

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 tiefere 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-Meson-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-Meson-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-Meson-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