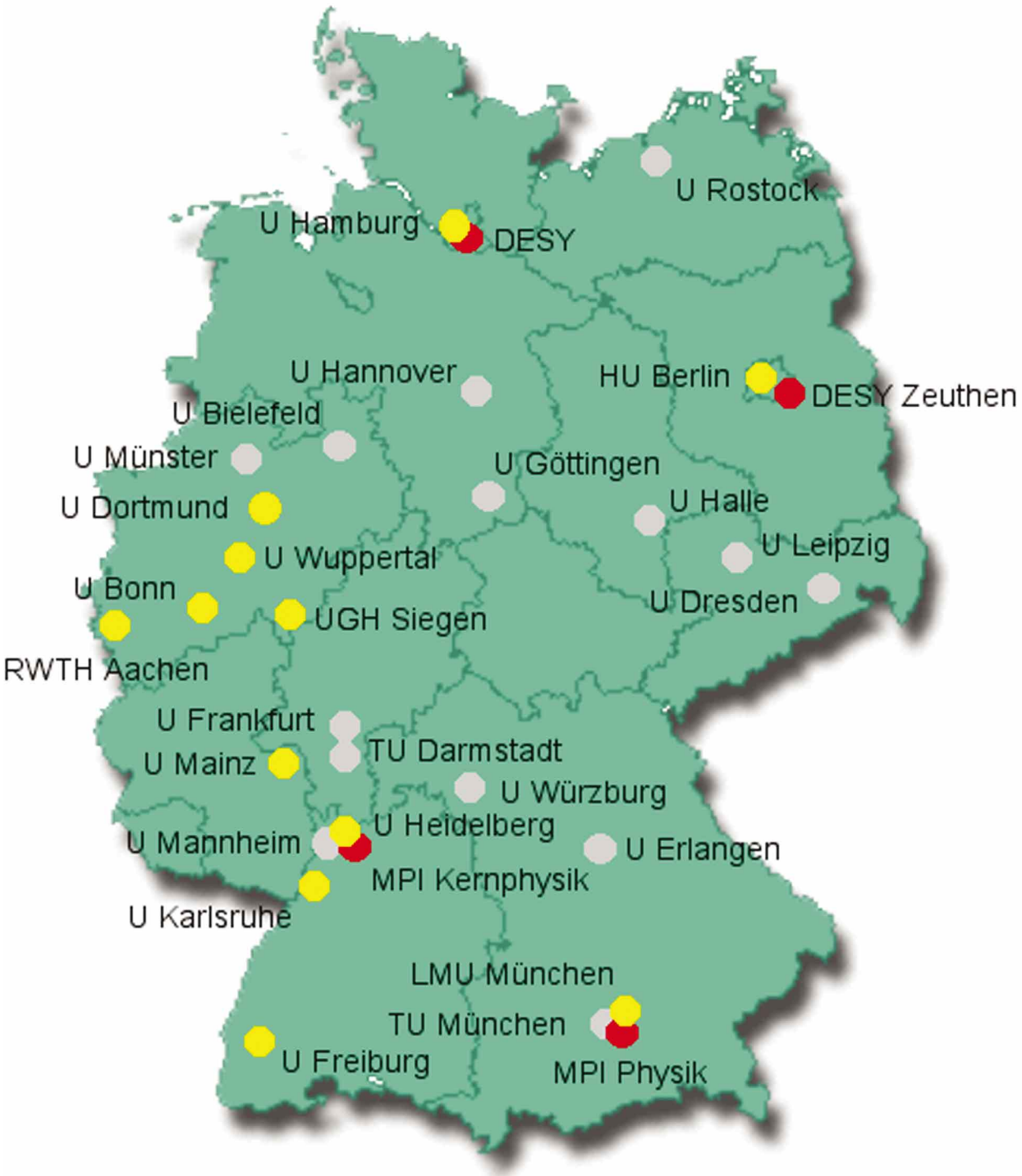


Abb. 4.1: Übersicht über Universitäten (gelbe Punkte), an denen schwerpunktmäßig experimentelle und theoretische Elementarteilchenphysik betrieben wird. Universitäten mit entweder experimentellen oder theoretischen Teilchenphysikgruppen oder mit Aktivitäten auf dem Gebiet der Beschleunigerphysik bzw. Informatik im Zusammenhang mit teilchenphysikalischen Projekten sind mit grauen Punkten markiert. Rote Punkte kennzeichnen außeruniversitäre Forschungseinrichtungen.

4 · TEILCHENPHYSIK IN DEUTSCHLAND

4.1 Struktur und Institutionen

Die Elementarteilchenphysik wird in Deutschland schwerpunktmäßig an 12 Universitäten und zwei außeruniversitären Forschungseinrichtungen betrieben (Abb. 4.1), dem MPI für Physik in München und dem Helmholtz-Forschungszentrum Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg und Zeuthen. An weiteren 14 Universitäten und am MPI für Kernphysik in Heidelberg sind entweder nur experimentelle bzw. theoretische Teilchenphysik oder Beschleunigerphysik oder Informatik im Zusammenhang mit teilchenphysikalischen Projekten vertreten. Neben den drei bereits genannten Forschungszentren gibt es noch zwei weitere Helmholtz-Zentren, die GSI in Darmstadt sowie das Forschungszentrum Karlsruhe, mit Aktivitäten in enger Beziehung zur Elementarteilchenphysik.

DESY verfügt mit HERA als einzige nationale Forschungseinrichtung in Europa über einen Teilchenbeschleuniger, der in der internationalen Riege der Experimente bei höchsten Energien an vorderster Front mitwirkt. DESY hat darüber hinaus mit dem TESLA-Projekt eine großartige Zukunftsvision entwickelt, die im Falle einer Realisierung die führende internationale Rolle von DESY langfristig sichern wird. Die erstklassigen Experimentiermöglichkeiten machen das Helmholtz-Zentrum bei den deutschen Universitäten zu einem hoch geschätzten Partner für ihre Forschungsprojekte. Elf Universitäten und beide Max-Planck-Institute tragen als Mitglieder internationaler Forschungsgruppen aktiv zum aktuellen Experimentierprogramm bei HERA bei. DESY hat als nationales Zentrum darüber hinaus auch eine starke internationale Anziehungskraft. 3400 Wissenschaftler aus 280 Universitäten in 35 Ländern gestalten ein wissenschaftliches Gesamtprogramm, das neben der Elementarteilchenphysik auch interdisziplinäre Forschungen auf dem Gebiet der Nutzung der Synchrotronstrahlung umfasst.

Das Europäische Laboratorium für Elementarteilchenphysik CERN in Genf ist das zweite wichtige Standbein der deutschen Teilchenphysiker. Das Genfer Forschungszentrum spielte nach dem Zweiten Weltkrieg eine historisch bedeutende Rolle bei der Wiederaufnahme deutscher Wissenschaftler in die internationale Gemeinschaft. Alle bedeutenden Beschleunigerprojekte am CERN und die zugehörigen Experimente entstanden unter maßgeblicher Beteiligung deutscher Universitäten sowie beider Max-Planck-Institute. Einen ersten Blick über das Standardmodell hinaus soll ab 2007 der *Large Hadron Collider* (LHC) liefern. Mit der Beteiligung von elf deutschen Universitäten und den Max-Planck-Instituten an den geplanten Experimenten ATLAS, CMS und LHCb sind deutsche Gruppen ausgezeichnet für die spannende Physik an diesem bedeutendsten Projekt der näheren Zukunft gerüstet. Fast die Hälfte aller Teilchenphysikerinnen und -physiker weltweit (etwa 6500) sind in ihren Forschungen mit dem CERN verbunden. Diese Gemeinschaft repräsentiert etwa 500 Universitäten aus 80 Ländern.

Bei aller Attraktivität des eigentlichen Forschungsgebiets stellt die lange Zeitskala von der Planung bis zur Durchführung der Experimente in der Elementarteilchenphysik ein strukturelles Problem dar – insbesondere für die auf Kontinuität in der Nachwuchsarbeit angewiesenen Universitätsgruppen. Das sinnvolle und komplementäre Wechselspiel zwischen den Projekten bei DESY und CERN hat hier traditionell eine gute Lösung geboten. Einige der nicht am HERA-Projekt mitwirkenden deutschen Gruppen beteiligen sich darüber hinaus an attraktiven Beschleunigerexperimenten in den nationalen Forschungszentren *Stanford Linear Accelerator Center* (SLAC) und *Fermi National Accelerator Laboratory* (FNAL bzw. Fermilab) in den USA. Sie sind damit an laufenden Experimenten mit erstklassigem Physikpotenzial beteiligt und können ihrem wissenschaftlichen Nachwuchs die wichtigen Erfahrungen bei Betrieb und Analyse moderner Großexperimente der Elementarteilchenphysik vermitteln.

Mit der Fertigstellung der LHC-Detektoren und dem Abschluss des HERA-Betriebs verfügen die deutschen Universitäten und Forschungseinrichtungen gegen Mitte dieses Jahrzehnts über exzellente Ressourcen, um eine starke Beteiligung an der Planung und Vorbereitung eines Linearcolliders zu gewährleisten. Bei der erhofften Realisierung in Hamburg wird dies darüber hinaus weiterhin die traditionell gute und besonders für den wissenschaftlichen Nachwuchs wichtige Beteiligung an den Ressourcen des Großforschungszentrums DESY ermöglichen.

Deutschland besitzt im Gegensatz zu einigen europäischen Partnerländern kein nationales Servicelabor für Universitätsgruppen, in dem aufwändige Entwicklungsarbeiten im instrumentellen Bereich durchgeführt werden könnten. Diese Situation hat jedoch zu einer sehr positiven Entwicklung an den Universitäten selbst geführt, die in Eigenarbeit und mit finanzieller und personeller Unterstützung ihrer Landesministerien international viel beachtete Infrastrukturen aufgebaut haben. Über die traditionellen Institutswerkstätten hinaus sind an vielen Standorten in den letzten Jahren Halbleiterlabors, Zentren für Mikroelektronik oder leistungsfähige Computercluster entstanden, die einen Vergleich mit Einrichtungen an ingenieurwissenschaftlichen Fakultäten nicht zu scheuen brauchen, jedoch den Vorteil einer projektorientierten Anwendung mit strengen Zeitplänen haben. Neben Entwicklungsarbeiten für die neuen Experimente der Elementarteilchenphysik haben diese Einrichtungen auch immer wieder Anstoß zu ganz neuen interdisziplinären Projekten in den Bereichen Biophysik und Medizinphysik gegeben, die auf diese Weise von der technologischen Innovationskraft der Elementarteilchenphysik profitieren. Die lokale Infrastruktur eröffnet den Studierenden attraktive Arbeitsmöglichkeiten auch an der Heimatuniversität und verschafft ihnen exzellente Berufschancen im Feld der Elementarteilchenphysik und in der industriellen Forschung und Entwicklung.

An fast allen der genannten Universitätsstandorte und Forschungseinrichtungen sind Theoriegruppen angesiedelt. Die enge Kooperation zwischen Theorie und Experiment steht an deutschen Universitäten und Forschungszentren in einer guten und erfolgreichen Tradition. Die theoretische Elementarteilchenphysik in Deutschland deckt dabei das gesamte Spektrum von der experimentnahen Phänomenologie und der *Computational Physics* über die Entwicklung und Untersuchung neuer theoretischer Ansätze bis hin zur mathematischen Physik ab.

4.2 Personal

Die Personalstruktur der Elementarteilchenphysik in Deutschland ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Diese und alle anderen hier zusammengestellten Personalstatistiken stammen aus einer zu Beginn des Jahres 2002 durchgeführten repräsentativen Umfrage unter 18 Universitäten, den beiden Max-Planck-Instituten und DESY. Sie geben den Stand zum Stichtag 1. Januar 2002 wieder. Die Umfrage zeichnet somit ein aktuelles Bild des Fachs in Deutschland. Die deutschen Mitarbeiter am CERN sowie die Helmholtz-Zentren GSI Darmstadt und Forschungszentrum Karlsruhe wurden nicht in diese Studie aufgenommen.

Es gibt derzeit insgesamt 124 Professuren im Bereich der Elementarteilchenphysik, die zum größten Teil den Physikfakultäten in den Universitäten angehören. 26 Professuren bzw. äquivalente Stellen finden sich an den beiden Max-Planck-Instituten sowie bei DESY. Die Gruppe der 260 unbefristet angestellten Wissenschaftler, vorwiegend Experimentalphysiker, garantiert Kontinuität beim Betrieb von Experimenten und der aufwändigen apparativen Infrastruktur. Mit 168 Wissenschaftlern findet sich die Mehrheit dieser Gruppe an den drei Forschungseinrichtungen. Entsprechend der grundgesetzlich verankerten Pflicht der Bundesländer zur Grundfinanzierung der Forschung auch im Bereich der Elementarteilchenphysik werden die fest angestellten Mitarbeiter an den Universitäten ebenso wie die Universitätsprofessoren von den Landesministerien über die Universitäten finanziert.

Eine besonders wichtige Mitarbeitergruppe sind die befristet angestellten Wissenschaftler („Post-Docs“). Sie bilden die junge Garde, die mit großem persönlichen Einsatz in einer wichtigen Phase ihrer wissenschaftlichen Karriere das Feld mit neuen Ideen voranbringt. Insgesamt 288 Physikerinnen und Physiker an den befragten Instituten und Zentren können dieser Gruppe zugeordnet werden. Die Finanzierung der Post-Docs ist gemischt und erfolgt durch die Universitäten, die Verbundforschung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung BMBF (Drittmittel), die Forschungszentren, die Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG sowie die Alexander von Humboldt-Stiftung.

Die Elementarteilchenphysik ist beim Bau von Beschleunigern und Experimenten wie kaum ein anderes Feld auf kompetente und erfahrene Ingenieure und Techniker aus den Bereichen Feinmechanik, Elektronik, Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnologie angewiesen. Hier weisen naturgemäß die Max-Planck-Institute und DESY mit insgesamt 366 Mitarbeitern den größten Bestand auf, jedoch sind auch die Universitäten mit insgesamt 169 Personalstellen auf diesem Sektor den Anforderungen gewachsen. Auch das technische Personal der Universitäten wird nahezu ausschließlich durch die Landesministerien finanziert.

Ein kontinuierlicher Strom von Nachwuchswissenschaftlern ist durch eine erfreulich hohe Zahl von Diplomanden (183) und Doktoranden (439) gewährleistet. Beim Vergleich dieser Zahlen – die sich wieder nur auf die Umfrage beziehen und für die gesamte Teilchenphysik in Deutschland höher liegen – ist zu beachten, dass eine Dissertation etwa drei Jahre in Anspruch nimmt. Doktoranden und insbesondere Diplomanden sind in ihrer großen Mehrheit den Universitäten zugeordnet.

Am Europäischen Forschungszentrum CERN in Genf sind derzeit 17 experimentelle und theoretische Physiker auf Forschungsstellen, 134 angewandte Physiker und Ingenieure, 43 Post-Docs (dort als „Fellows“ bezeichnet), 16 Studenten (Diplomanden und Doktoranden) sowie 62 technische Angestellte aus Deutschland beschäftigt.

4.3 Finanzierung

Der föderale Aufbau des Bereichs Bildung und Forschung in der Bundesrepublik Deutschland bedingt eine relativ komplizierte Finanzierungsstruktur, fördert jedoch auf

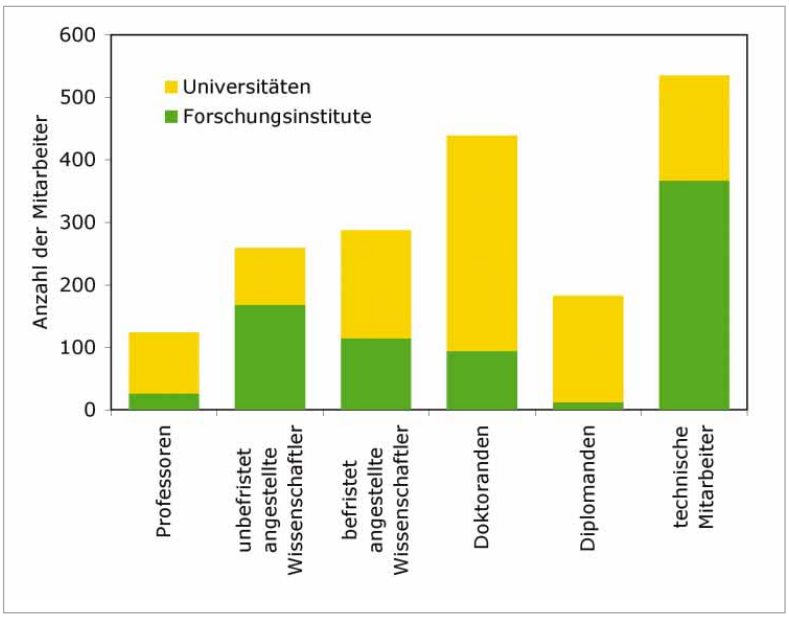


Abb. 4.2: Personalstruktur in der Elementarteilchenphysik in Deutschland aufgeschlüsselt nach Mitarbeitergruppen (Stand 1. Januar 2002)

diese Weise auch einen gewissen Wettbewerb unter den Standorten. Die Grundlast der Finanzierung der Elementarteilchenphysik an den Universitäten wird von den Fachministerien der Bundesländer getragen. Hierbei handelt es sich vor allem um beträchtliche Personalmittel sowie um Grundausstattung, Werkstätten und lokale Infrastruktur. Der deutsche Beitrag zu CERN wird vom BMBF finanziert, ebenso 90 % der Kosten von DESY, während etwa 10 % der Kosten für DESY Hamburg vom Land Hamburg und für DESY Zeuthen vom Land Brandenburg getragen werden. Die Finanzierung der Max-Planck-Gesellschaft teilen sich Bund und Länder.

Unter Verwendung von Personalstandardsätzen entsprechen die Professuren sowie die Stellen für die fest angestellten Wissenschaftler und technischen Mitarbeiter an den Universitäten und den deutschen Forschungseinrichtungen einem finanziellen Aufwand von insgesamt etwa 36 Millionen Euro pro Jahr. Hinzu kommen schwer quantifizierbare Aufwendungen für Raumressourcen, Labors und EDV-Ausstattung.

Diese beträchtlichen Grundausstattungen erlauben jedoch nicht den Aufbau und den laufenden Betrieb der Experimente an den großen Beschleunigern. Um diese zu gewährleisten, wurde in Deutschland das hervorragend funktionierende Instrument der Verbundforschung geschaffen.

Das BMBF fördert im Rahmen seines Förderschwerpunkts „Großgeräte der physikalischen Grundlagenforschung“ speziell den Aufbau und den Betrieb der Experimente an den beiden großen Forschungszentren CERN und DESY. Abbildung 4.3 zeigt die zeitliche Entwicklung dieser Förderung im Verlauf der letzten 25 Jahre. Das Wechselspiel der Finanzierung der großen Beschleunigerprojekte (SPS, LEP, HERA, LHC) bei CERN und DESY ist deutlich zu erkennen. Die gegenwärtige Förderung für Universitäten und Max-Planck-Institute im Rahmen der Verbundforschung beträgt etwa 13 Millionen Euro pro Jahr.

Neben Eigenmitteln der Universitäten und der Verbundforschung hat sich die Elementarteilchenphysik weitere Finanzierungsquellen erschlossen. So gibt es eine Reihe von Graduiertenkollegs und Finanzierungen von Theoriegruppen durch die DFG sowie Mittel der Europäischen Union für das „DataGrid“-Projekt im 5. Rahmenprogramm. Ein Interesse an weitergehender Beteiligung am 6. Rahmenprogramm der EU hat die europäische Gemeinschaft der Teilchenphysikerinnen und -physiker durch Einreichung einer Reihe von *Expressions of Interest* klar demonstriert.

4.4 Wissenschaftlicher Nachwuchs und Zukunftsperspektiven

Als Wissenschaft der fundamentalen Teilchen und ihrer Wechselwirkungen baut die Elementarteilchenphysik auf der gesamten Vielfalt von Erkenntnissen der klassischen und der modernen Physik auf. Eine qualitativ hochwertige Physikausbildung mit dem Diplom als erstem berufsqualifizierenden Abschluss bildet somit die unverzichtbare Grundlage für eine erfolgreiche Arbeit auf diesem Gebiet. Eine erste Entscheidung für das Feld der Elementarteilchenphysik trifft ein Studierender mit der Wahl des Themas der Diplomarbeit. Die erste weitestgehend selbstständige wissenschaftliche Arbeit ist die daran anschließende Dissertation. Eine Darstellung der zeitlichen Entwicklung von Dissertationen, Diplomen und Staatsexamina im Fach Elementarteilchenphysik in Deutschland zeigt Abbildung 4.4.

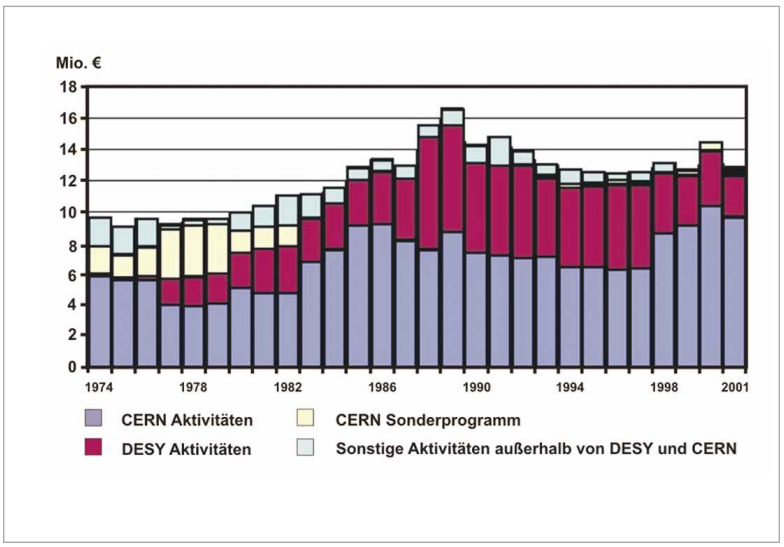


Abb. 4.3: Förderung der Elementarteilchenphysik im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunkts „Großgeräte der physikalischen Grundlagenforschung“ in Millionen Euro in den Jahren 1974 bis 2001. Aus: Ergebnisbericht BMBF-Förderschwerpunkt „Großgeräte der physikalischen Grundlagenforschung“, 2002.

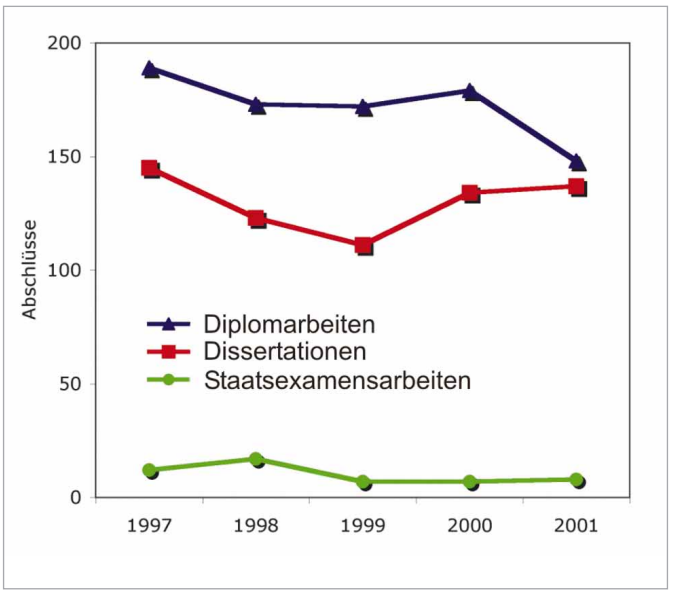


Abb. 4.4: Zeitlicher Verlauf von akademischen Abschlüssen im Bereich der Elementarteilchenphysik in Deutschland. Von oben nach unten: Diplome, Dissertationen, Staatsexamina.

Die Diplome zeigen einen Abfall von knapp unter 200 pro Jahr – ein Wert, der bis zum Jahr 2000 konstant blieb – auf 148 Absolventen im Jahre 2001. Diese Beobachtung deckt sich qualitativ mit einer Reduktion der Anzahl der Studienanfänger um fast 50 % in der Mitte der 1990er Jahre, wenn auch die Abnahme der Anzahl von Diplomen in der Elementarteilchenphysik deutlich geringer ausgefallen ist als die der Neuanfänger im Fach Physik. Der Abwärtstrend in den Anfängerzahlen konnte inzwischen durch vielfältige Werbung für die Physik als Schlüsselwissenschaft (insbesondere auch im „Jahr der Physik 2000“) gebrochen werden: In ganz Deutschland steigt die Anzahl der Studienanfänger in der Physik wieder deutlich an.

Der gegenwärtige Anstieg der Dissertationen ist noch auf die relativ schlechte Arbeitsmarktlage für Diplomphysiker in der zweiten Hälfte der 1990er Jahre zurückzuführen. Damals entschieden sich viele Absolventen für die Promotion. Die jetzt fallenden Diplomzahlen lassen eine kritische Situation bei den Promotionen in den Jahren 2003 bis etwa 2006 erwarten. Mit Beginn der Datennahme am LHC und parallel dazu einer erwünschten Realisierung des TESLA-Projekts wird wegen der steigenden Anfängerzahlen jedoch genügend wissenschaftlicher Nachwuchs für diese anspruchsvollen Projekte zur Verfügung stehen.

Abbildung 4.4 enthält auch die Zahlen der Staatsexamensarbeiten im Bereich Elementarteilchenphysik. Ihre Zahl ist gering, sollte jedoch zukünftig erhöht werden. Lehrer mit einer vertieften Ausbildung auf diesem Gebiet sind wichtige Multiplikatoren für das Fach und die Grundlagenforschung in Schule und Gesellschaft.

Die Habilitation hat traditionell im Bereich der Elementarteilchenphysik eine weniger starke Bedeutung als in anderen, besonders geisteswissenschaftlichen Fächern. Die äquivalente Qualifikation erfolgt häufig auch auf alternativen Wegen an Großforschungszentren oder im Ausland. Trotzdem ist die Zahl der Habilitationen ein Indikator für das Interesse des wissenschaftlichen Nachwuchses an einer langfristigen oder gar lebenslangen Beschäftigung mit der Elementarteilchenphysik. Insgesamt 94 Habilitationen wurden in den Jahren 1991 bis 2000 deutschlandweit durchgeführt, also etwa zehn pro Jahr. Grundsätzlich wird die Bedeutung dieser Qualifikation durch die Vorgaben des neuen Hochschulgesetzes jedoch noch mehr abnehmen.

Die wohl wichtigste Frage für den wissenschaftlichen Nachwuchs ist die nach den zu erwartenden Beschäftigungsmöglichkeiten im Fach Elementarteilchenphysik. In diesem Zusammenhang wurden die deutschen Universitäten und Forschungseinrichtungen nach der Anzahl der zu erwartenden freien Dauerstellen in den kommenden zehn Jahren befragt. Abbildung 4.5 zeigt das Ergebnis dieser Umfrage.

Bei der Interpretation dieser Zahlen ist zu beachten, dass sie die gegenwärtige Sicht der Dinge repräsentieren.

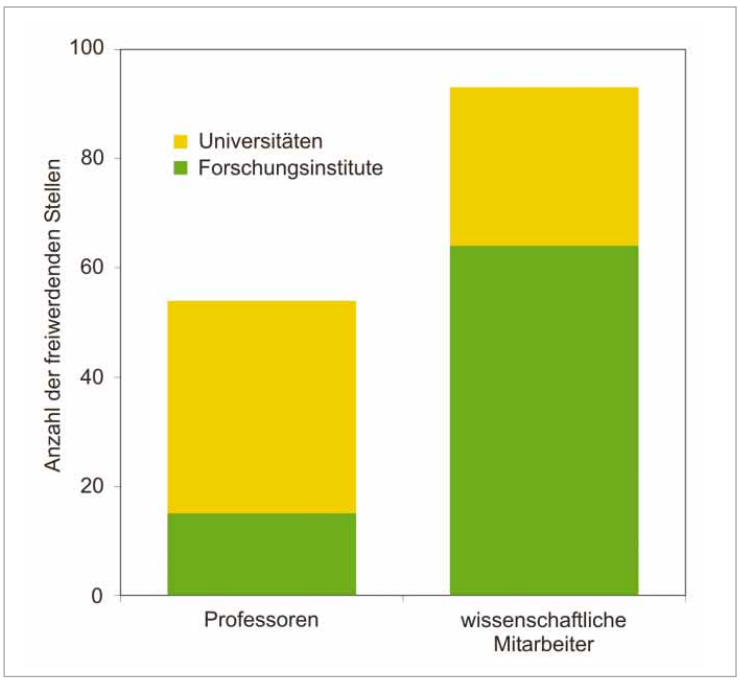


Abb. 4.5: Erwartete Anzahlen von Dauerstellen in den Jahren 2002 bis 2011 im Bereich Elementarteilchenphysik aufgeschlüsselt nach Universitäten und Forschungseinrichtungen sowie nach Professuren (C4 und C3) und Wissenschaftlerstellen

Insbesondere an den Universitäten ist im Rahmen von globalen Strukturplanungen und Profilbildungsprozessen unter Umständen mit Verschiebungen zu rechnen. Basierend auf dem Ergebnis der Umfrage sind im Bereich der Elementarteilchenphysik insgesamt 54 Professuren und 93 wissenschaftliche Dauerstellen im Verlauf der nächsten zehn Jahre zu besetzen. Dies entspricht etwa 15 Stellen pro Jahr. Um die anstehenden experimentellen und theoretischen Herausforderungen bei LHC und TESLA zu meistern, muss dieses personelle Gesamtvolumen für die Elementarteilchenphysik mindestens erhalten bleiben. Die notwendige Zahl an Besetzungen bietet für etwa 10 % der zu erwartenden Doktoranden die Perspektive einer Dauerbeschäftigung im Fach Elementarteilchenphysik an einer Universität oder einer Forschungseinrichtung.

Die Elementarteilchenphysik in Deutschland weist insgesamt eine ausgesprochen leistungsfähige Struktur auf und ist für die großen Zukunftsprojekte gerüstet. DESY als eng mit den Universitäten verbundenes nationales Forschungszentrum mit internationaler Ausrichtung ist eine Besonderheit mit weltweiter Ausstrahlungskraft und hoher Attraktivität gerade auch für den wissenschaftlichen Nachwuchs im eigenen Land. Mit den neuen Beschleunigern LHC und TESLA bietet das Feld spannende Projekte für die mittel- und langfristige Zukunft. Die engagierten und qualifizierten Nachwuchsphysikerinnen und -physiker auf diesem Gebiet müssen genügend permanente Beschäftigungsmöglichkeiten im akademischen Bereich erhalten. Frei werdende Stellen an Forschungseinrichtungen und Universitäten müssen für eine effektive Nutzung der neuen Projekte konsequent für das Feld erhalten bleiben.

5 · AUSSTRAHLUNG

Obwohl die Teilchenphysik in Ausrichtung und Zielsetzung eine reine Grundlagenwissenschaft ist, ergeben sich aus den oft sehr hohen technischen Anforderungen an die Experimente, den mathematischen Herausforderungen physikalischer Theorien, der Entwicklung von Computern und numerischen Methoden sowie den statistischen Verfahren zur Analyse der Daten viele „spin-off"-Entwicklungen und Anwendungen. Das beste Beispiel jüngeren Datums ist das *World Wide Web,* das – von Teilchenphysikern bei CERN in Genf erfunden – die moderne Informationsgesellschaft revolutioniert hat.

Die Ausstrahlung der technologischen Entwicklungen in der Teilchenphysik auf andere Bereiche steht in einer Tradition mit berühmten Beispielen wie die Verwendung von Röntgenstrahlen in der Medizin, von Beschleunigern in der Strahlentherapie und von Nachweisgeräten in der medizinischen Diagnostik. Den Forschungsgruppen an den Universitäts- und Forschungsinstituten kommt auf diesem Gebiet eine besondere Bedeutung zu. Hier kann – oft in interdisziplinärer Zusammenarbeit – durch gezielte Aufgabenstellung in Diplom- oder Doktorarbeiten eine Fragestellung oder technische Entwicklung angegangen werden, die eine spezielle Weiterentwicklung teilchenphysikalischer Methodik oder Technologie für andere Anwendungsfelder zum Ziel hat.

Ein Punkt, der an vorderster Stelle erwähnt zu werden verdient, ist die Rolle, welche die internationale Zusammenarbeit in der teilchenphysikalischen Grundlagenforschung einnimmt und die selbst im Vergleich mit anderen international arbeitenden Wissenschaftszweigen ohne Parallelen ist. Bereits weit vor Ende des Kalten Kriegs wurde bei CERN und DESY beim Aufbau von Experimenten die Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern und Arbeitsgruppen aus den Staaten des Ostblocks und aus China praktiziert. Ein imposantes Zeugnis davon liefern die Flaggen der Mitgliedsländer am Eingang des CERN (Abb. 5.1).

Die technologischen Herausforderungen der großen Beschleunigeranlagen in der Teilchenphysik stellen unbestrittene Superlative auf den Gebieten der Kryo-, Vakuum- und Supraleitungstechnologie dar. Neben diesen offensichtlichen Anwendungen bewirkt die Teilchenphysik jedoch eine ganze Reihe weiterer Ausstrahlungen und „spin-off"-Entwicklungen, die ihr auf den ersten Blick nicht zwangsläufig zugerechnet werden. Auf diese wird im Folgenden näher eingegangen.

Abb. 5.1: Die Flaggen der 20 Mitgliedsländer des CERN legen ein eindrucksvolles Zeugnis von der internationalen Ausrichtung der Teilchenphysik ab.

5.1 Ausbildung

Studierende, die in der Teilchenphysik ihr Studium abschließen, haben erwiesenermaßen eine vergleichsweise breite Ausbildung erhalten. Diese qualifiziert sie für viele Berufe, in denen Techniken und Methoden benötigt werden, die in der Teilchenphysik Verwendung finden. Darunter befinden sich auch Berufsfelder, die auf den ersten Blick keinerlei Berührungspunkte mit der teilchenphysikalischen Grundlagenforschung besitzen (z. B. Automobilindustrie, Luftfahrt, Banken- und Finanzwesen, Unternehmensberatung, Telekommunikation usw.).

Abhängig vom Zeitpunkt des Eintritts in das Forschungsprojekt können die Arbeitsgebiete von diplomierenden und promovierenden Studenten der experimentellen Teilchenphysik folgendermaßen eingeteilt werden:

- Entwicklung und Test neuer Detektortechnologien;
- Aufbau und Betrieb von Detektoren in einem Experiment;
- Aufbau von Computernetzwerken, Entwicklung von Software zur Steuerung großer Datenflüsse, zur Datenreduktion und zur Datenverteilung;
- Auswertung der Daten, Untersuchung physikalischer Fragestellungen und Entwicklung von Analysemethoden;
- Entwicklung und Betrieb von Beschleunigerkomponenten.

Bei der Entwicklung von neuen Detektoren kommen moderne Verfahren der Mikroelektronik zum Einsatz, die in Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt werden. Das Zusammenspiel einzelner Detektorkomponenten wird in aufwändigen Computersimulationen überprüft und optimiert.

Im technologischen Bereich ist vorausschauende Planung für eine Betriebsdauer der Apparaturen von oft mehr als zehn Jahren notwendig. Die Entwicklung von Prototypen und der Test komplexer Detektorsysteme im Beschleunigerstrahl gehören genauso zum Repertoire der Ausbildung wie die Entwicklung leistungsfähiger Analog- und Digitalelektronik.

Im Softwarebereich umfasst die Ausbildung die Entwicklung verlässlicher Systeme zur Online-Datennahme, objektorientiertes Programmieren, die Erstellung und Bearbeitung großer Programmpakete im Team, die Durchführung von Computersimulationen und die Verwendung statistischer Methoden bei der Analyse der Daten.

Die theoretische Teilchenphysik erzieht die Studierenden zu streng logischem, aber auch unkonventionellem Denken. Sie lernen, schwierige Zusammenhänge zu analysieren und zu reduzieren und sie in handhabbare mathematische Modellsysteme zu fassen. Ein großer Teil der Theoriestudenten befasst sich mit physikalischen Problemstellungen, die nur auf Hochleistungsrechnern unter Einsatz ausgefeilter Programmiertechniken und Computersimulationen zu behandeln sind. Für spezielle Anwendungen werden große Prozessornetzwerke und die zugehörigen Softwareumgebungen zum Teil von den Physikern selbst entwickelt und betrieben.

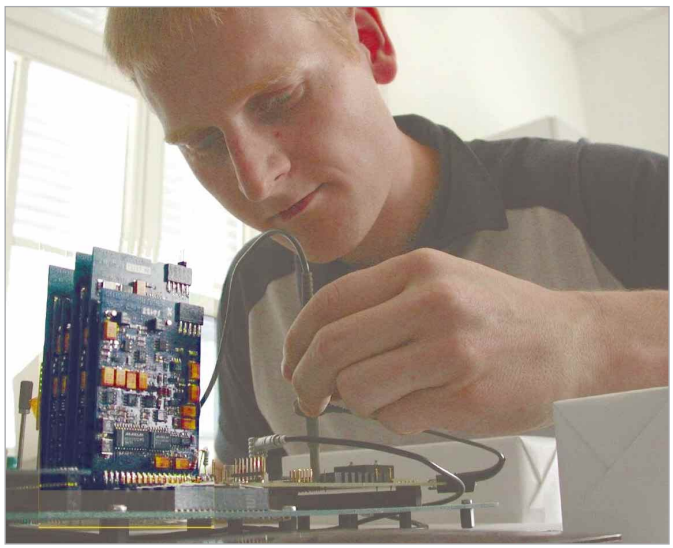


Abb. 5.2: Ausbildung von Studierenden in moderner Detektorelektronik: Studierende der Teilchenphysik erhalten eine für viele Bereiche qualifizierende Ausbildung. Die Entwicklung von Nachweisgeräten und moderner Elektronik findet nicht nur in der Teilchenphysik Anwendung, sondern z. B. auch in biomedizinischen Bereichen.

Nicht zuletzt erfolgt eine Ausbildung im methodischen und sozialen Bereich. An den Großexperimenten der Teilchenphysik arbeiten oft mehrere hundert Physikerinnen und Physiker in internationalen Gruppen, „Kollaborationen" genannt. Die Studierenden lernen daher sehr früh, in einem internationalen Team ihren Platz zu finden und zu behaupten. Dies verlangt die Erarbeitung sinnvoller Aufgabenverteilungen und eine Koordination der Aktivitäten unter Verwendung moderner Kommunikationsmedien (z. B. Videokonferenzen und Projektmanagement über das Internet) über oft große Entfernungen hinweg. Der Umgang mit Fremdsprachen in Kommunikation und Präsentation ist dabei selbstverständlich.

5.2 Informationstechnologie und -verarbeitung

5.2.1 Das World Wide Web – eine Erfindung bei CERN

Ebenso wie die in den 1980er Jahren von den Teilchenphysikern mit vorangetriebene Kommunikation über Email hat auch das *World Wide Web* WWW seinen Ursprung in der Notwendigkeit des Datenaustauschs zwischen Teilchenphysikern. Das WWW wurde im Jahr 1990 von Tim Berners-Lee, einem Computerspezialisten bei CERN, erfunden. Ursprünglich war es für die Gemeinschaft der Hochenergiephysikerinnen und -physiker konzipiert, die in großen internationalen Teams arbeiten und Informationen und Daten zwischen oft weit entfernt liegenden Universitäten und Forschungsinstituten austauschen müssen.

Die erste Software dazu (den *WWW client*) schrieben Tim Berners-Lee und Robert Cailliau, ebenso wie die Kommunikationssoftware und die Spezifikation des *Universal Resource Locator* (URL), des Hypertext-Transferprotokolls (http) und der strukurierten Auszeichnungsprache *Hypertext Mark-up Language* (HTML). Als Übertragungsmedium verwendete man das weltweit bereits existierende Verkabelungsnetz (Internet). Nach seinem ersten Einsatz in der Teilchenphysik hielt das Web rasch auch in anderen Bereichen der Wissenschaft Einzug und wurde schließlich zu dem, wie wir es heute kennen – mit 150 Millionen *hosts* und 300 Millionen Nutzern weltweit (Januar 2002).

5.2.2 Verarbeitung großer Datenmengen und -ströme

Für die elektronische Aufzeichnung und Analyse von Reaktionen an den Großexperimenten der Teilchenphysik müssen die interessanten, meist äußerst seltenen Ereignisse aus einer um viele Größenordnungen höheren Anzahl von weniger interessanten Kollisionen ausgewählt werden.

Was für Konsequenzen sich daraus ergeben, macht das Beispiel des LHC deutlich. Typischerweise liefert der LHC eine Milliarde (10^9) Ereignisse pro Sekunde, wobei pro Zusammenstoß mehr als 100 neue Teilchen entstehen. Der Detektor muss also pro Sekunde 10^{11} Teilchen registrieren und so vermessen, dass eine Auswahl der interessanten Ereignisse möglich ist. Alle erzeugten Reaktionsprodukte mit der notwendigen Genauigkeit in Richtung, Energie oder Impuls zu messen, erfordert eine Kombination verschiedenster hochauflösender Nachweissysteme, die in großvolumige, starke Magnetfelder eingebettet sind. Die „Daten“ eines Experiments werden durch die Detektorelektronik bereitgestellt, wobei jeder der über 100 Millionen Nachweiskanäle vermessen und kalibriert werden muss. Die vom Detektor aufgenommene Datenrate beträgt somit eine Million Gigabyte pro Sekunde (Gbyte/s). Um diesen Informationsfluss in technisch akzeptablen Grenzen zu halten, muss bereits „online“ in mehreren Stufen eine erste Auswahl von Ereignissen (1 aus 200 000) getroffen werden. Die ausgewählten Reaktionen werden dann mit einer Rate von 5 Gbyte/s in „Prozessorfarmen“ weiterverarbeitet und aussortiert. Hundert Ereignisse pro Sekunde (100 Mbyte/s) werden an die zentrale „offline“-Datenspeicherung im Rechenzentrum weitergegeben.

Durch Offline-Analyse muss schließlich eine Auswahl von 1 aus 100 Milliarden (10^{11}) erfolgen, um interessante Ereignisse zu finden, die neuen Phänomenen zuzuordnen sind. Auf dem Weg dorthin ist eine komplexe Datenverteilung, -analyse und -speicherung notwendig.

Nach der Online-Datenreduktion und der ersten Datenkomprimierung fällt eine Gesamtdatenmenge von mehreren Tausend Terabyte (Petabyte, d. h. 10^{15} Byte) pro Jahr an, die für wissenschaftlich interessante Fragestellungen zur Analyse herangezogen wird. Diese „Rohdaten“ werden zunächst im Forschungszentrum selbst rekonstruiert und dann in Universitäten und Forschungsinstituten der ganzen Welt analysiert. Um sicherzustellen, dass die notwendigen Ressourcen für die Datenanalyse vorhanden sind, benötigt jedes Experiment ein weltweit verteiltes Datenbank- und Rechnersystem mit Datenspeichern im Petabyte-Bereich, einer großen Zahl von Rechnern (einige Zehntausend Prozessoren) und einem Zugangssystem für mehrere Tausend Nutzer, die gleichzeitig mit den Daten arbeiten können.

Die Grundlage des LHC-Computings bildet ein hierarchisches System mit verschiedenen Ebenen („Tiers“). In diesem Modell findet die Speicherung der Experimentdaten und die Rekonstruktion am Tier-0-Zentrum bei CERN statt. Die Analyse und die Durchführung von Ereignissimulationen sind Aufgabe der regionalen Tier-1-Zentren, gefolgt von nationalen Tier-2-Zentren, Institutsrechnern (Tier-3) und lokalen Arbeitsplatzrechnern (Tier-4). Diese Struktur wird folgenden Rahmenbedingungen gerecht:

- die intellektuellen Beiträge der Physikerinnen und Physiker überall auf der Welt sollen in die Untersuchung der Daten eingebunden werden, ohne dass alle sich am selben Ort (in diesem Fall CERN) befinden müssen;
- alle Wissenschaftler müssen unabhängig vom Standort den gleichen Zugang zu den Daten haben;
- der Zugang zu den Daten muss transparent und so effizient wie möglich sein.

Ein regionales Tier-1-Zentrum wird derzeit am Forschungszentrum in Karlsruhe installiert.

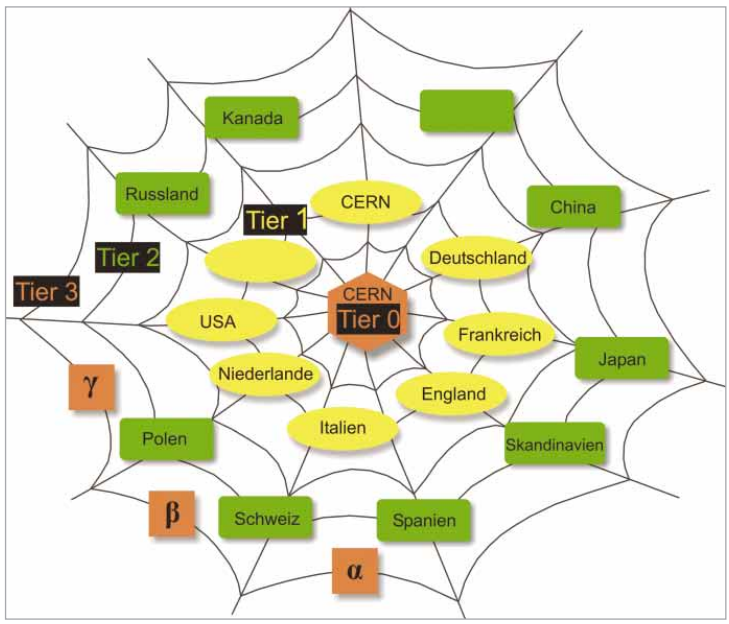


Abb. 5.3: Die in den LHC-Experimenten aufgezeichneten Datenmengen betragen mehrere Tausend Terabyte pro Jahr. Die Daten sollen vielen Nutzern gleichzeitig zur wissenschaftlichen Analyse zur Verfügung stehen. Diese Möglichkeit bietet das „GRID-Computing“, bei dem Daten- und Rechnerzentren („Tiers“) mit abgestufter Kapazität mit großer Bandbreite weltweit vernetzt sind.

Um den Herausforderungen zu begegnen, welche die enormen Datenströme der Teilchenphysikexperimente an die Datenverarbeitung stellen, kam die Idee des GRID-Computings gerade recht: Das GRID-System enthält alle Elemente, die notwendig sind, um die Computerprobleme der zukünftigen Teilchenphysikexperimente anzugehen. Dem GRID-Computing liegt der Gedanke zugrunde, dass über ein weltumspannendes Netzwerk gegen ein Entgelt überall und jederzeit Rechenleistung zur Verfügung stehen soll – ähnlich wie bei einem Stromnetz. Allerdings hinkt dieser Vergleich, da die verschiedenen Computer im GRID nicht miteinander kompatibel sein müssen. Während es beim elektrischen Strom nur wenige Grundeigenschaften gibt (Spannung, Stromstärke, Frequenz), sind beim Handel und Austausch von Rechenleistung wesentlich mehr Parameter zu berücksichtigen: Architektur des Zielrechners, dessen Betriebs- und Managementsystem, die Anbindung an das Netzwerk u. a. Das GRID-Computing soll die koordinierte Nutzung von Ressourcen ermöglichen, um Aufgaben zu lösen, die sich in dynamischen, verteilten Organisationen stellen – wenn etwa Wissenschaftler in Forschungszentren oder Mitarbeiter in multinationalen Unternehmen an verschiedenen Standorten gemeinsam an einer Aufgabe arbeiten und dabei verteilte Ressourcen nutzen. Die Nutzung bezieht sich dabei auf mehr als nur Rechenleistung und Daten, sie umfasst auch Netzwerke, Datenarchivspeicher, Visualisierungssysteme und Spezialrechner, die nicht an jedem Ort betrieben werden können. Das GRID-Computing für die Datenflüsse der LHC-Experimente dient als Modell für andere Wissenschafts- und Gesellschaftsbereiche, die große Datenmengen benutzen und verwalten müssen.

5.2.3 Parallelrechner

Eine sehr erfolgreiche Methode, die Wissenschaftler zur Untersuchung teilchenphysikalischer Fragestellungen entwickelt haben, ist die Simulation von Theorien auf Computern. Bei derartigen Rechnungen kommt es darauf an, eine möglichst große Anzahl von gleichartigen Operationen sehr schnell durchzuführen. Der Bedarf an Rechenleistung in Deutschland wird derzeit auf 10 bis 20 Teraflops geschätzt, also auf 10 bis 20 Billionen Rechenoperationen pro Sekunde. Eine solche Rechenleistung, die etwa dem Zehn- bis Zwanzigtausendfachen eines heutigen Standard-PCs entspricht, kann nicht von einem einzelnen Prozessor erbracht werden. Vielmehr müssen viele Prozessoren in einem leistungsfähigen Netzwerk zusammengeschaltet werden.

Um solche massiv-parallelen Rechner preisgünstig realisieren zu können, entwerfen, entwickeln und bauen die Teilchenphysiker solche Maschinen zum Teil selbst. Dadurch entstehen spezialisierte Supercomputer im Multi-Teraflop-Bereich, die eine Leistung erbringen, welche derjenigen kommerzieller Hochleistungsrechner entspricht – allerdings zu einem weitaus günstigeren Preis. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass auch die Industrie an diesen Entwicklungen interessiert ist und prüft, ob sie bestimmte Konzepte – insbesondere im Bereich der schnellen Netzwerktechnik – übernehmen kann.

Um solche Höchstleistungsrechner auch in Deutschland für die Forschung zur Verfügung zu stellen, beteiligt sich DESY zusammen mit dem *John von Neumann Institute for Computing* (NIC, eine Kooperation zwischen DESY, Standort Zeuthen, und dem Forschungszentrum Jülich), dem INFN (Italien) und dem Forschungsinstitut in Orsay (Frankreich) an der Entwicklung von Parallelcomputern vom Typ APE (*Array Processor Experiment,* Abb. 5.4). Diese Rechner sind speziell auf Anwendungen in der Teilchenphysik zugeschnitten. Eingesetzt werden optimierte, selbst entwickelte Prozessoren, die durch eine schnelles und leistungsfähiges dreidimensionales Netzwerk zum Datenaustausch miteinander verbunden sind.

Abb. 5.4: Der APEmille-Parallelrechner während des Aufbaus im Rechenzentrum bei DESY Zeuthen. Auf engstem Raum werden hier 1024 Prozessoren vernetzt, deren Rechenleistung von insgesamt 500 Gigaflops etwa der von 500 heutigen Standard-PCs entspricht. Die Architektur ist für Rechnungen der Gittereichtheorien optimiert, bei denen komplizierte quantenmechanische Systeme zerlegt über die Prozessoren verteilt werden.

5.3 Beschleuniger- und Detektortechnologie

Wilhelm C. Röntgen entdeckte die nach ihm benannten Röntgenstrahlen 1895 bei Experimenten zur Natur der „Kathodenstrahlung“, die in Vakuumröhren auftritt, wenn diese elektrischen Feldern ausgesetzt sind. Diese grundlegenden Fragen eröffneten damals den Weg zur Atomphysik. Weitere prominente Beispiele für Anwendungen aus dem Bereich der Beschleuniger- und Detektortechnologie sind die Verwendung von Betatron- und Linearbeschleunigern zur Strahlentherapie in Krankenhäusern und der Positronenemission (PET) in der Computertomographie zur Diagnose von Erkrankungen. An den für die Teilchenphysik entwickelten Hochenergiebeschleunigern ist die Synchrotronstrahlung entdeckt worden, die mittlerweile ein äußerst fruchtbares Werkzeug auf vielen Wissens- und Anwendungsgebieten geworden ist. Die Verleihung des Nobelpreises 1992 an Georges Charpak für seine herausragenden Arbeiten zur Detektorphysik würdigte die Bedeutung der Detektorentwicklung für die Teilchenphysik und den Einsatz in anderen Bereichen, wie z. B. der Biomedizin.

Die Bemühungen um den medizinischen Einsatz der aus der Teilchenphysik hervorgegangenen Beschleunigertechnik haben bis in jüngste Zeit ihre Fortsetzung gefunden und sind auch von anderen Forschungsrichtungen aufgegriffen worden. So treibt z. B. die Gesellschaft für Schwerionenforschung GSI in Darmstadt in Zusammenarbeit mit italienischen (TERA) und österreichischen (MedAUSTRON) Partnern den Einsatz von Ionenstrahlen zur Tumorbestrahlung voran.

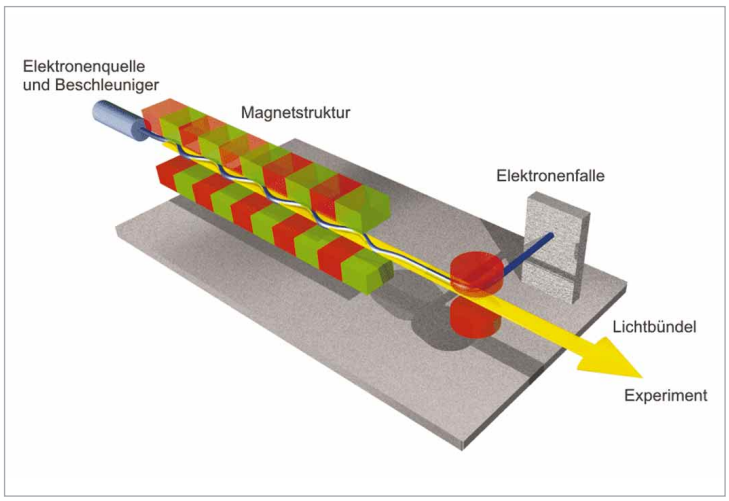


Abb. 5.5: Das Selbstverstärkungsprinzip eines Freie-Elektronen-Lasers. Elektronen werden von einer speziellen Magnetstruktur auf einen Schlingerkurs gezwungen und senden dabei Licht aus. Das Licht wechselwirkt wiederum mit den Elektronen und sorgt dafür, dass sie im Gleichtakt schlingern. Bei genügend hoher Elektronenenergie entsteht Laserlicht im Röntgenbereich.

Freie-Elektronen-Laser im Röntgenbereich

Der bis zum harten Röntgenbereich durchstimmbare Freie-Elektronen-Laser (FEL), wie er im Rahmen des Linearcolliderprojekts TESLA vorgeschlagen wird, stellt ein aktuelles Beispiel für die Ausstrahlung der Elementarteilchenphysik in andere Wissenschaftsbereiche dar. Technisch wird das Laserlicht in einem Selbstverstärkungsverfahren erzeugt, indem Elektronen nach der Beschleunigung durch eine spezielle Magnetstruktur – einen Undulator – geleitet werden (Abb. 5.5). Die Entwicklung dieses Röntgenlasers wurde erst durch die Fortschritte beim Bau supraleitender Beschleuniger möglich, die ihrerseits aus den Herausforderungen durch die offenen Fragen in der Teilchenphysik entstanden.

Die Synergie, die durch die gemeinsame Entwicklung der Technologie erzielt werden konnte, hat bereits dazu geführt, dass die seit 1997 am DESY betriebene TESLA-Testanlage nicht nur als Testbett für den Beschleuniger, sondern auch für den Laser fungiert. Es konnte bereits gezeigt werden, dass das Selbstverstärkungsprinzip funktioniert und dass das Licht die erwartete Kohärenz und Energieschärfe besitzt. Weltweit erstmals wurde Laserlicht im Wellenlängenbereich von 80 bis 180 nm erzeugt. Noch im Jahr 2002 wird die Energie des Linearbeschleunigers der Testanlage auf 1 GeV erhöht, um noch tiefer in den Röntgenbereich einzudringen. Ab 2004 soll die Anlage Nutzern aus aller Welt zur Verfügung stehen.

Abb. 5.6: Blick auf die Magnetstruktur des Freie-Elektronen-Lasers an der TESLA-Testanlage

Beschleunigerunterstützte Energiegewinnung

Eine viel versprechende Anwendung von Teilchenbeschleunigern ist ihre Verwendung in Verbindung mit Kernreaktoren zur Erzeugung sauberer und sicherer Kernenergie. Die dahinter stehende Idee ist, die zur Kernspaltung notwendigen Neutronen von einem Teilchenbeschleuniger produzieren zu lassen. Als Spaltelement kann in dem Fall Thorium anstelle von Uran benutzt werden, was viele Vorteile hat und Kernschmelzunfälle wie den von Tschernobyl unmöglich macht. Die Kettenreaktion kann ohne Neutronenzufuhr durch den Beschleuniger nicht weiter bestehen – ein weiterer Sicherheitsfaktor. Die durch die Kernspaltung gewonnene Energie ist um ein Vielfaches höher als die vom Beschleuniger benötigte, weshalb diese Entwicklung den Namen *Energy Amplifier* trägt. Das vorgeschlagene Konzept bietet auch die Möglichkeit, radioaktiven Abfall durch Umwandlung langlebiger Kerne in kurzlebige zu beseitigen.

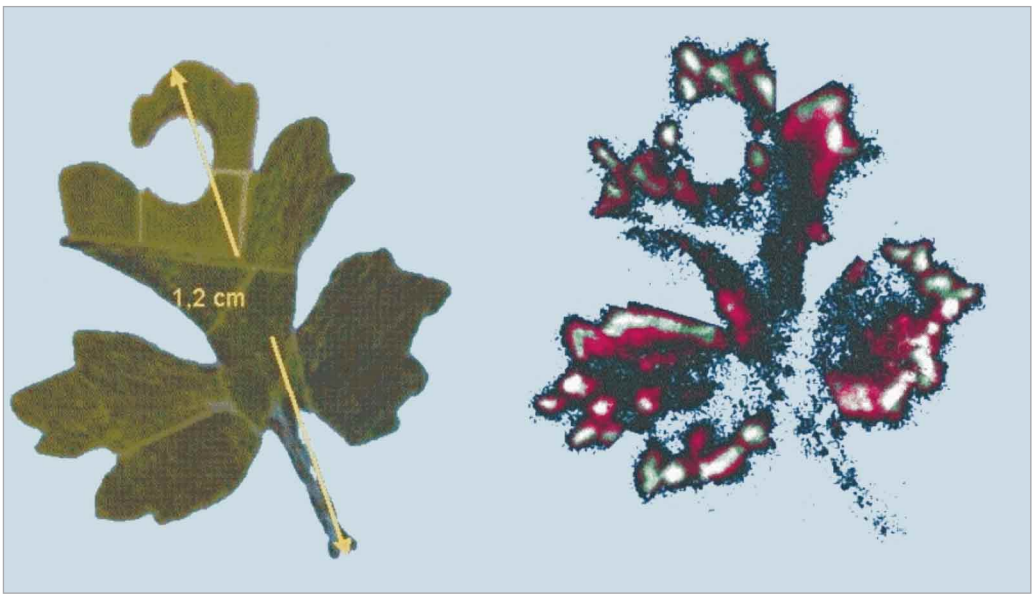


Abb. 5.7: Autoradiogramm eines mit Tritium markierten Blatts, aufgenommen mit einem Pixeldetektor

Detektoren für biomedizinische Anwendungen

Mit szintillierenden Faserdetektoren, die für Experimente der Teilchenphysik entwickelt wurden, lassen sich Strahlungsdosisfelder ortsgenau vermessen. Diese genau zu kennen, ist für die Anwendung von Radioaktivität von großer Wichtigkeit, so z. B. in der Brachytherapie von Blutgefäßen („endovasale Brachytherapie“) oder von Augentumoren, bei denen jeweils eine kleine, nahe („brachy“) an den Tumor herangeführte radioaktive Quelle diesen direkt bestrahlt und vernichtet. Zur Planung und Vorbereitung solcher Bestrahlungsbehandlungen werden Simulationsprogramme eingesetzt, die ursprünglich in der Teilchenphysik zur Studie und Optimierung von Detektoren entstanden.

Für den Einsatz unmittelbar am Ort der Teilchenkollisionen in den Großdetektoren bei LHC und Linearcollidern wurden so genannte Pixeldetektoren entwickelt, die inzwischen auch in der biomedizinischen Bildgebung und in der Proteinkristallographie mit Synchrotronstrahlung neue Möglichkeiten eröffnen. In der Radiographie erlauben die Pixeldetektoren die vollständig digitale Bildgebung, da die eintreffenden Röntgenquanten in jeder Pixelzelle des Detektors einzeln nachgewiesen und dabei gezählt werden können – ein „spin-off“, der direkt aus den Entwicklungen für die LHC-Experimente kommt. Der für die Biologie sehr interessante, zeitaufgelöste autoradiographische Nachweis von radioaktivem Tritium (Abb. 5.7), das als Radiomarker in lebenden Zellen den Wasserstoff ersetzt, ist mit ortsauflösenden Halbleiterdetektoren, Avalanche-Gas-Detektoren oder Szintillationsdetektoren in Verbindung mit Bildverstärkern möglich geworden – alles Entwicklungen aus der Teilchenphysik. Um Teilchen großflächig nachweisen zu können, wurden für die Experimente bei HERA und LHC mikrostrukturierte Gasdetektoren entwickelt, die ebenfalls für die Bildgebung in der Radiographie Verwendung finden (Abb. 5.8).

Diese Entwicklungen haben stark von dem enormen Fortschritt durch die Verwendung integrierter Elektronik

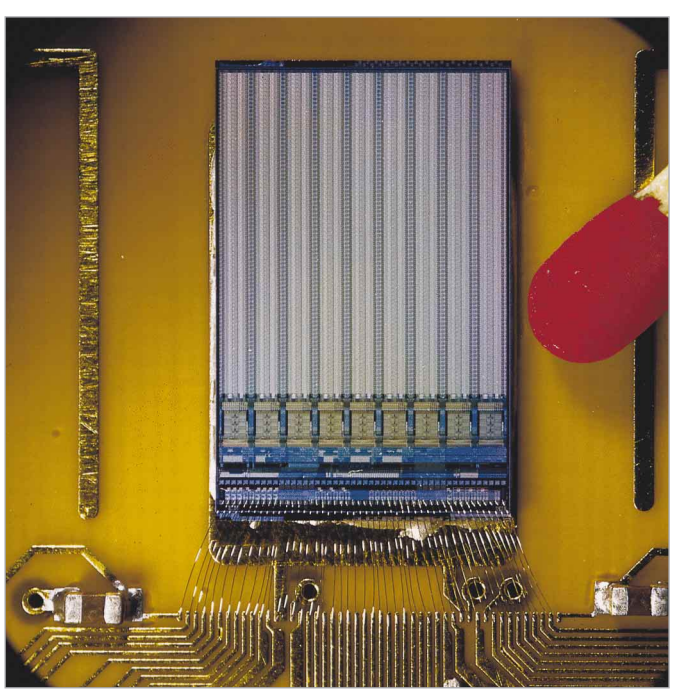


Abb. 5.9: Die Entwicklung integrierter Elektronik für Detektorsysteme der Teilchenphysik und Biomedizin erfolgt in Universitätsgruppen. Der abgebildete Chip wurde für den ATLAS-Pixeldetektor entwickelt.

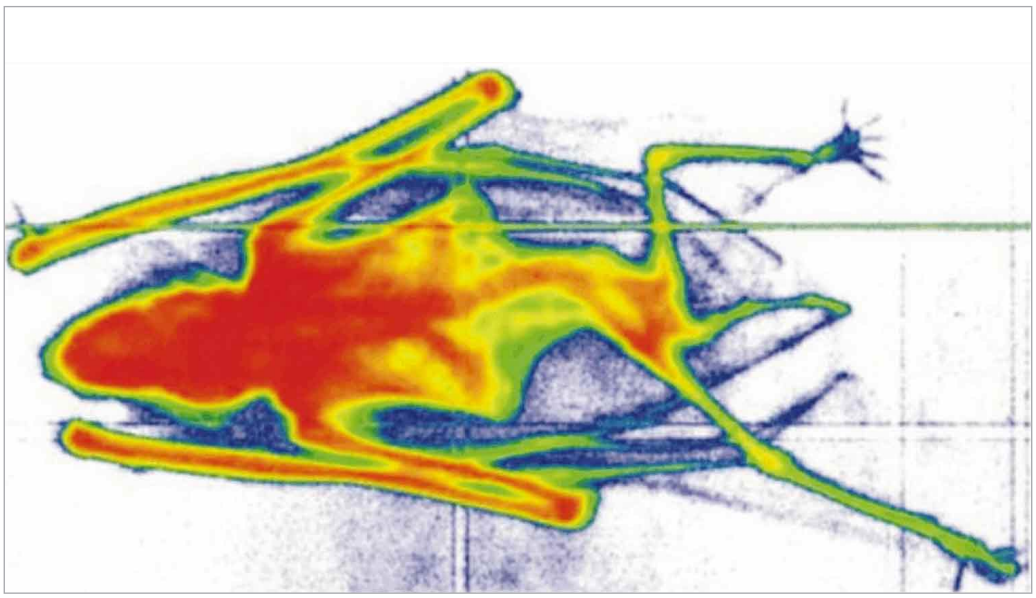


Abb. 5.8: Radiographische Aufnahme einer Fledermaus mit einem Mikrostreifen-Gasdetektor

profitiert, die seit etwas mehr als zehn Jahren auch Entwicklern an Universitäten und Labors zu erschwinglichen Preisen zur Verfügung steht. An mehreren Universitäten wurden Chipentwicklungslabors aufgebaut, an denen spezielle Elektronik sowohl für Detektoren der Teilchenphysik als auch für biomedizinische oder andere Anwendungen entworfen wird.

5.4 Öffentlichkeitsarbeit

Die Frage nach den elementaren Bausteinen der Materie, den fundamentalen Kräften und dem Ursprung des Kosmos stellen sich – wie vor Jahrtausenden – die Menschen noch heute. Daher kommt im Gebiet der Teilchenphysik der Veranschaulichung und verständlichen Vermittlung der Forschungsergebnisse an die Öffentlichkeit besondere Bedeutung zu. Die wichtigsten Zielgruppen bilden hierbei Schülerinnen und Schüler, Lehrkräfte, Journalisten und die breite Öffentlichkeit. Diese *Outreach*-Aktivitäten vermitteln ein modernes Weltbild der Physik, in dem alles materielle Geschehen im Universum auf wenige fundamentale Prinzipien zurückgeführt werden kann. Außerdem wird die Öffentlichkeit über die Ziele und den Nutzen der Grundlagenforschung an den großen Forschungszentren informiert, mögliche Vorurteile gegenüber Großforschungseinrichtungen werden abgebaut.

Als besonders effektiv haben sich Veranstaltungen erwiesen, bei denen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler selbst den direkten Kontakt mit der Öffentlichkeit suchen. In den letzten Jahren sind hier besonders die Öffentlichkeitswoche „Reise zum Urknall“ 2000 in Berlin, die „DESY EXPO 2000“ in Hamburg sowie die Ausstellung „TESLA – Licht der Zukunft“ 2002 in Berlin zu erwähnen, die insgesamt ca. 150 000 Besucher in ihren Bann zogen. Große Anstrengungen werden auch bei der Entwicklung von Schulmaterialien zur Teilchenphysik unternommen, die mit Hilfe spannend aufbereiteter moderner Forschung dem fallenden Interesse der Schüler an den Naturwissenschaften entgegenwirken sollen. Weitere Aktivitäten bilden öffentliche Vorträge der Wissenschaftler z. B. an Schulen, Veranstaltungen für Schüler („Samstag-Morgen-Physik“, „Schnuppertage“), Lehrerfortbildungen und Ähnliches. Materialien und Vorträge sind frei auf zentralen Webseiten zugänglich oder über diese zu bestellen.

Europaweit ist die Öffentlichkeitsarbeit der Teilchenphysik in die „Europäische Teilchenphysik-Outreach-Gruppe“ eingebettet, in der alle CERN-Mitgliedsstaaten, DESY und die LHC-Experimente vertreten sind. Diese trifft sich zweimal jährlich zum Erfahrungsaustausch sowie zur Koordination von internationalen Projekten.

6 · PERSPEKTIVEN FÜR DIE NÄCHSTEN 15 BIS 20 JAHRE

Der Teilchenphysik ist es gelungen, fundamentale Strukturen der Materie und ihrer Wechselwirkungen aufzudecken. Die gewonnenen Erkenntnisse werden kompakt und transparent im Standardmodell der Teilchenphysik zusammengefasst, das in wesentlichen Zügen zum bleibenden Bestand der Naturerkenntnis gehören wird.

Um das Modell in sich konsistent zu vervollständigen, bedarf es des Higgs-Mechanismus, der für die Massen der fundamentalen Teilchen verantwortlich ist. Die Suche nach Higgs-Teilchen und die experimentelle Erforschung ihrer Eigenschaften ist deshalb eine zentrale Fragestellung der heutigen Teilchenphysik.

Von gleichrangiger Bedeutung ist die über den Rahmen des Standardmodells hinausführende Vereinigung der elektroschwachen und starken Kräfte zu einer einheitlichen Kraft. Für eine solche Vereinigung sprechen überzeugende Hinweise, die sich aus der Fortsetzung von gegenwärtigen Messergebnissen zu hohen Energien in erweiterten Theorien ergeben. Diesem physikalischen Bild könnte eine neue Symmetrie zugrunde liegen – die Supersymmetrie, die Materieteilchen und Kraftfelder in einem einheitlichen Konzept vereinigt. In diesem Fall wird sich bei hohen Energien eine neue Welt von supersymmetrischer Materie öffnen. Möglicherweise stellt die kosmologische Evidenz für dunkle Materie bereits ein indirektes erstes Anzeichen für diese neue Art von Materie dar.

Von höchster physikalischer Attraktivität ist auch die Verbindung von Teilchenphysik und Gravitation. Die Universalvereinigung der teilchenphysikalischen Kräfte mit der Gravitation im Rahmen eines einheitlichen begrifflichen und theoretischen Schemas ist eines der großen Ziele der Physik. Eine derartige Vereinigung würde einen umfassenden Zusammenhang der Gesetzmäßigkeiten des Mikrokosmos mit der zeitlichen Entwicklung und dem gegenwärtigen Bild des Universums offenbaren. Ausgehend von der Supersymmetrie wird derzeit versucht, eine solche Verbindung mit Hilfe von Superstringtheorien herzustellen. Fernziel dieser Bemühungen ist es, ein kohärentes Weltbild zu entwickeln, das von den kleinsten Dimensionen im Mikrokosmos, der Planck-Länge von 10^{-35} m, bis zu kosmischen Dimensionen von 10^{26} m, der Größe des sichtbaren Universums, reicht.

Auf der Basis des in den vorangehenden Kapiteln beschriebenen Status und der Perspektiven der Teilchenphysik, der theoretischen Visionen und experimentellen Optionen sowie der zur Verfügung stehenden Ressourcen wurden folgende Strategie und Empfehlungen für die Weiterentwicklung der Teilchenphysik in Deutschland erarbeitet.

Empfehlung 1: *Höchste Priorität hat die zügige Fertigstellung des am CERN im Bau befindlichen Large Hadron Colliders LHC und der LHC-Detektoren, sodass die Anlage im Jahr 2007 in Betrieb gehen kann.*

Empfehlung 2: *Das nächste internationale Großprojekt der Teilchenphysik soll ein Elektron-Positron-Linearcollider hoher Energie und Strahlintensität sein. Deutschland sollte zu einer solchen Anlage einen signifikanten Beitrag leisten, wo immer in der Welt sie in internationaler Kooperation gebaut wird.*

Empfehlung 3: *Die Bestrebungen, den Elektron-Positron-Linearcollider TESLA in internationaler Kooperation in naher Zukunft bei DESY zu bauen, werden mit Nachdruck unterstützt.*

Empfehlung 4: *Bis zur Fertigstellung des LHC wird die Fortführung der Experimente an HERA und der deutschen Beteiligungen am Tevatron empfohlen. Darüber hinaus sollte im Rahmen der verfügbaren Ressourcen eine Beteiligung an den B-Mesonen-Fabriken sowie an Projekten der Neutrinophysik und Teilchenphysik ohne Beschleuniger ermöglicht werden.*

Empfehlung 5: *Die Forschung und Entwicklung von Beschleuniger- und Detektortechnologien muss kontinuierlich fortgeführt werden.*

Bei einer Umsetzung dieser Empfehlungen wird die Teilchenphysik den Anforderungen an wissenschaftliche Spitzenforschung und innovative Technologieentwicklung sowie an die Ausbildung hoch qualifizierten wissenschaftlichen Nachwuchses auch in Zukunft gerecht werden.

STRATEGY AND RECOMMENDATIONS FOR THE DEVELOPMENT OF PARTICLE PHYSICS IN GERMANY

Particle physics explores the innermost structure of matter, space and time and the fundamental forces of the universe. Initially an outgrowth of atomic and nuclear physics, it developed into a research field on its own through the construction of large particle accelerators in the second half of the 20th century. Particle physics has a long and successful tradition in Germany and, based on current technological and scientific developments, offers outstanding prospects for the future.

Experiments using high-energy particle beams have uncovered the intriguing facts that, in addition to the electrons in the atomic shell, other electron-related leptons exist, and that the protons and neutrons, which form the atomic nucleus, are made up of smaller objects, the quarks. According to our understanding, leptons and quarks are the elementary building blocks of matter as we know it. An equally astounding breakthrough occurred in the study of the fundamental forces. In addition to the long-known gravitational and electromagnetic forces, two other forces were discovered: the weak force, which is responsible for the decay of radioactive nuclei, and the strong nuclear force, which binds quarks together inside protons and neutrons, and which binds the protons and neutrons to each other inside the nuclei. Furthermore, precision measurements of the interactions of leptons and quarks led to the impressive confirmation of the theoretical prediction that the electromagnetic and weak forces are actually different manifestations of the same force. The knowledge of the outstanding role of symmetry and symmetry breaking in the microscopic world has equally profound and far-reaching consequences. They not only provide a decisive key to explaining the properties of leptons and quarks and their interactions but also, in their interplay, to the fundamental understanding for the inexhaustible variety of phenomena in the macroscopic world.

Research into the elementary building blocks of matter and the fundamental forces in the universe has revolutionised our understanding and knowledge of the origin, the structure and the future evolution of our world. A major factor in this success has been the high-energy accelerators: over the past ten years, these have been largely the LEP electron-positron accelerator at the European research laboratory CERN in Geneva, the SLC electron-positron collider at the Stanford Linear Accelerator Center SLAC in California, the HERA electron-proton facility at the *Deutsches Elektronen-Synchrotron* DESY in Hamburg, and the Tevatron proton-antiproton accelerator at the US research centre Fermilab in Chicago. More recently they were joined by the so-called "B-meson factories" PEP-II at SLAC and KEK-B at the KEK research centre in Tsukuba, Japan: both are electron-positron accelerators that run at a lower energy suited to their specific physics goals. Groundbreaking theoretical insights, analyses and precision calculations have played an equally important role in the successful development of particle physics. The results of the close collaboration between experiment and theory are manifested in the Standard Model of particle physics, a 20th-century achievement the significance of which ranks alongside that of Maxwell's theory of electrodynamics and Einstein's theory of relativity.

Driven by the extreme technological demands of high-energy particle accelerators and highly sensitive particle detectors, experimental particle physics quickly organised and coordinated itself at an international level in order to make effective and targeted use of the resources available. This international cooperation not only brought the desired success in deciphering the laws of nature. It also led to the development of new methods and technologies, with a broad potential for applications in other branches of science, the economy and everyday life.

As knowledge and technological know-how have increased, a phenomenon could be observed in particle physics that is typical for the fundamental sciences. Each new piece of knowledge generates new and deeper questions and new theoretical and experimental challenges. These are the motor for developing new ideas, theories and technologies, for planning and building new research projects and for training new generations of highly motivated and qualified scientists.

Despite the great advances in our understanding of the fascinating world of leptons and quarks, particle physics is anything but a completed field of science. Some of the central open questions being asked today, which touch on the very foundations of our world view, are as follows:

- How do elementary particles acquire their mass?
- Is there one universal interaction from which all known fundamental forces, including gravity, derive?
- Are there forms of matter undiscovered up to now, such as a whole new world of supersymmetric particles? Could this be the explanation of the "dark matter", whose existence is suggested by the large scale structure formation of galaxies and the movement of the stars inside galaxies?
- What is the nature of the "dark energy" that causes the universe to expand at an ever-increasing rate?
- Are there hidden dimensions in addition to the three spatial dimensions that we are familiar with?

Compelling theoretical arguments and indirect experimental indications suggest that the answers to at least some of these questions ought to lie in the mass range between a few hundred giga-electronvolts (GeV) and several tera-electronvolts (TeV). That equates to more than a hundred to a thousand times the proton mass and, for the most part, lies outside the reach of today's accelerators. Comprehensive and precise investigation of physics at the TeV energy scale is *the* major challenge for particle physics in the coming 15 to 20 years — a challenge that can only be taken up through worldwide cooperation.

This document presents recommendations for the future development of particle physics in Germany in the next 15 to 20 years, based on the current status of knowledge, the theoretical perspectives and the experimental options, while taking into account the available resources.

The LHC proton-proton collider, with a centre-of-mass energy of 14 TeV, is presently being built at CERN in Geneva. Such a high energy is required in order to attain energies in the TeV range for the collisions of the elementary building blocks within the proton. In parallel, high-energy physicists throughout the world are constructing components for four large particle detectors for the LHC experiments. Operation should begin in 2007. For the time being, the LHC project has the highest potential for ground-breaking discoveries that will shed light on the open questions outlined above and to be discussed in greater detail later in this document.

Recommendation 1: *Highest priority is given to the swift completion of the Large Hadron Collider LHC under construction at CERN and of the LHC detectors, so that the facility can commence operation in 2007.*

The demands of the LHC experiments with respect to detection and measurement methods as well as data acquisition and processing are extreme. Indeed the huge quantity of data they will produce is comparable with the entire data volume processed by the world's telecommunications systems. As is well known from the past, the solutions to such problems will also create spin-offs in other fields and applications. Perhaps the greatest benefit of all will be the throngs of young people attracted by the prospect of excellent education and by the fascination for international teamwork.

Finding *all* answers to the above-mentioned questions through direct experimental investigations would call for energies far beyond those attainable with any particle accelerator. Nonetheless, access to these answers can be obtained indirectly at realisable high-energy accelerators by means of high-precision measurements. These precision measurements can reveal the structure of physics at very high energy scales after performing well-controlled extrapolations. The strength of this method has already been demonstrated by the LEP and SLC experiments, for instance, in the indirect determination of the mass of the top quark, later confirmed by direct measurement at Fermilab. The prerequisite for such extrapolations, however, is a far more accurate analysis of particle properties and processes than the LHC experiments alone are capable of providing. Moreover, a high level of sensitivity is required to corral the new physics beyond the Standard Model which cannot be investigated by the LHC, or at least not sufficiently. Detailed studies performed in international cooperation have shown that the required measurements can only be carried out at an electron-positron linear collider. For this reason it has been decided by worldwide consensus within the particle physics community, that the next major high-energy physics project should be the construction of a linear collider with a total energy of 0.5 to 1 TeV.

The new data and knowledge that can be expected from this linear collider will be greatly complementary to the results obtainable at the LHC. From the scientific viewpoint, an overlap in time with the physics programme at the LHC is imperative. Experience with electron-positron facilities such as LEP and the corresponding hadron accelerators such as the Tevatron demonstrate impressively the synergy effects that can be derived from such concurrent experimentation.

Recommendation 2: *The next large international particle physics project should be a high-energy and high beam-intensity electron-positron linear collider. Germany should make a significant contribution to such a facility, wherever it is built in the world under international cooperation.*

At the initiative of DESY, superconducting accelerating structures have been developed over years of international collaboration. This has laid the technological foundations for the TESLA project, an electron-positron linear collider with a centre-of-mass energy of 0.5 to 0.8 TeV. This successful accelerator development also makes feasible the construction of an X-ray laser, which opens up new interdisciplinary research fields in materials science, biology, chemistry and medicine. For many years DESY has been operating a number of unique machines allowing high-energy physics and synchrotron radiation studies to be performed in symbiosis. This is documented by its large international user community. Bearing in mind DESY's prominent role, the development work already undertaken, the available infrastructure and the highly attractive combination of particle accelerator and X-ray laser serving a broad field of scientific research, Hamburg is an excellent location for TESLA. Germany would profit as Host State from this worldwide project via the education and

engagement of scientists, engineers and technicians. Leading researchers from home and abroad would be attracted, and new technologies would be developed and transferred to Industry. All of these benefits would more than offset the additional costs incurred to the Host State.

Recommendation 3: ***The efforts to build the TESLA electron-positron linear collider under international cooperation at DESY in the near future are strongly supported.***

In July 2002, the German Science Council *("Wissenschaftsrat")* released a positive statement on the TESLA project.

A further investment essential to ensuring a successful future for particle physics in Germany is the continuation and successful completion of the ongoing experiments at HERA, the Tevatron and the B-factories. These accelerators and experiments continue to possess a high discovery potential. With these facilities an abundance of important new data can be collected that will also be of great use in the analysis and interpretation of measurements at the LHC and at a future electron-positron linear collider. One example is the measurement of the inner quark structure of the proton in electron-proton collisions at HERA, with a resolution of up to one-thousandth of the proton radius. Another is the search for new particles and for the fundamental mechanism for generating particle masses at the Tevatron. A further example is the research into the microscopic origin of the puzzling difference in behaviour between matter and antimatter, as is being conducted at the B-factories.

Finally the start-up of special experiments aimed at very specific questions in fields which cannot be covered by LHC and TESLA, such as neutrino physics, particle astrophysics and rare low-energy processes, is equally worthwhile. Neutrino experiments, above all, have substantially gained in scientific interest in the light of the recent discoveries of neutrino oscillations. Such a well-coordinated, diversified programme also ensures the continuing education of the upcoming generation of young scientists in all fields of particle physics. Despite the very long preparation times for future projects, this will preserve the expertise required to overcome their demands.

Recommendation 4: ***Until the completion of the LHC, the continuation of the experiments at HERA and of German participation at the Tevatron is recommended. Furthermore, within the scope of available resources, participation in the B-factories and in neutrino and non-accelerator particle physics projects should be made possible.***

In the long term, accelerators will remain indispensable for the further development of particle physics. The studies relating to a multi-TeV electron-positron linear accelerator (CLIC), to a Very Large Hadron Collider (VLHC) or to the new concept of a neutrino factory and a muon collider still require many years of R&D. At present no detailed recommendation can be made on the construction of these large facilities which will extend well beyond the 15-20 year time span being considered in this document. But since new accelerator projects require decades of substantial R&D, the continuation of accelerator and detector technology research is necessary to prepare for the as yet unforeseeable challenges of particle physics.

Recommendation 5: ***Research and development into accelerator and detector technologies must be continuously pursued.***

The strategy recommended here for the coming 15 to 20 years has its roots in the success achieved in this field of fundamental research over the past decades. Based on the present status of knowledge and technological progress, this strategy indicates a road towards a future full of promise. With particle physics groups in more than twenty universities and with CERN, the Helmholtz Centre DESY and the Max-Planck Institutes, Germany has reached a high scientific level by international standards. The universities have played an essential part in this process — without their leading role in the education of undergraduates and PhD students and without their contributions to the experiments and to the development of vigorous particle physics theory, the dynamics of this field could not be preserved.

As a knowledge-oriented field of fundamental research, particle physics in Germany is exclusively dependent on public financing from the Federal Government and the States *("Länder")*. The German contribution to CERN is financed by BMBF, the German Ministry for Education and Research, as is 90% of the budget for DESY. The other 10% of the costs for DESY Hamburg are carried by the State of Hamburg and 10% of the costs for DESY Zeuthen by the State of Brandenburg. The financing of the Max-Planck Society is shared between the Federal Government and the States. The States also provide considerable resources for personnel, basic equipment, workshops and general infrastructure in the university institutes. The Federal Government enables the university groups to participate in major particle physics projects within the framework of the integrated research system *("Verbundforschung")*. Indeed Germany's integrated research system has proven to be very successful and should definitely be maintained in future. Finally, theory groups and the education of graduates are sponsored by the German research foundation *("Deutsche Forschungsgemeinschaft")*.

By maintaining this well-focussed and highly efficient sponsorship system and with a strong participation in the LHC at CERN, a high level commitment towards an electron-positron linear collider, in particular TESLA at DESY, and a balanced accompanying programme, Germany will be able to continue playing a leading international role in the field of particle physics. In return, as we move ahead into the future, society can expect particle physics to be a source of new knowledge of great and enduring cultural value, of avant-garde technological developments, of spin-offs for other areas of science and economy, and of highly qualified young scientists, engineers and technicians.

Translated from German into English by John Pym
(CERN Translation and Minutes Service)

Herausgeber:
Komitee für Elementarteilchenphysik KET (2000 - 2003)

Vorsitzender: Prof. R. Rückl (Univ. Würzburg)
Stellvertretender Vorsitzender: Prof. N. Wermes (Univ. Bonn)

Mitglieder: Prof. S. Bethke (MPI Physik München),
Prof. J. Drees (Univ. Wuppertal), Prof. F. Eisele (Univ. Heidelberg),
Prof. G. Flügge (RWTH Aachen), Prof. C. Gößling (Univ. Dortmund),
Prof. T. Lohse (Humboldt Univ. Berlin), Prof. K. Meier
(Univ. Heidelberg), Dr. R. Settles (MPI Physik München),
Dr. R. Voss (CERN Genf), Prof. D. Wegener (Univ. Dortmund),
Prof. G. Wolf (DESY Hamburg)

Redaktionskomitee:
G. Herten, W. Hollik, L. Köpke, T. Lohse, K. Meier, G. Quast,
R. Rückl, T. Ruf, A. Stahl, N. Wermes (Stellvertretung),
P. Zerwas (Federführung)

Redaktionelle Überarbeitung: Textlabor Ilka Flegel (Jena)
Grafiken: U. Behrens, A. Stahl (DESY Zeuthen)
Gestaltung und Layout: Dirk Günther Grafik Design (Hamburg)

Besonderer Dank geht an Prof. P. Söding (DESY Zeuthen) und
Prof. A. Wagner (DESY Hamburg) für ihre beratende Tätigkeit.

Das KET dankt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMBF, insbesondere MinDirig Dr. H.-F. Wagner, für die Anregung
zu dieser Studie und die Unterstützung bei ihrer Realisierung.

Redaktionsschluss: November 2002

Druck: Die Druckmeister (Norderstedt)

Fotos und Grafiken mit freundlicher Genehmigung von:

Europäisches Laboratorium für Teilchenphysik, CERN
Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
in der Helmholtz-Gemeinschaft
Fermi National Accelerator Laboratory, Fermilab
Stanford Linear Accelerator Center, SLAC

Abb. Seite 8: Space Telescope Science Institute, STScI
(Galaxie, Erde)
Taxi Collection (Vitruvian von Leonardo da Vinci)
Grimes et al., Nature 395 (1998), 470, "Artist's view of the
BTV core particle" (Blue Tongue Virus)
Max-Planck-Arbeitsgruppen für strukturelle Molekularbiologie,
Hamburg (Proteinkristall)
Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY (Proton)

Deutsches Röntgen-Museum, Remscheid (Abb. 1.4)
Gran Sasso Laboratorium (Abb. 3.32)
Physikalisches Institut der Universität Bonn (Abb. 5.7 und 5.9)
Arbeitsgruppe F. Sauli, CERN (Abb. 5.8)

Titelbilder:
Links: Computersimulation einer Elektron-Positron-Kollision am
Linearcollider TESLA, in der ein Paar von supersymmetrischen
Teilchen entsteht.
Rechts: Computersimulation einer Proton-Proton-Kollision am
Hadronbeschleuniger LHC, bei der ein Higgs-Boson
erzeugt wird.