

**„Didaktik der Teilchenphysik –
Entwerfen eines Lehrbuches zum
physikalischen Inhalt,
Wissenschaftstheorie und Arbeitswelt
in der Teilchenphysik“**

Verfasserin: Katrin Kröger

Zugeordnetes Fach: Physik

Schule: Sächsisches Landesgymnasium Sankt Afra zu Meißen

Betreuender Lehrer: Dr. Bert Xylander

Externer Betreuer: Prof. Dr. Gesche Pospiech

Abgabedatum: 16.12.2010

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	III
2. Vorbetrachtung.....	IV
2.1. Teilchenphysik sowie andere Inhalte meines Lehrbuches im sächsischen Lehrplan	IV
2.2. Lehrbuchanalyse.....	V
3. Zulässigkeit der Bezeichnung Lehrbuch	X
4. Begründung der Auswahl der Kategorien	XI
5. Didaktischer Hintergrund nach Wagenschein und Umsetzung	XII
6. Selbstentwickeltes didaktisches Konzept und Umsetzung.....	XIV
7. Weitere Kriterien zur Untersuchung des Lehrbuches.....	XVIII
7.1. Inhaltliche Kriterien	XVIII
7.1.1. Sachrichtigkeit.....	XVIII
7.1.2. Aktualität der vorgestellten Inhalte	XIX
7.1.3. Bezug zum Lehrplan.....	XIX
7.1.4. Historische und logisch-orientierte Darstellung	XIX
7.1.5. Erkennbarer roter Faden in den Ausführungen	XX
7.1.6. Ausgeglichenes Wechselspiel zwischen Prägnanz und anregenden Zusätzen	XXI
7.1.7. Anmerkung zur Kategorie „Arbeitswelt“	XXI
7.1.8. Anmerkung zur Übernahme von pdf-Skripten	XXI
7.1.9. Anmerkung zur Darstellung der Quellen.....	XXI
7.2. Strukturelle Kriterien.....	XXII
7.2.1. Gliederung und Anordnung der Themen.....	XXII
7.2.2. Adäquate Bild-Text-Verschränkung.....	XXIV
7.3. Formale Kriterien	XXIV
7.3.1. Altersgemäße Sprache	XXIV
7.3.2. Abwechslungsreicher Wortschatz	XXV
7.3.3. Notwendigkeit und rechtzeitige Erklärung von Fachbegriffen	XXV
8. Schlusswort	XXVII
9. Danksagung.....	XXVIII
10. Eidesstattliche Erklärung.....	XXIX
11. Anhang	XXX
11.1. Quellenverzeichnis	XXX
11.2. Lehrbuch.....	XXXI

1. Einleitung

Motivation für meine Besondere Lernleistung ist, dass ich in der 10. Klasse feststellen musste, dass ich in der Oberstufe trotz gewähltem Physik-Leistungskurs wohl nur sehr wenig über die für mich so faszinierende Teilchenphysik lernen würde. Um mich aber trotzdem in dieser Thematik zu bilden, begann ich mit einem Selbststudium durch das Lesen von Lehrbuchkapiteln, diese waren aber inhaltlich nicht ausreichend. So fuhr ich fort mit Fachlektüre, Broschüren und Websites verschiedener Institute; ich gelang zu meinem Wissen also nur durch Zusammensuchen der für mich relevanten Information aus den unterschiedlichsten Quellen.

Desweiteren musste ich feststellen, dass ich auf diese Weise zwar viel über die dahinterstehende Physik lernen konnte, jedoch nur sehr wenig über den Arbeitsalltag sowie die Arbeitsmethodik der Teilchenphysiker erfuhr.

Während der Themenfindung für meine Besondere Lernleistung entwickelte ich so mit meinem damaligen internen Betreuer Andreas Röpke die Idee, das Wissen didaktisch aufzubereiten und niederzuschreiben. Dieses Vorgehen würde auch eine weitere intensive Beschäftigung für mich mit dem Stoff sichern. Die Idee erfuhr eine ständige Weiterentwicklung, sodass es letztlich mein Ziel ist, für den interessierten Schüler, der sich in seiner freien Zeit aus eigenem Antrieb mit der Thematik auseinandersetzen möchte, dies zu erleichtern, indem er ein von mir geschriebenes Lehrbuch zur Teilchenphysik liest. Der Inhalt geht über die bloße Physik hinaus, da ich neben der Kategorie „Physikalischer Inhalt“ zwei weitere Kategorien einführe, die von Wissenschaftstheorie und der Arbeitswelt in der Teilchenphysik handeln.

Während des Prozesses der Entstehung meiner BeLL erfolgte die Wissenserweiterung neben bereits oben erwähnten Varianten auch durch den Besuch des Lepton-Photon-Symposium¹ in Hamburg, einem Praktikum bei DESY, der Teilnahme an der Masterclasses in Dresden sowie an der Projektwoche „Weltformel II“ in der 11. Klasse am CERN.

In meiner Besonderen Lernleistung gehe ich zuerst auf die gegenwärtige Rolle der Teilchenphysik im sächsischen Lehrplan des Physik-Leistungskurses und in Lehrbüchern für dieses Niveau ein. Dann geht es um die Untersuchung des von mir entworfenen Lehrbuches auf die Erfüllung gewisser Kriterien sowie darum, bestimmte Aspekte zu begründen. Zunächst prüfe ich die Legitimation der Bezeichnung „Lehrbuch“, um dann die Kategorienwahl zu begründen. Es folgt die Vorstellung des didaktischen Hintergrundes nach Wagenschein sowie des von mir entwickelten didaktischen Konzepts und die Untersuchung der Umsetzung dieser im Lehrbuch. Dann untersuche ich weitere Kriterien zu Inhalt, Struktur und Form meines Lehrbuches, um anschließend zu einem Fazit zu gelangen. Das ausgearbeitete Lehrbuch findet sich im Anhang.

¹ Hierbei handelt es sich um die größte und wichtigste Konferenz der Teilchenphysik, sie fand vom 17. bis 22.08.2009 in Hamburg statt.

2. Vorbetrachtung

Vor dem Entwerfen des Lehrbuches setze ich mich mit dem sächsischen Lehrplan und dem Kapitel „Elementarteilchenphysik“ im Metzler auseinander. Ersteres dient mir dazu, mich darüber zu informieren, inwieweit die angestrebten Inhalte meines Lehrbuches im Lehrplan vorgeschrieben sind. Die Analyse der Umsetzung der Thematik im Metzler bietet mir die Möglichkeit, eigene Ansprüche an mein Lehrbuch zu entwickeln.

2.1. Teilchenphysik sowie andere Inhalte meines Lehrbuches im sächsischen Lehrplan

Der sächsische Lehrplan^{II} beinhaltet Teilchenphysik nur in einem sehr geringen Maße.

Zur Funktionsweise von Beschleunigern ist im „Lernbereich 9: Geladene Teilchen in Feldern“ in Klasse 11 folgendes vorgeschrieben:

„Sich positionieren zum Verhältnis von Aufwand und Nutzen technischer Anwendungen [...]

- Prinzip eines Linear- oder Zirkularbeschleunigers (Zyklotron DESY)^{III, IV}

Hier sollen also etwas tiefergehend die physikalischen Mechanismen hinter einem Beschleuniger erklärt werden, dabei wird die Erwähnung eines Zyklotron am DESY empfohlen, was im Umkehrschluss die kurze Beschäftigung damit, was das DESY eigentlich ist, fordern würde.

Im „Lernbereich 6: Eigenschaften der Atomkerne“ in Klasse 12 finden sich am Ende:

„Einblick gewinnen in Eigenschaften von Elementarteilchen (Quark-Modell)“ und „Sich positionieren zu Aufwand und Nutzen für das Erreichen wissenschaftlicher Fortschritte [...]

- Forschung zur Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen (Ausblick auf den Stand der Wissenschaft zu den Grundkräften der Natur)^V

Wie aus obigen Zitaten folgt, geht es also um „Einblicke gewinnen“. Dies wird im sächsischen Lehrplan folgendermaßen definiert: „Begegnung mit einem Gegenstandsbereich / Wirklichkeitsbereich oder mit Lern- und Arbeitstechniken oder Fachmethoden als grundlegende Orientierung, ohne tiefere Reflexion“^{VI}. Ein Streifen

^{II} Sächsisches Staatsministerium für Kultus: Lehrplan Gymnasium Physik

In den Fußnoten sind nur Kurzverweise, die ausführliche Bibliografie findet sich im Quellenverzeichnis.

^{III} Im sächsischen Lehrplan werden die Lernbereiche tabellarisch dargestellt. Die linke Spalte enthält verbindliche Lernziele und Lerninhalte und steht in meiner Darstellung vor den Klammern, während die rechte Spalte, die die empfehlenden Bemerkungen beinhaltet, in Klammern steht.

^{IV} ebenda S. 49

^V Sächsisches Staatsministerium für Kultus: Lehrplan Gymnasium Physik, S. 56

^{VI} ebenda S. V

der Thematik, eine Erwähnung der fundamentalen Inhalte reicht also dem Lehrplan zufolge aus, die Behandlung des Quark-Modells und der fundamentalen Naturkräfte wird angeregt.

Nach dem Erlangen dieses Wissens soll der Schüler damit diskutieren können, inwiefern die Grundlagenforschung in Anbetracht ihres Aufwandes sinnvoll ist.

Mir bleibt festzustellen, dass Teilchenphysik in geringem Maße und in geringer Tiefe vorkommt und viele fachliche Aspekte (wie das Standardmodell) nicht zum Vorschein treten. Die weitere Ausgestaltung des Unterrichts liegt also beim Lehrer.

Obiges bestärkt mich in meiner Annahme, dass wirklich eine Notwendigkeit für eine bessere Informationslage für den interessierten Schüler besteht.

Einige andere Zeilen im Lehrplan unter „Ziele Jahrgangsstufe 11/12 – Leistungskurs“ besitzen eine Relevanz für meine inhaltliche Ausgestaltung, da sie die Inhalte meines Lehrbuchs unterstützen:

Die Überschrift „Anwenden physikalischer Denk- und Arbeitsweisen“^{VII} unterstützt das Vermitteln von Grundlagen der Wissenschaftstheorie. Unter der Überschrift finden sich die Sätze wie „Beim konkreten Wahrnehmen und Idealisieren setzen sich die Schüler mit Modellannahmen auseinander. Sie kennen sowohl gegenständliche als auch mathematische Modelle und nutzen diese, um physikalische Aussagen abzuleiten.“

Der Inhalt der Überschrift „Leisten eines Beitrages zur Entwicklung eines eigenen Weltbildes“^{VIII} findet sich ausgezeichnet in meiner Arbeit wieder, da wohl kaum etwas wie die Suche danach, was die fundamentalen Bausteine der Welt sind und nach der Entstehung des Universums, so stark unser Weltbild beeinflusst.

Auch wenn die Inhalte meines Lehrbuchs nicht alle im sächsischen Lehrplan verankert sind, gibt es doch Anhaltspunkte, die meine Inhalte legitimieren und unterstützen.

Im späteren Begründungsteil werde ich auf die Ausschnitte des Lehrplans zurückkommen und in Bezug zu meinem Lehrbuch setzen.

2.2. Lehrbuchanalyse

Nachdem ich mir angeschaut habe, inwieweit die Inhalte meines Lehrbuchs im Lehrplan vorgeschrieben sind, betrachte ich nun die Umsetzung des Lehrplans im Lehrbuch für den Physik-Leistungskurs, beispielhaft dafür begutachte ich den Metzler. Außerdem untersuche ich, inwiefern meine weiteren Kategorien Wissenschaftstheorie und Arbeitswelt behandelt werden. Die Untersuchung dieser Punkte ist für meine Ausarbeitung sehr wichtig, da ich die Vorgehensweise, wie im Metzler das Thema behandelt wird, nach inhaltlichen (sowohl vorhandenen als auch

^{VII} ebenda S. 42

^{VIII} ebenda S.43

fehlenden) und didaktischen Gesichtspunkten beurteilen und daraus Folgerungen für den Inhalt und den Aufbau sowie eine lernfreundliche Struktur ableiten kann.

Stellvertretend für andere Lehrbücher wie z. B. Dorn-Bader und „Volk und Wissen“ analysiere ich nur den Metzler, da sich dieser zur Thematik Teilchenphysik inhaltlich am umfangreichsten darstellt.

Gegenstand meiner Analyse ist der Metzler von 2007^{IX}. Das Lehrbuch umfasst 578 Seiten.

Zunächst zur physikalischen Seite:

Auf Seite 240 „Das Zyklotron“ und auf Seite 241 „Exkurs: Teilchenbeschleuniger – Riesenwerkzeuge für kleinste Teilchen“ im Kapitel 6 „Bewegte Ladungsträger und magnetisches Feld“ im Unterkapitel „Kräfte im Magnetfeld“ wird der Schüler mit einem „Hauptwerkzeug“ der Teilchenphysiker bekannt gemacht: dem Teilchenbeschleuniger (in heutiger Form und der Entwicklungsvorstufe des Zyklotrons). Unter dem Unterpunkt „Das Zyklotron“ geht es um dessen Einsatz zur Erkenntnisgewinnung im subatomaren Bereich und im zweiten Teil wird das ungefähre Funktionsprinzip von Teilchenbeschleunigern im Groben erklärt. Daraufhin folgt eine genauere Beschreibung, verbunden mit mathematischen Formeln. Es endet mit der Problematik der relativistischen Massenzunahme und daraus folgender immer geringer werdende Geschwindigkeitszunahme. Die Grafik mit dem Titel „Zyklotron mit den D-förmigen Elektroden“ verdeutlicht dessen Prinzip.

Der Exkurs wendet sich ausschließlich Teilchenbeschleunigern zu. Zuerst wird die relativistische Massenzunahme wieder aufgegriffen, dann wird deren Funktionsprinzip erklärt, verknüpft mit einer Grafik. Verdeutlicht wird die Rolle des Beschleunigers in der „Erforschung zunehmend kleinerer Strukturen“. Es folgen Daten zu einigen Beschleunigern am DESY und CERN. Zuletzt geht es darum, warum Linearbeschleuniger ab bestimmten Energien wirtschaftlicher sind als Kreisbeschleuniger. Der Exkurs behandelt die Thematik interessant, physikalisch gut nachvollziehbar, übersichtlich und mit einer guten inneren Textstruktur und weist mit Verweisen auf das 14. Kapitel hin.

Das 14. Kapitel trägt den Titel „Elementarteilchenphysik“. Die Einordnung findet das 14. Kapitel auf den Seiten 528 bis 537, zwischen dem vorhergehenden Kapitel „Kernphysik“ und dem folgenden „Astrophysik“. Anhand der Seitenzahlen lässt sich erkennen, dass das Thema als eines der letzten behandelt wird.

In einer kurzen Einleitung wird ein sehr knapper historischer Abriss über die Entdeckung verschiedener Elementarteilchen mit dem Hinweis auf das systematisierende Standardmodell gegeben.

Das erste Unterkapitel heißt „Vom Elektron zum Teilchenzoo“ und ist auf den zwei Seiten 528 und 529 zu finden. Dort werden das Positron, Myon, Pion, Kaon und Lambdateilchen vorgestellt: Neben ihrer Entdeckung (Untersuchung der kosmischen Strahlung z. B. mit Blaskammern) werden Eigenschaften wie Masse, Ladung und

^{IX} Grehn, Krause (2007): Metzler Physik

Zerfallsmechanismen behandelt. Nebenbei werden sie Kategorien wie Leptonen, Mesonen und Baryonen zugeordnet. Unter der Teilüberschrift „Antimaterie“ wird das Vorangegangene zusammengefasst und der Begriff des Antiteilchens erklärt. Unter der Teilüberschrift „Quarks“ wird der Teilchenbeschleuniger als neues Hauptmittel zur Entdeckung und Untersuchung neuer Teilchen erwähnt, in historischer Aufzählung werden so die zur Entdeckung bestimmter Quarks durchgeführten Experimente an bestimmten Beschleunigern genannt. Am Ende wird auf das nun entwickelte Standardmodell, die Problematik mit dem Higgs-Boson sowie die Tatsache, dass noch andere „Theorien der Elementarteilchen auf ihre experimentelle Bestätigung“^x warten, verwiesen.

Ich stelle fest, dass die Thematik historisch angegangen wird; es werden einige der zum Standardmodell führenden Entdeckungen, Gesetzmäßigkeiten und Gedanken behandelt. Zwei Grafiken zeigen Prozesse aus Nebel- und Blasenkammern. Aus meiner Sicht ist die gesamte Darstellung der Thematik unübersichtlich, da Fachbegriffe nicht ausreichend erklärt werden und die Ordnungsstrukturen der Teilchen eher nebenbei eingeführt werden. Je nachdem, wo es passt, werden die Begriffe der Leptonen, Mesonen und Baryonen dadurch eingeführt, dass ihnen Teilchen mit bestimmter Masse zugeordnet werden und ihre griechische Wortherkunft erläutert wird. Dass z. B. aber ein Meson aus einem Quark und einem Antiquark besteht, wird erst später auf S. 531 erklärt. Meiner Ansicht nach hätte dies früher erfolgen sollen, um eine bessere Vorstellung von den Ordnungsstrukturen der Elementarteilchen entwickeln zu können. Allerdings passt das vorgefundene Vorgehen eben besser dazu, dass die Thematik historisch behandelt wird, und sich die Ordnungsstrukturen und tiefere Kenntnisse über sie erst im Laufe der Zeit entwickelt haben.

Das zweite Unterkapitel „Das Standardmodell“ beschäftigt sich auf insgesamt acht Seiten mit der Vorstellung des Standardmodells an sich sowie Folgerungen daraus. Im ersten Unterpunkt „Eigenschaften der Quarks“ unter der Überschrift „Quarks im Standardmodell“ (für drei Seiten) werden, was ich sehr beachtlich finde, die Aussagen des Standardmodells für Quarks mehr über eine textliche Darstellung als über eine Grafik abgehandelt. Die Grafik beschränkt sich darauf zu zeigen, auf welche Teilchen welche Kräfte wirken und zu welcher Generation sie gehören. Aus meiner Sicht sollten aber noch mehr Informationen visuell dargestellt werden, da eine grafische Darstellung die Anschaulichkeit erhöht. In den Unterpunkten „Quarks und starke Wechselwirkung“ sowie dem übernächsten „Quarkkombinationen und deren Farbladung“ werden die starke Wechselwirkung anhand der Farbladungen der Quarks behandelt. Dies erfolgt schon auf einem etwas höheren Niveau, z. B. werden Farbfeld und elektrisches Feld verglichen und in einer Skizze dargestellt. Definition und Vertreter sowie aufzählende Tabellen von Baryonen und Mesonen finden sich im Unterpunkt „Gebundene Quark-Zustände“, wobei das gleichnamige Austauschteilchen und sein Mechanismus in der Theorie der Farbladung (dazu zwei Grafiken) im Unterpunkt „Gluon“ folgen.

^x aus Grehn, Krause (2007): Metzler Physik, S. 529

Nachdem ich die Lektüre des Unterkapitels analysiert habe, komme ich aus Sicht eines Schülers dazu, dass das dargestellte Wissen gut nachvollziehbar ist. Zudem erfolgt die Darstellung auf einem höheren Niveau als in einfachen Informationsbroschüren z. B. vom DESY. Ein Kritikpunkt ist vor allem die überwiegende textliche Einführung des Standardmodells, was zu Lasten der Übersichtlichkeit geht.

Nun findet sich der „Exkurs: Collider, Speicherringe und Riesendetektoren“, der eine Seite fasst. Das Problem des Energieverlustes durch Synchrotronstrahlung bei Kreisbeschleunigern und die Lösung dessen durch die Anwendung von Linearbeschleunigern in der aktuellen Forschung sowie Vorteile und das Prinzip des Colliders werden beschrieben. Es gibt einige spezielle Informationen zum DESY-Beschleuniger HERA. Der Aufbau eines Detektors und das Funktionsprinzip einzelner Detektorschichten werden verdeutlicht. Der Text beinhaltet die grundlegenden Informationen und vermittelt diese dadurch effektiv, dass er eine gute innere Struktur besitzt und die Funktionsweise der Detektoren durch Grafiken noch einmal sehr gut zusammengefasst wird.

Die Überschrift „Gebundene Systeme“ behandelt auf der Seite 534 ausführlich, wie sich aus Energiespektren von gebundenen Systemen die elementaren Teilchen, deren Eigenschaften und die auf sie wirkenden Kräfte erkennen lassen. Zwei Grafiken zeigen die Energieniveau-Schemata des Positroniums und Charmoniums. Grundlagen zum Verständnis dieser Thematik sind Kenntnisse über Spektralanalyse. Ich selbst sehe keinen wichtigen Grund, diese Thematik auch in meiner Ausarbeitung zu behandeln, da sie für das Verständnis der von mir vermittelten Informationen nicht notwendig ist. Eine wirklich interessante Information ist aber, dass zum Ende darauf hingewiesen wird, dass solch eine energetische Anregung bei Leptonen nicht möglich ist und sie somit elementar sein müssten.

Die nächste Seite unter der Überschrift „Die Leptonen“ handelt von den Eigenschaften dieser Teilchen (Ladung, Masse, mittlere Lebensdauer, häufige Zerfallsprodukte; hierzu gibt es zusätzlich zum Text eine Tabelle) und der schwachen Wechselwirkung. Letztere wird eingeführt mit einer Erklärung des β -Zerfalls auf elementarer Ebene, dann folgen Ausführungen zum W- und Z-Teilchen sowie (kurz) Reaktionsmechanismen. Außerdem findet die elektroschwache Theorie am Schluss Erwähnung.

Die letzten beiden Seiten des Kapitels, 536 und 537, sind mit „Reaktionen im Standardmodell“ betitelt und bieten eine Einführung in die Feynman-Diagramme anhand von Streuprozessen sowie Paarerzeugung und Paarvernichtung. Eine Tabelle heißt „Elementarreaktionen der schwachen Wechselwirkung im Standardmodell“. Unter dem Unterpunkt „Teilchenreaktionen“ finden sich sechs Beispiele in Feynman-Diagramm-Schreibweise, die ein kurzer Text erläutert. Dies ist nach dem Lesen der vorhergehenden Seiten sehr gut verständlich und auch eine präzise, effektive Darstellung. Spätestens hier sollten die dahinterstehenden Muster deutlich werden.

Nun folgt eine Zusammenfassung meiner Analyse: Die Beschleuniger an sich und deren Rolle in der Teilchenphysik werden behandelt, genauso der Prozess der

Entdeckung vieler verschiedener Teilchen und deren Systematisierung im Standardmodell, die Beschreibung der Quarks und Leptonen durch dieses und die starke sowie die schwache Wechselwirkung, außerdem Reaktionen im Standardmodell und Analyse von Energiespektren gebundener Teilchen. Gestalterisch und strukturell stechen die Seiten 528 und 529 mit ihrer Unübersichtlichkeit negativ hervor, während die Seiten 536 und 537 durch ihren klaren Aufbau positiv auffallen.

Die Arbeitsmethodik der Physiker erfährt Aufmerksamkeit auf den Seiten 106 und 107. Ihre Überschrift lautet „Exkurs: Geschichte der Mechanik und die klassische Physik; Kausalität und Determinismus“ im Kapitel 2 „Gravitation“.

Der erste Teil erläutert anhand der Geschichte der Mechanik die Entwicklung der Wissenschaftstheorie in der Physik. Nach einer kurzen beispielhaften Aufzählung, an welcher Stelle Mechanik in der frühen Geschichte eine wichtige Bedeutung zukam, werden wichtige Wissenschaftler, deren fachliche und eventuell vorhandenen methodische Errungenschaften sowie gegebenenfalls der Einfluss derer in historischer Reihenfolge vorgestellt. Der Hauptfokus liegt sowohl auf Galilei und seiner naturwissenschaftlicher Methode als auch auf Newton und seiner Newton'schen Mechanik, „welche zum Vorbild jeder wissenschaftlichen Theorie wurde“^{XI}. Der Begriff der „klassischen Physik“ wird definiert sowie der Hinweis darauf, was heute nicht mehr klassisch ist: „Relativitätstheorie und Quantentheorie sind die beiden Gebiete, mit denen die moderne Physik [...] über die klassische Physik hinausgeht.“^{XII}

In „Das Weltbild der klassischen Physik“ wird auf die drei Prinzipien Kausalität, Determinismus und Objektivierbarkeit, welche in der klassischen Physik entwickelt wurden, und deren Einfluss auf das Weltbild eingegangen. Am Ende wird sich mit der Infragestellung dieser drei Prinzipien der klassischen Physik durch die moderne Physik, vor allem durch die Quantenphysik, befasst.

Der Exkurs behandelt folglich die Entwicklung wissenschaftlichen Vorgehens in der (klassischen) Physik, deren drei Grundprinzipien und ihren Widerspruch zur modernen Physik.

Der Text besitzt eine gute innere Struktur, die Übersichtlichkeit und Effizienz wird mit der historisierenden (was hier als Synonym für logisch verstanden werden kann) Behandlung erreicht, ebenso mit der Darstellung relativ viel Inhalts in relativ wenig Text.

Das 16. Kapitel „Physik und Wissenschaftstheorie“ auf Seite 562 bis 565 umfasst die zwei Unterkapitel „Theorie-Hypothese-Gesetz-Modell“ und „Philosophische Strömungen der Erkenntnisgewinnung“. Das erste erklärt auf zwei Seiten die in seiner Überschrift genannten Begriffe. Das Wesen der Physik als „theoriegeleitete experimentelle Wissenschaft“^{XIII} wird mithilfe des dynamischen und fortwährenden Wechselspiels der Formulierung und Widerlegung von Theorien verdeutlicht.

^{XI} aus Grehn, Krause (2007): Metzler Physik, S. 107

^{XII} aus Grehn, Krause (2007): Metzler Physik, S. 107

^{XIII} ebenda S. 562

Zwischendurch geben wenige Sätze Definitionen der jeweiligen Begriffe, am Schluss steht eine Zusammenfassung. Die Übersichtlichkeit und Effizienz des vermittelten Wissens ist hier durch die Struktur und durch die hohe inhaltliche Verdichtung gegeben.

Die Erwähnung der Arbeitswelt beschränkt sich auf die Nennung der Institute CERN und DESY. Dies ist aber unter Beachtung des Charakters des Buches nicht weiter verwunderlich und nur allzu logisch; schließlich muss es innerhalb des zeitlichen Rahmens von zwei Jahren Oberstufe noch andere Themen behandeln und kann sich somit keine tiefere Spezifik leisten.

Feststellend kann ich sagen, dass in der physikalischen Thematik teilweise sehr spezifisch einige Themen behandelt werden, dabei aber – wenn man nur den Metzler als Informationsgrundlage zu Rate zieht – an einigen Stellen die Übersicht und einfache, aber wichtige physikalische Vorstellungsmuster fehlen; an anderer Stelle wird es hingegen sehr gut vermittelt.

Die Wissenschaftstheorie ist meiner Ansicht nach in dem engen Rahmen, dass es sich um ein Lehrbuch für den zeitlich begrenzten Unterricht handelt, inhaltlich sehr gut gestaltet und überzeugt durch effektive Wissensvermittlung mit lernfreundlicher Gestaltung.

Informationen zur Arbeitswelt gibt es letztendlich so gut wie gar keine. Jeweilige oben genannte positive und negative Kritikpunkte werde ich bei der Ausgestaltung meiner Ausarbeitung beachten.

3. Zulässigkeit der Bezeichnung Lehrbuch

Ich habe den Anspruch an das von mir entworfene Lehrmaterial, ein Lehrbuch zu sein. Von daher muss ich prüfen, ob es auch den Anforderungen an ein Lehrbuch nachkommt.

Welche Inhalte muss ein Buch haben, um als in der Schule verwendbares Material eingestuft zu werden? Zur Beantwortung dieser Frage verwende ich folgende Aufzählung:

„Aufgaben eines Schulbuchs:

- Als **Lehrbuch** unterrichtet es (ausführlich) über den zu behandelnden Stoff
- Als **Arbeitsbuch** stellt es Probleme und Aufgaben, enthält Versuchsanleitungen und Lesetexte
- Als **Materialsammlung** liefert es Bilder, Diagramme, Originaltexte, historische Quellen ...
- Als **Übungsbuch** dient es der Sicherung des Gelernten
- Als **Merkheft** fasst es den im Unterricht behandelten Stoff in knapper Form zusammen
- Als **Selbstbildungsmittel** erlaubt es die Weiterarbeit über den Unterricht hinaus

- Als **Nachschlagewerk** bietet es rasche Auskunft über den gesamten Unterrichtsstoff und darüber hinaus.

Es ist klar, dass die Fülle dieser Aufgaben innerhalb eines einzelnen Buches schwer erfüllbar sind. Man findet Schulbücher mit verschiedensten Stärken und Schwächen.“^{XIV}

Nach diesem Kriterium ist mein erarbeitetes Lernmaterial ein Schulbuch. Es erfüllt in erster Linie den Aufgabenbereich des Selbstbildungsmittels. Das Erstellen eines Buches zur eigenverantwortlichen Weiterbildung war auch mein Ziel.

Weiterhin trägt es, inhaltlich betrachtet, Züge eines Nachschlagewerkes. Das Inhaltsverzeichnis übernimmt hierbei die Funktion des Registers.

Durch die ausführliche und umfassende Behandlung der Thematik erwirbt das Material seinen Lehrbuchcharakter. Von daher ist die Verwendung dieser Bezeichnung gerechtfertigt. Ein Lehrbuch kann nach obiger Definition auch gleichzeitig ein Selbstbildungsmittel sein, da ein Lehrbuch über das Vorhandensein ausführlichen Inhalts zu einer Thematik definiert wird.

Mein Lehrbuch dient aber eher der eigenverantwortlichen Bildung. Natürlich kann es auch genauso gut im Unterricht verwendet werden, jedoch unterscheidet es sich von den herkömmlichen Physiklehrbüchern durch den fehlenden Arbeitsbuchcharakter. Der Schulunterricht hat sich neben der Wissensvermittlung auch der Vermittlung von Methodenbewusstsein verschrieben, dafür eignen sich eben am besten Schulbücher mit Arbeitsbuchcharakter. Mein Lehrbuch beinhaltet keinerlei Aufgaben, Problemstellungen etc., sondern dient wirklich nur der reinen Informationsvermittlung.

4. Begründung der Auswahl der Kategorien

Wie bereits der Titel meiner Besonderen Lernleistung zeigt, habe ich mich nicht nur auf die fachliche physikalische Seite der Teilchenphysik beschränkt. Meine Analyse ergab, dass in den Lehrbüchern das Hauptaugenmerk auf den physikalischen Inhalten liegt. Wissenschaftstheoretisch gibt es allerdings nur wenige grundlegende Informationen, wobei nicht spezifisch auf die Methodik in der Teilchenphysik eingegangen wird. Informationen über die Arbeitswelt gibt es so gut wie keine.

Da mein Lehrbuch für die außerschulische Beschäftigung konzipiert wurde, habe ich folglich mit dem wegfallenden zeitlichen Druck für die Behandlung der Stofffülle keine direkte Einschränkung der Menge an zu vermittelnden Wissen. Ich kann also im Gegensatz zu Lehrplanautoren neben der physikalischen Seite auch noch andere Kategorien hinzunehmen, die ich für sinnvoll erachte. Ich habe mich für die Kategorien „Physikalischer Inhalt“, „Wissenschaftstheorie“ und „Arbeitswelt“ entschieden. Erstere umfasst – wie der Name schon sagt – den physikalischen Inhalt. In dieser werden zunächst die wissenschaftlichen Grundlagen ausgehend vom Unterricht vermittelt, um dann tiefer in das Fachgebiet einzudringen. Die Notwendigkeit dieser Kategorie ergibt sich allein aus dem Ziel, mehr über Teilchenphysik zu erfahren. Die zweite Kategorie behandelt den allgemeinen wissenschaftstheoretischen Hintergrund und die spezifische Umsetzung dessen in der

^{XIV} aus Rath: Das Schulbuch im Physikunterricht

Teilchenphysik. Dies ist zwar für das physikalische Verständnis nicht unmittelbar notwendig, aber es erleichtert das Verständnis für das Vorgehen der Teilchenphysiker und liefert hierfür eine Begründung. Es erklärt, wie Grundlagenforschung „funktioniert“. Außerdem bildet Wissenschaftstheorie eine allgemeine Ausgangsbasis, nicht nur für andere Naturwissenschaften und das Allgemeinwissen, sondern durch die Erklärung der Notwendigkeit solcher Milliardenprojekte wie dem LHC. Damit erlaubt es dem Schüler die Teilnahme an gesellschaftlichen Debatten über Sinn und Zweck dieses hohen finanziellen Aufwandes. Die Fähigkeit zur Partizipation an solchen gesellschaftlichen Diskussionen ist auch ein Ziel des sächsischen Lehrplanes. Die Kategorie „Arbeitswelt“ beschreibt das Umfeld, in dem die Physiker forschen: Es werden die großen Institute CERN und DESY mit aktuellen Forschungsgebieten vorgestellt, ein besonderes Augenmerk erhält die Internationalität solcher Forschungsprojekte und daraus resultierende Bildung von Kollaborationen, die auch aus soziologischer Sicht interessant sind. Im Hinblick auf die spätere Studien- und Berufswahl, eventuellem Wecken auch von emotionaler Begeisterung und hinsichtlich der Allgemeinbildung ist diese Kategorie sinnvoll.

In der Ausgestaltung der Seiten werden die bereits von mir genannten Aspekte sichtbar und deutlicher.

5. Didaktischer Hintergrund nach Wagenschein und Umsetzung

Ein wichtiger Impuls für die inhaltliche Ausgestaltung unter didaktischen Gesichtspunkten bietet mir Wagenschein.

Martin Wagenschein (1896-1988) begründete die didaktische Theorie vom exemplarischen Lernen. Diese entstand als Reaktion auf die Stofffülle in den Schulen, die er aus mehreren Gründen ablehnte: so sah er in der ständigen Anhäufung von zu vielem Wissen erstens eine Überfüllung des Schülerkopfes, der dann vieles wieder vergisst, zweitens hielt er dies auch aus Gründen der persönlichen Lernmotivation eines Schülers für ungeeignet, drittens barg die bloße Ansammlung von Wissen die Gefahr, dass dies dann später nicht angewendet werden konnte. Als Problem kam außerdem hinzu, dass unter dem zeitlichen Druck zum Schaffen des Lernstoffes ein hastiges Lerntempo zu Lasten der Gründlichkeit einsetzte. In der Summe sah Wagenschein also die Variante, den Stoff eines Gebietes durch Aufzeigen jeglichen bekannten Wissens, als zu wenig nützlich an.

Seine Theorie vom exemplarischen Lernen ist „das Gegenteil des Spezialistentums“^{XV}: „Ursprüngliche Phänomene der geistigen Welt können am Beispiel eines einzelnen, vom Schüler wirklich erfassten Gegenstandes sichtbar werden.“^{XVI} Dies bedeutet, dass ein repräsentatives Beispiel ausgewählt und sehr ausführlich behandelt wird, damit der Schüler dieses versteht und die grundlegenden

^{XV} aus Wagenschein (1997): Verstehen lehren, S. 33

^{XVI} ebenda S. 32

Strukturen darin anschließend auch auf ähnliche Sachverhalte anwenden kann. „Es [die Methodik des exemplarischen Betrachtens] will nicht vereinzeln; es sucht im Einzelnen das Ganze.“^{xvii} Das gewählte Beispiel sollte also möglichst viele für den Themenkomplex charakteristische Eigenschaften besitzen; es sollte beispielhaft und dabei auf das Wesentliche reduziert sein.

Wie kann ich die von Wagenschein gewonnenen Erkenntnisse nun in Bezug zu meiner BeLL setzen?

Da es sich im Vornherein bei meinem Lehrbuch um eine zusätzliche, freiwillige Beschäftigung für den geeigneten Schüler handelt, habe ich gewisse Einschränkungen, die Wagenschein im Unterricht verspürte, nicht: Zeitdruck und eher geringe Motivation des Schülers. Jedoch halte auch ich es für sinnvoll, Sachverhalte exemplarisch statt ausführlich und in jeglicher Hinsicht komplett darzustellen. Stattdessen reduziere ich es auf das Wesentliche. Somit wird der Schüler nicht unterfordert; gleichzeitig findet aber auch keine sinnlose Wissensanhäufung statt.

Umsetzung erfuhr das „Exemplarische Lernen“ unter Anderem im Kapitel „Large Hadron Collider (LHC) - Die Erkenntnismaschine für die Teilchenphysiker“ in der Kategorie „Arbeitswelt“. Ausschlaggebend dafür, dass ich gerade diese Thematik exemplarisch behandelt habe, ist, dass Wagenschein dem gewählten Beispiel abverlangt, dass es für den Themenkomplex möglichst viele charakteristische Eigenschaften abdeckt. Dies ist hier hervorragend gegeben: Ausgehend vom LHC kann sehr viel über Teilchenphysik erklärt werden, daher auch die Wahl dieser Thematik als anschaulicher Einstieg im Vorwort. Nach den voranstehenden physikalischen Erklärungen in der Kategorie „Physikalischer Inhalt“ wird diese Thematik nun noch einmal ausführlicher aufgegriffen. Der LHC vereint viele Aspekte, die ich in anderen Kapiteln behandelt habe. Die im Vorwort gestellten Fragen, für welchen Zweck und warum gerade auf diese Weise teilchenphysikalische Forschung betrieben wird, ist in den anderen Kapiteln bereits beantwortet worden. Der vorher ahnungslose Leser kann nach vorheriger Lektüre der anderen Kapitel nun auch am Beispiel LHC nachvollziehen, warum diese unfassbaren Dimensionen benötigt werden, um zu neuen Erkenntnissen in der Teilchenphysik zu gelangen. Die ausführliche Darstellung von verschiedenen Daten zu dem Beschleuniger und zu den einzelnen Detektoren (siehe Abbildungen „Steckbrief ...-Detektor“) verdeutlicht den erforderlichen Aufwand sowohl an Material als auch an Personal. Auf den beiden Abbildungen mit den Bildunterschriften „Fakten zum LHC“ werden direkt an diesem Beschleuniger physikalische und technische Sachverhalte dargestellt, deren Verständnis in anderen Kapiteln vorbereitet wurde. Die Anwendung von Erkenntnissen aus der Grundlagenforschung wird auf drei Abbildungen mit der Bildunterschrift „Technologietransfer vom ATLAS Projekt“ beispielhaft für den ATLAS-Detektor behandelt. Dies stellt eine gute Ergänzung zu meinen Ausführungen im Kapitel „Grundlagenforschung in der Kontroverse“ in der Kategorie „Wissenschaftstheorie“ dar. Die ausführliche Behandlung des LHC hat also seine Aufgabe darin, an diesem beispielhaft die Inhalte vieler anderer Kapitel noch einmal darzustellen.

^{xvii} aus Wagenschein (1997): Verstehen lehren, S. 33

6. Selbstentwickeltes didaktisches Konzept und Umsetzung

Zur optimalen Vermittlung meiner Inhalte begann ich die Suche nach allgemein festgelegten didaktischen Konzepten für die Vermittlung von Teilchenphysik, jedoch musste ich bald feststellen, dass diese nicht vorhanden sind. Während meines Praktikums am DESY suchte ich deshalb Kontakt zu Personen, die in der Lehre tätig sind, um mit ihnen über dieses Problem zu reden. Sie bestätigten mich in meiner Erfahrung. Lutz Gerlach, Lehrer für Physik am Gymnasium und Betreuer des DESY-Schülerlabors^{xviii}, antwortete mir auf meine Frage nach einer in der Fachwelt anerkannten allgemeinen Didaktik der Teilchenphysik: „Wie man als Lehrern Schülern nahebringt, was Teilchen sind und wie man damit forscht, darüber gibt es keine einheitliche Lehrmeinung, sondern es gibt nur das Bemühen der Lehrkräfte, dies möglichst schlüssig zu vermitteln. Dies richtet sich nach den Schülern selbst und den Ansichten des betreffenden Lehrers sowie den sehr unterschiedlichen Lehrplänen. Deshalb ist das doch eher subjektiv.“^{xix} Diese Aussage unterstreicht sehr gut, was ich auch aus anderen Gesprächen erfuhr. Für mein Lehrbuch bedeutet das, dass ich keine vorgefertigten didaktischen Konzepte benutzen kann, sondern mir erst selbst eins entwickeln muss. Dabei helfen mir vor allem oben angesprochene Interviews.

Ich habe einige Hinweise für meine didaktischen Überlegungen erhalten, die ich in unterschiedliche Aspekte untergliedert habe.

Für den Aspekt der „Schülerbezogenheit“ ist das Aufrechterhalten der Faszination wichtig. Die Schülerlaborleiterin Karen Ong sagte mir, dass es besonders für ein Schulbuch wichtig ist, dass beim Lesen die Spannung erhalten wird, dass nicht nur Fakten vermittelt werden, sondern auch Faszination vermittelt und erhalten wird.^{xx}

Umgesetzt habe ich dies bei meinem Lehrbuch z. B. beim Vorwort. Hier habe ich viele erstaunliche Fakten zu den Dimensionen des betriebenen Aufwandes beim LHC zusammengetragen. Im Kapitel „Geschichte der Erforschung der Struktur der Materie“ wird durch die behandelten Größendimensionen und deren Beziehungen untereinander auch eine Faszination erzeugt. Von den noch aus dem Alltag bekannten 0,01 m ist der Mensch mit der Zeit zu Strukturen gelangt, die kleiner als unvorstellbare 10^{-18} m sind. Der erstaunliche Umstand, dass Erkenntnisse aus diesen unglaublich kleinen Abständen aber erheblichen Einfluss auf unser Weltbild haben können, zeigt sich im Kapitel „Heutige Fragestellungen der teilchenphysikalischen Grundlagenforschung“. Desweiteren fasziniert auch allein schon die Thematik an sich, wie z. B. im Kapitel „Aktuelle Forschungsgebiete“, wo in der Populärwissenschaft sehr beliebte Themen wie Antimaterie wissenschaftlich behandelt werden. Aber auch im Kapitel „Large Hadron Collider (LHC) – Die Erkenntnismaschine für die Teilchenphysiker“ werden viele Fakten vermittelt, die durchaus beeindrucken, seien es

^{xviii} Das DESY-Schülerlabor in Hamburg hat es sich zur Aufgabe gemacht, im Rahmen einer unterrichtsgebundenen Exkursion ganzen Schulklassen als auch in Ferienseminaren interessierten Schülern Wissen über Physik zu vermitteln. Ich selbst habe vom 19.10.2009 bis zum 22.10.2009 beim Ferienseminar Quantenphysik teilgenommen und konnte so mit den Lehrpersonen Interviews führen.

^{xix} zitiert nach Gerlach (2009)

^{xx} vgl. Ong (2009)

physikalische Vergleiche mit unserer alltäglichen Dimension oder die riesigen aufgewandten Ressourcen für die Detektoren.

Der nächste Aspekt ist generell auf Physik bezogen, diese Hinweise gelten auch für andere Untergebiete der Physik.

Zunächst ist es wichtig zu verdeutlichen, dass Physik dynamisch ist. Im Interview mit Karen Ong erfuhr ich, dass die Mitarbeiter des Schülerlabors immer wieder feststellen, dass für viele Schüler Physik etwas Absolutes, etwas fest als Naturgesetz im Raum Stehendes ist. „Dass die Physik sich aber bewegt und dass es da mal neue interessante Sachen gibt und dass man da mal alte Sachen aufgeben muss, das ist den Schülern meistens nicht bekannt.“^{XXI} Auch Axel Cholewa, Doktorand bei DESY und Praktikumsleiter, gab mir den Hinweis, dass die Dynamik der Theorien verdeutlicht werden muss.^{XXII}

Diesen Aspekt habe ich besonders in der Kategorie „Wissenschaftstheorie“ behandelt. Im ersten Kapitel „Begriffe Theorie, Experiment, Modell“ behandle ich bei der Erklärung des Begriffs Theorie auch die Eigenschaft der Modifizierbarkeit und Dynamik. Das Kapitel „Paradigmenwechsel“ verdeutlicht die herrschende Dynamik dadurch, dass es Umdeutungen naturwissenschaftlicher Erkenntnisse mit großen Auswirkungen darstellt. Der entwickelnde Vorgang in der Physik wird in der Kategorie „Physikalischer Inhalt“ im Kapitel „Standardmodell der Teilchenphysik“ unter der Überschrift „Entstehungsgeschichte“ noch einmal beispielhaft dargestellt. Falls der Leser das Buch Seite für Seite liest, habe ich dem Aspekt der Dynamik einen Unterpunkt beim ersten Kapitel „Vorangestellte Bemerkungen“ in der Kategorie „Physikalischer Inhalt“ gegeben, damit dieses von Anfang an beim Lesen im Hinterkopf bleibt.

Der nächste Hinweis stammt von Karen Ong und Axel Cholewa: Verdeutlichen der Beschränkungen, die mit der Verwendung von Modellen einhergehen. Karen Ong formulierte, dass die Erwähnung der Tatsache, dass die Modelle der Physik nicht die Realität widerspiegeln, sehr wichtig ist, sowie die Eingrenzung der Aufgaben der Physik.^{XXIII} „Physik versucht natürlich, die Realität zu enthüllen, wobei man das wahrscheinlich nicht kann; aber sie will das, was wir hier haben, möglichst exakt und genau beschreiben, um sich so der Realität immer mehr anzunähern.“^{XXIV} Axel Cholewa sensibilisierte mich für die Probleme, die bei der Nutzung didaktischer Modelle entstehen, welche für fachwissenschaftliche Modelle der Wirklichkeit entworfen worden sind. Er wies mich auf die Notwendigkeit hin, die Schüler daran zu erinnern, dass das im Lehrbuch benutzte didaktische Modell nur ein Modell für ein fachwissenschaftliches Modell der Realität ist und viele Einschränkungen aufweist, jedoch für einen kleinen Bereich gute Vorhersagen macht.^{XXV} Er formulierte auch, was eine meiner großen Aufgaben sein wird: „Theorien sind nur Modelle der Wirklichkeit. Was die Didaktik braucht, sind Modelle für die Modelle der Wirklichkeit.“^{XXVI}

Diese wichtigen Hinweise habe ich mit drei Unterpunkten ebenfalls im Kapitel „Vorangestellte Bemerkungen“ behandelt. Ausführlicher erfolgt dies in der Kategorie „Wissenschaftstheorie“. Bei der Erklärung des Begriffs Modell gehe ich auf die Tatsache ein,

^{XXI} zitiert nach Ong (2009)

^{XXII} vgl. Cholewa (2009)

^{XXIII} vgl. Ong (2009)

^{XXIV} zitiert nach Ong (2009)

^{XXV} vgl. Cholewa (2009)

^{XXVI} zitiert nach Cholewa (2009)

dass Modelle nur Wirklichkeitskonstruktionen, nicht die Wirklichkeit selbst, sind. Ausführlicher behandle ich dies unter der Überschrift „Wissenschaftstheoretische Grundlagen“. Unter dem hervorgehobenen Satz „Naturgesetze können nicht im Sinne der Mathematik bewiesen werden.“ geht es nochmals um den nicht vorhandenen Anspruch, die absolute Wahrheit zu enthüllen. Dies wird fortgesetzt unter den nächsten hervorgehobenen Sätzen „Die Modelle der Naturwissenschaft sind in keiner Weise als Abbildungen der Realität aufzufassen. Ein Modell dient zur Beschränkung der Untersuchung auf jeweils als wesentlich betrachtete Phänomene.“. Später werden die Probleme besprochen, die aus der Nutzung didaktischer Modelle resultieren, und als Beispiel die unter dem Kapitel „Experimenttypen“ verwendete Analogie für ein Streuexperiment mit dem Sack im Urwald angeführt. Es wird auf eine sich ergebende Einschränkung verwiesen. Damit sollte der Leser die Problematik erkannt haben.

Ein weiterer Hinweis für das Verfassen von Lehrbüchern in der Physik allgemein stammt von der Professorin Caren Hagner, die an der Universität Hamburg Teilchenphysik lehrt. Anstatt Faktenwissen zu präsentieren, soll ich in erster Linie auf das Verdeutlichen der grundlegenden dahinterstehenden gedanklichen Konzepte achten. In folgendem Zitat bezieht sie dies direkt auf die Teilchenphysik und verbindet es mit diesen für die Thematik typischen Schwierigkeiten: „Man kann nicht alles in der Teilchenphysik mit der Alltagswelt in Beziehung setzen, das geht nicht. Es gibt gewisse Grundgedanken, eben dass alles von Skalen abhängt, dass man Abstände immer mit irgendeiner Referenz vergleicht, [...] aber hinterher versucht man eben verschiedene Konzepte den Studenten nahezubringen: Was ist das Konzept eines Streuexperimentes? Der Begriff der Streuung ist ganz wichtig, über Streuung erfahren wir alles aus unseren Teilchen.“^{xxvii} In der Lehre wird also vor allem versucht, verschiedene Konzepte (statt bloßes Faktenwissen) zu erklären, die für das Denken in der Teilchenphysik wichtig sind. Neben dem grundlegenden Konzept der Streuung gilt dies ebenso wie z. B. für Erhaltungssätze.^{xxviii}

Zwei Beispiele, die besonders deutlich zeigen, wie ich versucht habe, dahinterstehende Gedankenkonzepte zu vermitteln statt Wissensanhäufung zu betreiben, sind die im Kapitel „Experimenttypen“ verwendete Analogie für ein Streuexperiment mit dem Sack im Urwald sowie die Thematik im Unterkapitel „Die starke Wechselwirkung“ unter der Überschrift „Build your own particle“. Bei ersterem habe ich sehr ausführlich beschrieben, wie die Person im Urwald auf den Inhalt schlussfolgert, dabei habe ich die Analogie so gewählt, dass sie sich in unseren Dimensionen abspielt und somit gut vorstellbar ist. Danach werden „Target“ und „Collider“ miteinander verglichen und mit der Analogie zu einem Autozusammenstoß wird hier wieder gut vorstellbar vermittelt, warum heutzutage eher „Collider“-Experimente durchgeführt werden. Nachdem ich sowohl das Prinzip eines Streuexperimentes als auch das eines „Collider-“ bzw. „Target-Experimentes“ verdeutlicht habe, wird zum Ende hin auf neuere Entwicklungen mit der Methode des Streuexperimentes verwiesen. In „Build your own particle“ erkläre ich ausgehend vom Standardmodell systematisch die Erscheinungen der Baryonen und Mesonen. Dabei verwende ich die Konzepte der Ladung und der Farbneutralität. Anstatt etwas zur Entdeckungsgeschichte eines bestimmten Hadrons zu schreiben, vermittele ich, wie der Leser sich durch logisches Nachdenken selbst frei existente

^{xxvii} zitiert nach Hagner (2009)

^{xxviii} vgl. Hagner (2009)

Quarkverbindungen herleiten kann. Kann er dies, so ist das dahinterstehende gedankliche Konzept ausreichend vermittelt worden.

Der letzte Aspekt ist direkt auf den Inhalt bezogen. „Die größte Schwierigkeit bei der Didaktik im Mikrokosmos ist das Problem mit der Anschaulichkeit und dass die Modelle manchmal unserer Intuition entgegenlaufen.“^{XXIX} Teilchenphysik spielt sich in Dimensionen ab, in denen die Gesetze der Quantenmechanik wirksam werden, und ist allein schon deshalb didaktisch betrachtet heikel. Die Phänomene der Quantenwelt sind mit unserer Alltagserfahrung nicht vereinbar. Axel Cholewa hat mir den Hinweis gegeben, trotz oder eben gerade wegen dieser Tatsache bei quantenphysikalischen Erscheinungen nicht mit Begriffen wie „logisch“ oder „unlogisch“ zu arbeiten.^{XXX} Noch dazu sind die Dimensionen so extrem klein, dass die Forderung nach Anschaulichkeit und Vorstellbarkeit berechtigt, aber auch nicht leicht zu erfüllen ist. Von daher erhielt ich von Karen Ong und Prof. Caren Hagner den Hinweis, viele Vergleiche beim Umgang mit diesen Größenordnungen zu verwenden.^{XXXI}

Im Kapitel „Vorangestellte Bemerkungen“ habe ich im letzten Unterpunkt darauf hingewiesen, „dass gerade in der Teilchenphysik, die den Gesetzen der Quantenmechanik gehorcht, nicht alles allzu wörtlich genommen werden und Alltagserfahrungen und Alltagsvorstellungen zurückgenommen werden sollten.“ Dieser Gedanke findet in der „Anmerkung: Quantenmechanische Grundlagen“ im Kapitel „Notwendigkeit hoher Energien“ eine weitere Vertiefung, außerdem wird hier das Ablösen von den Begriffen „logisch“ und „unlogisch“ gefordert. Zur besseren Anschaulichkeit habe ich das Kapitel „Geschichte der Erforschung der Struktur der Materie“ bereits ganz am Anfang eingefügt, da so eine Grundlage für die Vorstellung der betreffenden Größenordnungen geschaffen werden soll. Hier verdeutlicht die Grafik „Vom Kristall zum Quark“ die Größendimensionen und das Verhältnis zueinander. Im mit der Grafik korrespondierenden Text soll der Satz „Zur Veranschaulichung: Wäre das Atom so groß wie ein Fußballfeld, hätte der Atomkern die Größe einer Erbse.“ eben genau dieses fördern. In der Tabelle „Einheitenvorsätze“ werden die Einheitenvorsätze übersichtlich dargestellt. Ein weiteres Beispiel, in dem ich zur besseren Verständlichkeit Vergleiche und Bilder eingesetzt habe, ist die Erklärung des Higgs-Mechanismus im Unterkapitel „Die Gravitation“ im Kapitel „Wechselwirkungen“. Der Higgs-Mechanismus ist eine sehr komplexe mathematische Struktur. Ich vermittele den Mechanismus durch eine kurze Zusammenfassung des dahinterliegenden Gedankens: „Peter Higgs postulierte den Higgs-Mechanismus: Masse ist ihm zufolge keine Teilcheneigenschaft, sondern das Ergebnis einer Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld. Dabei entspricht eine stärkere Wechselwirkung einer größeren Masse.“ Veranschaulicht wird dies durch die Grafik, die auf unterhaltsame Weise eine einfache Vorstellung ermöglicht. Ein letztes Beispiel ist im Kapitel „Large Hadron Collider (LHC) – Die Erkenntnismaschine für die Teilchenphysiker“ in den beiden Abbildungen mit der Bildunterschrift „Fakten zum LHC“ der Text in den orangen Kreisen: Hier werden sehr viele Vergleiche mit alltäglichen Maßstäben gezogen und vermitteln so eine bessere Vorstellung.

^{XXIX} zitiert nach Cholewa (2009)

^{XXX} vgl. Cholewa (2009)

^{XXXI} vgl. Hagner (2009) und Ong (2009)

Die Verwendung von Abbildungen zur Vermittlung von Wissen regte Karen Ong an.^{xxxii} Dass nicht nur Text verwendet wird, sondern auch Abbildungen verwendet werden, sollte heutzutage beim Entwerfen von Lehrbüchern selbstverständlich sein. Dies ist jedoch bei meiner Thematik, wo Anschaulichkeit eines der wichtigsten zu beachtenden Kriterien ist, noch einmal besonders hervorzuheben. Inwiefern ich dies in meinem Lehrbuch umgesetzt habe, untersuche ich später unter „adäquate Bild-Text-Verschränkung“.

7. Weitere Kriterien zur Untersuchung des Lehrbuches

Neben dem didaktischen Konzept des Exemplarischen Lernens von Martin Wagenschein und meinem selbstentworfenem didaktischen Konzept gibt es noch eine Reihe von Kriterien, deren Einhaltung ebenfalls eine möglichst erfolgreiche Übermittlung der Inhalte sichern soll. Die Erarbeitung erfolgte in Zusammenarbeit mit meiner externen Betreuerin Prof. Gesche Pospiech auf der Grundlage zweier Quellen.^{xxxiii} Die Unterteilung erfolgt in inhaltliche, strukturelle und formale Kriterien.

Das Kriterium Gestaltung werde ich nicht verwenden. Nach Rücksprache mit Frau Prof. Pospiech habe ich mich dazu entschieden, mein Lehrbuch *inhaltlich* zu entwerfen. Die Beschäftigung damit, wie ein angemessenes Layout auszusehen hat, würde zu weit führen. Eine didaktisch sinnvolle Aufbereitung eines Lehrbuches mithilfe von Layout wäre eine BeLL für sich. Mein Lehrbuch ist daher eben nur pragmatisch „gestaltet“ durch ein Inhaltsverzeichnis, eine übersichtliche Gliederung durch ein Überschriftensystem, ein nachvollziehbares Quellen- und Abbildungsverzeichnis sowie eine sinnvolle Abbildung-Text-Verschränkung. Die Formatierung im Lehrbuch weicht von der meiner übrigen BeLL ab, da ich diese für den Zweck der Darstellung für am geeignetsten halte.

7.1. Inhaltliche Kriterien

7.1.1. Sachrichtigkeit

Eines der wichtigsten, wenn nicht sogar das wichtigste Kriterium für Lehrmaterial generell ist, ob die vermittelten Informationen sachlich richtig sind und nicht falsches Wissen übermittelt wird. Zur Sicherung, dass dies bei mir gegeben ist, habe ich auf eine fundierte Quellenarbeit geachtet und die Texte von Experten korrigieren lassen, die selbst durch ihre Tätigkeit einen größeren Wissensschatz über die Thematik Teilchenphysik besitzen oder selbst Teilchenphysiker sind. Letzteres gilt für Dr. Isabel Melzer-Pellmann, welche mir immer bei allen Fragen betreffend den Inhalt des Lehrbuches beratend zur Seite stand.

^{xxxii} vgl. Ong (2009)

^{xxxiii} Eschenhagen, Kattmann, Rodi(1998): Fachdidaktik Biologie, S. 359-369 und Großengießer, Kattmann, Krüger(2010): Biologiedidaktik in Übersichten, S. 108-109. Obwohl es sich hierbei um Didaktikbücher für Biologie handelt, ließen sich einige der für Biologielehrbücher vorgestellten Kriterien auf mein Physiklehrbuch übertragen.

7.1.2. Aktualität der vorgestellten Inhalte

Die in diesem Buch behandelten Inhalte sind sehr aktuell. Ich habe mich während des Lepton-Photon-Symposiums und meinem Praktikum bei DESY sowie meines Besuchs am CERN über die neuesten Entwicklungen in der Teilchenphysik informiert und diese Erkenntnisse dementsprechend verarbeitet. Beispielhaft zeigt dies die Behandlung des LHC, welcher erstmals im September 2008 seinen Betrieb begann. Dies ist natürlich schon zwei Jahre her, jedoch habe ich in keinen anderen Schulbüchern einen Verweis auf dieses Projekt gefunden. Desweiteren war zwar die erstmalige Inbetriebnahme des LHC im September 2008, danach gab es jedoch Komplikationen, sodass der richtige Betrieb erst seit Mitte 2010 läuft. Somit kann ich auch noch nichts über gewonnene Entdeckungen schreiben, da die Zeit für diese zu kurz ist.

7.1.3. Bezug zum Lehrplan

Mein Buch deckt alle im Lehrplan für den Bereich Elementarteilchenphysik geforderten Inhalte ab. Das Prinzip eines Linear- oder Kreisbeschleunigers wird im Kapitel „Die Mikroskope der Teilchenphysiker – Teilchenbeschleuniger“ eingeführt. Die Eigenschaften von Elementarteilchen und das Quark-Modell werden im Kapitel „Standardmodell der Teilchenphysik“ behandelt. Den Ausblick auf aktuellen Forschungsstand zu den Grundkräften erhält der Leser im Kapitel „Wechselwirkungen“ sowie im Unterkapitel „Vereinigung der Wechselwirkungen“. Die Inhalte werden aber wesentlich ausführlicher als im Lehrplan erfordert behandelt, da es über das bloße „Einblick gewinnen“ hinausgeht. Mein Lehrbuch bietet mehr als eine „grundlegende Orientierung“ und dafür eine tiefere Behandlung der Themen. Die ebenfalls geforderte Positionierung der Schüler zum Kosten-Nutzen-Prinzip bei der wissenschaftlichen Forschung wird durch das Unterkapitel „Grundlagenforschung in der Kontroverse“ aufgegriffen.

Die Darstellung der Suche nach den tiefen Geheimnissen im Mikrokosmos sowie mit Dunkler Materie und Dunkler Energie dann auch im Makrokosmos beeinflusst die Entwicklung eines eigenen Weltbildes des Lesers. Auch dies fordert der sächsische Lehrplan.

Meine Kategorie „Wissenschaftstheorie“ behandelt physikalische Denkweisen und Arbeitsmethoden. Der Charakter von Modellen wird ausführlich unter „Wissenschaftstheoretische Grundlagen“ behandelt.

Zusammenfassend kann ich sagen, dass ich alle im Lehrplan geforderten Inhalte behandelt habe und dies meist ausführlicher, als von diesem gefordert.

7.1.4. Historische und logisch-orientierte Darstellung

Wie ich während meiner inhaltlichen Recherche für die Kategorie „Physikalischer Inhalt“ feststellen musste, gibt es hauptsächlich zwei Varianten, diesen zu vermitteln: Die historische und die logisch-orientierte Herangehensweise.

Erstere zeichnet sich dadurch aus, dass chronologisch die Entdeckungen im Mikrokosmos aufgezählt werden. Begonnen wird dabei meistens mit der Vielzahl von neu entdeckten Teilchen in der kosmischen Strahlung. Die historische Darstellung endet dann in der Etablierung der ordnenden Struktur „Standardmodell“. Ein Beispiel hierfür ist der Metzler mit den Seiten 528 und 529, hier beginnt das Kapitel Elementarteilchenphysik mit dem Unterkapitel „Vom Elektron zum Teilchenzoo“. Es ist eine historische Darstellung mit der

Behandlung einiger zum Standardmodell führenden Entdeckungen, Gesetzmäßigkeiten und Gedanken. Wie in meiner Analyse bereits erwähnt, halte ich diese Darstellung der Thematik für unübersichtlich. Ich sehe bei der historischen Darstellung die Schwierigkeit, dass sich die klare und eindeutige Übermittlung von den Ordnungsstrukturen nicht so leicht mit der historischen Herangehensweise vereinbaren lässt, da sich diese eben auch im Laufe der Zeit entwickelt haben. Der Doktorand am DESY Hannes Schettler erzählte mir im Interview seine Erfahrungen mit der historischen Darstellung während seines Studiums: „Der historische Aspekt hat einen relativ starken Schwerpunkt, der interessant sein mag, aber der manchmal – gerade, wenn man es neu lernt, finde ich zumindest – verwirrend ist.“^{xxxiv} Aus meinen Erfahrungen heraus kann ich diese Aussage bekräftigen. Sicherlich ist es interessant zu erfahren, wie sich alles mit der Zeit entwickelt hat, jedoch bedarf diese Darstellung einer guten Vorbereitung, um den Lernenden nicht zu überfordern oder zu verwirren. Da es mir vor allem um die Darstellung aktueller Physik und Forschungsmethoden geht, wäre für mein Vorhaben der historische Weg nur umständlich.

Stattdessen bediene ich mich der logisch-orientierten Herangehensweise. Diese behandelt keine historischen Entwicklungen (höchstens in weiterführenden Exkursen), sondern geht direkt vom Standardmodell aus und erklärt mithilfe von diesem die Phänomene in der Welt der kleinsten Teilchen. Im Interview mit Prof. Caren Hagner erfuhr ich, dass momentan in der Lehre die logisch-orientierte Betrachtung die historische Betrachtung ablöst, welche früher üblich war.

Historisches findet sich bei mir da, wo es sich gut mit dem Inhalt vereinbaren lässt: Im Kapitel „Die Mikroskope der Teilchenphysiker – Teilchenbeschleuniger“ lässt sich die historische Entwicklung gut zur Erklärung der Entwicklung der Methoden der Teilchenbeschleunigung nutzen. Der Unterpunkt „Entstehungsgeschichte“ im Kapitel „Standardmodell der Teilchenphysik“ ist auch deswegen sinnvoll, um etwas zur Entstehung der Theorie und zu den mit der Einführung dieser einhergehenden Erleichterungen zu sagen. Dies soll ein wenig über Theoriebildung in der Physik aufklären und lässt sich gut mit der Kategorie Wissenschaftstheorie verbinden.

7.1.5. Erkennbarer roter Faden in den Ausführungen

Neben einer sinnvoll aufgebauten Struktur zählt für mich zu einem „roten Faden“ auch eine gewisse Zielgerichtetheit. Ersteres habe ich bereits unter „Struktur“ behandelt. In Hinblick auf Zielführung zeigt sich dieser Aspekt z. B. darin, dass der Leser sich nicht zu lange bei solchen Aspekten wie der Gründungsgeschichte des CERN oder der Biografie von beispielsweise Peter Higgs aufhalten muss. Dies ist zwar auch interessant, jedoch ist die Gründungsgeschichte des CERN größtenteils mit politischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Prozessen verwoben und hat dadurch natürlich keine allzu große Schnittmenge mit den Informationen, die durch mein Lehrbuch vermittelt werden sollen. Genauso wäre die Behandlung der Biografie von Peter Higgs für meine Thematiken auch nicht zielführend.

^{xxxiv} zitiert nach Schettler (2009)

7.1.6. Ausgeglichenes Wechselspiel zwischen Prägnanz und anregenden Zusätzen

Dieser Punkt entfällt für mich aufgrund der Tatsache, dass die Beschäftigung mit meinem Lehrbuch nicht zwangsweise unter den Zeitdruck im Unterricht fällt. Mit Blick auf den Lehrplan besteht fast mein gesamtes Lehrbuch aus „anregenden Zusätzen“, aber so ist es ja auch von Anfang an konzipiert worden. Trotzdem ist natürlich ausgewähltes Lesen möglich; wenn der Leser gewisse Themen für nicht interessant genug erachtet, kann er diese einfach weglassen.

7.1.7. Anmerkung zur Kategorie „Arbeitswelt“

Was bei der Lektüre der Kategorie „Arbeitswelt“ auffällt, ist die wesentlich ausführlichere Behandlung der Arbeitsweise in der experimentellen Teilchenphysik auf ungefähr 4 Seiten, wohingegen die Theorie lediglich durch eine Seite abgehandelt wird. Dies liegt einerseits an der besseren Informationslage, die ich durch mein Praktikum am und meine Kontakte zum DESY hatte. Desweiteren bietet die Arbeitsweise in der experimentellen Teilchenphysik aber auch mehr spezifische Inhalte, die so nur dort auftreten, während sich die Theorie nicht so sehr von der Theorie in anderen Disziplinen unterscheidet.

7.1.8. Anmerkung zur Übernahme von pdf-Skripten

An dieser Stelle möchte ich darauf eingehen, weshalb ich Auszüge aus einigen pdf-Skripten als Abbildungen übernommen habe, und zwar vor allem im Kapitel „Large Hadron Collider (LHC) - Die Erkenntnismaschine für die Teilchenphysiker“. Dies liegt daran, dass die betreffenden Seiten inhaltlich und strukturell für meine Arbeit sehr passend sind. Nach Rücksprache mit Herrn Dr. Xylander habe ich mich daher dafür entschieden, sie unter Quellennachweis so in meine Arbeit zu integrieren.

7.1.9. Anmerkung zur Darstellung der Quellen

Während der Arbeit an meinem Lehrbuch habe ich bei der Darstellung der Quellen viel überlegt, schlussendlich habe ich mich für die vorliegende Variante entschieden. Wörtliche Zitate habe ich mit Anführungsstrichen gekennzeichnet und deren Herkunft kurz in einer Fußnote erläutert, bei der ersten Fußnote findet sich der Hinweis auf eine ausführliche Bibliografie im Quellenverzeichnis. Diese Kennzeichnung von Zitaten habe ich nicht in den ersten beiden Kapiteln der Kategorie „Wissenschaftstheorie“ genutzt. Hier habe ich viele Formulierungen dem Quellenmaterial komplett oder nur wenig verändert übernommen, aus Gründen der Übersichtlichkeit (es handelt sich schließlich um ein Lehrbuch, dessen Lesefluss nicht unterbrochen werden sollte) habe ich daher zu Beginn des ersten Kapitels in einer Fußnote auf diesen Umstand aufmerksam gemacht und die benutzten Quellen aufgelistet anstatt eine Zitierweise mit Anführungsstrichen und eckigen Klammern bei Veränderungen des ursprünglichen Zitats etc. zu verwenden.

Desweiteren habe ich in Fußnoten auf die Herkunft verwendeter Analogien aufmerksam gemacht sowie an einigen Stellen mit „vgl.“ in der Fußnote die konkrete Quelle zu einem längeren Absatz oder zu einem Kapitel angegeben, wenn sich dies den verwendeten Inhalten entsprechend angeboten hat. Für Textabschnitte ohne jegliche Ergänzung gelten aber auch die im Quellenverzeichnis angegebenen Quellen.

7.2. Strukturelle Kriterien

7.2.1. Gliederung und Anordnung der Themen

Zunächst untersuche ich, inwiefern die Gesamtgliederung (siehe Inhaltsverzeichnis) logisch sinnvoll ist.

Mein Lehrbuch muss nicht chronologisch gelesen werden, da die einzelnen Abschnitte in sich geschlossen sind. Je nach unterschiedlicher Interessenlage und Vorkenntnissen können die Kapitel unabhängig voneinander gelesen werden. Es kann also sein, dass sich ein Leser nur für z. B. die Arbeitsweise interessiert und ein anderer wiederum das ganze Buch von vorne bis hinten durchliest. Der Hinweis, dass das individuelle Lesen variabel gestaltet werden kann, findet sich im Vorwort.

Wenn ich von einem Leser ohne viele Vorkenntnisse ausgehe, so bewerte ich es aber tatsächlich als am sinnvollsten, die Kategorien in der im Inhaltsverzeichnis angeordneten Reihenfolge zu lesen. Erst durch die Physik dahinter erklärt sich der notwendige Aufwand, außerdem beantworte ich ganz am Anfang dieser Kategorie auch die Frage, mit welchem Blick auf welches Ziel geforscht wird. Mit den wissenschaftstheoretischen Hintergründen erklärt sich die Methodik, und beides zusammen liefert eine Begründung und ein besseres Verständnis für die Notwendigkeit der existenten Arbeitsweise. Beispielsweise erschließt sich der Wert der am CERN gemachten Entdeckungen erst dann, wenn bekannt ist, was W- und Z-Bosonen eigentlich sind. Genauso ist es erst sinnvoll, über die verschiedenen Schritte bei der Messung zu lesen, wenn die Schrittfolge der naturwissenschaftlichen Methode bekannt ist.

Weitere wichtige Fragen sind, ob komplexe Themen durch vorangehende Kapitel vorbereitet werden und Zusammenhänge zwischen den einzelnen Teilen deutlich erkennbar sind.

Das Vorwort steht vor allen Kategorien und soll noch einmal die Motivation erhöhen, außerdem bietet es einen Rahmen, in dem sich das Lehrbuch inhaltlich bewegen wird, sodass ich einen Bogen von Beginn bis zum Ende spannen kann.

Nun betrachte ich die Anordnung der Themen in den einzelnen Kategorien. Ich beginne bei der Kategorie „Physikalischer Inhalt“. Die Kapitel „Was ist Teilchenphysik?“, „Geschichte der Erforschung der Struktur der Materie“ sowie „Heutige Fragestellungen der teilchenphysikalischen Grundlagenforschung“ haben vor allem vorbereitenden Charakter. Sie sollen den Leser mit diesem Gebiet der Naturwissenschaft Physik bekannt machen und dessen Notwendigkeit verdeutlichen, ohne zunächst mit vielen physikalischen Fakten aufzuwarten. Mit dem Kapitel „Notwendigkeit hoher Energien“ folgt die Überleitung zu dem physikalischen Hintergrund. Hier wird klargestellt, wieso eine einfache Laboranordnung, wie bei der Untersuchung der Fallgesetzte, nicht mehr ausreicht. Das nächste Kapitel „Experimenttypen“ verdeutlicht noch einmal diese Tatsache und stellt das gedankliche Konzept eines Streuexperimentes dar. Die Auflösung der Analogie mit dem Sack im Urwald zum Vorgang beim teilchenphysikalischen Experiment steht am Ende des Kapitels, hier werden Teilchenbeschleuniger und Detektoren vorgestellt. Logischerweise bilden diese beiden Themen auch die nächsten beiden Kapitel. „Die Mikroskope der Teilchenphysiker – Teilchenbeschleuniger“ steht deshalb vor dem Kapitel „Detektoren“, da Teilchen zunächst den Beschleunigungsvorgang durchlaufen, bevor sie nachgewiesen werden. Aufbauend auf den „Werkzeugen“, mithilfe derer Erkenntnis erlangt wird, wird nun die Sammlung der

Erkenntnisse vorgestellt: das Standardmodell der Teilchenphysik. In dem gleichnamigen Kapitel wird ausführlich diese Theorie erklärt, im darauffolgenden namens „Wechselwirkungen“ wird auf diese gründlich eingegangen. Diese beiden Kapitel stellen den Schwerpunkt dar, wenn es darum geht, über Teilchenphysik an sich zu lernen. Es ist nur logisch, dass das Kapitel „Aktuelle Forschungsgebiete“ zum Schluss steht. Zunächst wurde das Verständnis von Teilchenphysik bis zum Standardmodell geschaffen, nun folgt der Ausblick auf heutige und zukünftige Forschung.

Die Kategorie „Wissenschaftstheorie“ zeigt besonders deutlich, wie komplexe Themen durch vorangehende Kapitel vorbereitet werden. Am Anfang steht die simple, aber unentbehrliche Begriffserklärung, mithilfe derer das Kapitel „Wissenschaftliche Grundlagen“ vorbereitet wird. Dieses wiederum bildet den Ausgangspunkt für ein angemessenes Verständnis von den folgenden drei Kapiteln „Paradigmenwechsel“, „Das Zusammenwirken von Theorie und Experiment“ sowie „Simulationen“. Für das letzte Kapitel „Grundlagenforschung in der Kontroverse“ sind die vorangehenden Kapitel nicht notwendig. Es bildet ein eigenständiges Thema. Es steht deswegen am Ende, da es eine gute Überleitung zur nächsten Kategorie bildet. In ihm wird nämlich der Aspekt der (hier noch finanziellen) Ressourcenbeanspruchung in der teilchenphysikalischen Forschung angesprochen, und in „Arbeitswelt“ nimmt dieser Aspekt (insbesondere bezogen auf Arbeitskräfte) eine zentrale Rolle ein.

In der Kategorie „Arbeitswelt“ handeln die ersten drei Kapitel vom CERN, LHC und DESY. Dass die Institute und deren Beschleuniger vor der Unterscheidung in die Arbeitsweisen in Theorie und Experiment stehen, ist unter Anderem deswegen angebracht, da für das DESY bereits der Beschleuniger HERA etwas ausführlicher behandelt wird. Die Überleitung zur Arbeit in Kollaborationen erfolgt durch das Kapitel „Das ‚HERA-Modell‘ der internationalen Zusammenarbeit“ und schließt sich direkt an das Kapitel „DESY“ an. Im nächsten Kapitel wird die Arbeitswelt in der theoretischen Teilchenphysik behandelt, dann folgt dies für die experimentelle Teilchenphysik.

Den Abschluss bildet das Nachwort, welches die Aspekte der Einleitung aufgreift und somit den Bogen schließt.

Neben der Gesamtgliederung müssen auch die Abschnitte innerhalb der einzelnen Unterkapitel logisch aufeinander aufbauend sein.

Beispielhaft untersuche ich das Unterkapitel „Die starke Wechselwirkung“. Nach einer kurzen steckbriefartigen Auflistung der grundlegenden Fakten gehe ich unter der Überschrift „Farbladung“ auf die Beschreibung der starken Wechselwirkung mithilfe von Farbladungen ein. Dies bildet die Grundlage für die nächste Überschrift „Build your own particle“, denn für die eigenständige Herleitung real existenter Quarkkombinationen muss der Hintergrund der erforderlichen Farbneutralität bekannt sein. Unter dieser Überschrift gehe ich zuerst auf Baryonen, dann auf Mesonen ein, um mich zum Schluss zu höheren Quarkverbindungen zu äußern. Ist nun geklärt, welche Verbindungen aus Quarks gebildet werden können, werden die Eichbosonen und deren Mechanismen behandelt, die die Stabilität derselben sichern, so unter der Überschrift „Gluonen“. Weitere Eigenschaften der starken Wechselwirkung finden sich unter der Überschrift „Confinement“. Zum Schluss gehe ich darauf ein, wie die Gluonen zwischen Quarkverbindungen wirken, denn vorher habe ich nur behandelt, wie die Stabilität innerhalb einer Quarkverbindung gesichert wird. Diese Anordnung der Abschnitte ist logisch, da ich zunächst die Grundlagen schaffe, um diese dann anzuwenden. Außerdem gehe ich vom

Kleineren ins Größere, da ich von der Betrachtung innerhalb der Quarkverbindungen zur Betrachtung weiter draußen, die die Wechselwirkung zwischen den Quarkverbindungen untersucht, wechsele.

7.2.2. Adäquate Bild-Text-Verschränkung

Für eine sinnvolle Wissensübermittlung ist es wichtig, dass Bild und Text sich gegenseitig ergänzen. Eine unkommentierte Abbildung am Textrand ist wenig hilfreich. Trotzdem sollte die Bildunterschrift nicht zu weit greifen, denn die wichtigsten Grundinformationen sollten noch immer im Text stehen und die Bildunterschriften lediglich auf diesen aufbauen. Desweiteren ist die Auswahl von geeignetem Material nicht willkürlich durchzuführen, da die Abbildungen einen möglichst hohen und deutlich erkennbaren Aussagewert besitzen sollen, der die Textaussagen im angebrachten Maße unterstützt und erweitert. Ebenso ist darauf zu achten, dass die Abbildung im Text durch einen kurzen Hinweis im Text vorbereitet wird und die Bildunterschrift treffend ist.

Beispielhaft untersuche ich mein Kapitel „Detektoren“ auf dieses Kriterium hin. Es besitzt zwei Abbildungen. Die erste verdeutlicht – wie sie auch im Text vorbereitet wird und wie es in der Bildunterschrift steht – den zwiebelschalenartigen Aufbau des Detektors. Dabei bietet sich dem Leser eine Sicht in den aufgeschnitten Detektor, die einzelnen Komponenten sind unterschiedlich gefärbt und besitzen eine Bezeichnung. Im weiteren Text werden die einzelnen Komponenten erklärt, der Leser kann anhand der Grafik ihre Position im Detektor sehen. Der neben dem Detektor abgebildete Mensch vermittelt das Größenverhältnis zwischen der Höhe eines ausgewachsenen Menschen und einem Detektor. Die zweite Abbildung bildet einen Detektorquerschnitt ab, in dem die spezifischen Teilchenspuren bestimmter Teilchen eingezeichnet sind. Eine Skala gibt die Breite des Detektors an. Die einzelnen Detektorschichten sind farbig verschiedenen dargestellt, den Farben wird am Rand eine bestimmte Detektorschicht namentlich zugeordnet. Im Text wird die Abbildung dadurch vorbereitet, dass die Tatsache genannt wird, dass anhand der ausgelösten Signale Rückschlüsse auf das Teilchen gezogen werden können. Die Abbildung liefert dafür Beispiele, da die spezifischen Spuren vom Elektron, Photon, Neutron, Proton und Myon eingezeichnet sind. Dieser Umstand wird auch in der Bildunterschrift hervorgehoben. Zuvor wird in dieser aber das Zustandekommen der Ansicht auf den Detektor erklärt.

Die beiden Abbildungen im Kapitel „Detektoren“ bieten eine sinnvolle Erweiterung des Textes, durch Hinweise im Text und Bildunterschriften sind sie gut eingebunden und ausreichend in ihrem Zweck erklärt.

7.3. Formale Kriterien

7.3.1. Altersgemäße Sprache

Für ein angemessenes Sprachniveau habe ich festgelegt, nicht zu wissenschaftlich zu schreiben. Schließlich soll es für das Sprachniveau und die physikalische Begriffskennntnis eines Schülers eines Physik-Leistungskurses geschrieben werden und nicht für einen schon länger Studierenden. Allerdings sollen die Sachverhalte auch nicht zu umgangssprachlich dargestellt werden. Ich habe einen Mittelweg gewählt.

Desweiteren dient mir die Überprüfung der Satzlänge als Kriterium. Dazu habe ich an drei verschiedenen Stellen des Lehrbuches die Wörter von zehn hintereinanderstehenden Sätzen gezählt und den Mittelwert gebildet. Nach einem Fachbuch zur Schulbuchanalyse^{xxxv} gilt „für Erwachsene: Sätze mit bis zu 13 Wörtern sind sehr leicht, mit 14-18 Wörtern immer noch relativ leicht, mit 19-25 mittelmäßig gut verständlich. Ab etwa 30 Wörtern pro Satz wird das Verstehen schwer.“^{xxxvi} Den in der Oberstufe durchschnittlich 17- bis 18-jährigen Leser ordne ich den Erwachsenen zu, sodass hier diese Daten angewendet werden dürfen. Ich habe in jeder Kategorie einmal zehn Sätze ausgewählt. Für die Kategorie „Physikalischer Inhalt“ betrifft dies die ersten zehn Sätze vom Kapitel „Die Mikroskope der Teilchenphysiker - Teilchenbeschleuniger“, für „Wissenschaftstheorie“ das Kapitel „Simulationen“ und für „Arbeitswelt“ das Kapitel „Die Messung“. Dabei komme ich durchschnittlich auf 14,9 Wörter pro Satz, somit sind meine Sätze relativ leicht. Diese Tatsache zeigt, dass die Satzlänge altersgemäß gestaltet wurde und ich somit meinem Anspruch in diesem Bereich nachgekommen bin.

7.3.2. Abwechslungsreicher Wortschatz

Für einen guten Ausdruck und damit einhergehender Erhaltung des Leseflusses ist ein abwechslungsreicher Wortschatz anstatt der Verwendung der immer gleichen Wörter sehr wichtig. Die ausgetauschten Wörter sollten aber trotzdem noch geläufig sein. Ein Beispiel hierfür ist, wie in jedem dieser drei Sätze jeweils einmal das Wort „erreicht“ auftaucht: „Dies wird durch die Beschleunigung von Teilchen (Erhöhung der Bewegungsenergie) *erreicht*. Da in den Beschleunigern sehr hohe Energien *erreicht* werden, spricht man auch von Hochenergiephysik.

Mittlerweile wurden so kleine Wellenlängen *erreicht*, dass man so bei DESY das Proton (etwa einen Femtometer groß) abtasten konnte.“ Dies habe ich umformuliert in: „Dies wird durch die Beschleunigung von Teilchen (Erhöhung der Bewegungsenergie) *möglich*. Da in den Beschleunigern sehr hohe Energien *erzielt* werden, spricht man auch von Hochenergiephysik. Mittlerweile wurden so kleine Wellenlängen *erreicht*, dass man so bei DESY das Proton (etwa einen Femtometer groß) abtasten konnte.“

Die Abwechslung im Wortschatz bezieht sich aber nicht auf die Verwendung von Fachbegriffen. Mehr dazu weiter unten.

7.3.3. Notwendigkeit und rechtzeitige Erklärung von Fachbegriffen

Das Prinzip, zur Erhöhung des Leseflusses einen abwechslungsreichen Wortschatz zu verwenden, lässt sich nicht auf die Verwendung von Fachbegriffen anwenden. Hier verhält es sich gegenteilig: Wenn ein Fachbegriff vorher einmal erklärt wurde, so ist es sinnvoll, diesen auch weiter zu verwenden, damit der Leser nicht verwirrt wird. Beispielsweise gibt es für die Eichbosonen verschiedene in der Fachwelt anerkannte Begriffe wie Botenteilchen, Austauschteilchen oder Trägerteilchen. Ich habe mich für den Begriff „Eichbosonen“ entschieden und ihn im Kapitel „Standardmodell der Teilchenphysik“ eingeführt: „Die Wechselwirkungsteilchen sind elementare Bosonen und heißen Eichbosonen.“ Einen Satz zuvor habe ich den Begriff „Bosonen“ erklärt, das Wort „elementar“ wird im ersten Kapitel

^{xxxv} Berck (1999): Biologiedidaktik

^{xxxvi} ebenda S. 118

erklärt. Somit habe ich eine verständliche Erklärung geliefert. Danach behalte ich den Begriff Eichboson bei, wie das gesamte Kapitel „Wechselwirkungen“ als auch das Unterkapitel „Vereinigung der Wechselwirkungen“ zeigen.

8. Schlusswort

Ein Lehrbuch zu schreiben bedeutet wesentlich mehr, als vorhandenes Wissen niederzuschreiben. Es erfordert das Hineinversetzen in die Position des Lesers, der gar keine bis wenige Vorkenntnisse besitzt. Komplexe Sachverhalte müssen anschaulich erklärt werden, geeignete Modelle gefunden werden. Viele didaktische Gesichtspunkte müssen beachtet werden, sei es die inhaltliche Gestaltung oder die Struktur. Die Schreibweise muss leserbezogen sein; es gibt viele weitere zu beachtende Aspekte.

Welcher Aufwand hinter einem Lehrbuch steht, ist mir mit dieser BeLL deutlich geworden, zumal die Heranführung an ein Thema wie Teilchenphysik, das in den meisten Fällen entweder Faszination oder Ablehnung hervorruft, in der didaktischen Praxis bisher nur wenig behandelt worden ist. Da ich kein Material und keine allgemein anerkannten didaktischen Konzepte vorgefunden habe, habe ich mir über die letzten 1,5 Jahre in Gesprächen mit Menschen, die alle mehr oder weniger mit (Didaktik der) Teilchenphysik in ihrem Beruf zu tun haben und dem Lesen in Fachbüchern, eine eigene Position zu diesem Thema erarbeiten können. Meine Ideen habe ich nun umsetzen können.

Ich hoffe, mit dem geschaffenen Lehrbuch bisher eher wenig interessierten Schülern etwas von der Faszination und dem Interesse zu übermitteln, das ich für Teilchenphysik habe, als auch interessierten Schülern das gewünschte geistige Futter geben zu können (so wie ich es mir damals gewünscht habe). Das betrifft in erster Linie Schüler dieser Schule, die meine Besondere Lernleistung in der Bibliothek lesen können, sowie meinen Bekanntenkreis. Druckreif und somit zugänglich für eine Leserschaft darüber hinaus ist mein Lehrbuch in dieser Form bisher nicht, da dafür das Layout noch nicht ausgereift genug ist.

Desweiteren würde es mich sehr freuen, wenn meine hier aufgeführten Gedanken und Versuche zur didaktisch angebrachten Vermittlung von Teilchenphysik durch zukünftige Besondere Lernleistungen eine kritische Reflexion und Weiterentwicklung erfahren würden.

9. Danksagung

Ich danke meinem internen Betreuer Dr. Bert Xylander für die tatkräftige Unterstützung und wohlwollende Betreuung.

Mein Dank geht auch an Andreas Röpke, der vor seinem Verlassen von Sankt Afra den Anfangsprozess meiner BeLL begleitet hat und mir viele anregende Ideen vermittelt hat.

Ebenso danke ich Prof. Dr. Gesche Pospiech dafür, mich während der Dauer von fast zwei Jahren bei meiner BeLL betreut zu haben. Die Zusammenarbeit mit ihr hat den Charakter meiner BeLL in vielerlei Hinsicht geprägt.

Mein besonderer Dank gebührt Prof. Dr. Albrecht Wagner und Prof. Dr. Joachim Mnich. Ihre wohlwollende Unterstützung ermöglichte mir die Teilnahme am Lepton-Photon Symposium sowie die Durchführung meines Praktikums am DESY.

Des Weiteren bin ich Dr. Isabell Melzer-Pellmann sehr dankbar für ihre großartige Unterstützung bei meinem Lehrbuch.

Außerdem danke ich allen im Rahmen meiner BeLL Interviewten für ihre Mitarbeit herzlich.

10. Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Katrin Kröger, an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel „Didaktik der Teilchenphysik – Entwerfen eines Lehrbuches zum physikalischen Inhalt, Wissenschaftstheorie und Arbeitswelt in der Teilchenphysik“ selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinn nach auf Publikationen anderer Autoren beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Ich versichere außerdem, dass ich keine andere als die angegebene Literatur verwendet habe.

Die Arbeit wurde bisher noch nicht veröffentlicht.

Meißen, 16.12.2010

Katrin Kröger (Unterschrift)

11. Anhang

11.1. Quellenverzeichnis

Literaturquellen

Karl-Heinz Berck: Biologiedidaktik: Grundlagen und Methoden. 1. Auflage erschienen 1999 im Quelle & Meyer Verlag, Stuttgart.

Dieter Eschenhagen, Ulrich Kattmann, Dieter Rodi: Fachdidaktik Biologie. 4. neu bearbeitete Auflage erschienen 1998 im Aulis Verlag, Köln.

Harald Gropengießer, Ulrich Kattmann, Dirk Krüger: Biologiedidaktik in Übersichten. 1. Auflage erschienen 2010 im Aulis Verlag, Köln.

Martin Wagenschein: Verstehen lehren. Genetisch - Sokratisch - Exemplarisch. 11. Auflage erschienen 1997 im Beltz Verlag, Weinheim und Basel.

Metzler Physik. Herausgegeben von Joachim Grehn und Joachim Krause. 4. Auflage erschienen 2007 im Schroedel Verlag, Braunschweig.

Internetquellen

Gerhard Rath: „Das Schulbuch im Physikunterricht“, <http://www.brgkepler.at/~rath/medien/schulbuch.htm> unter 3.1, eingesehen am 15.10.2010

„Lehrplan Gymnasium Physik von 2004. Mit Überarbeitungen von 2007 und 2009“, Herausgeber: Sächsisches Staatsministerium für Kultus, http://www.sachsen-macht-schule.de/apps/lehrplandb/downloads/lehrplaene/lp_gy_physik_2009.pdf, eingesehen am 08.07.2010

Interviews

Axel Cholewa (2009). Interview, geführt von der Verfasserin. Hamburg, 20.10.2009.

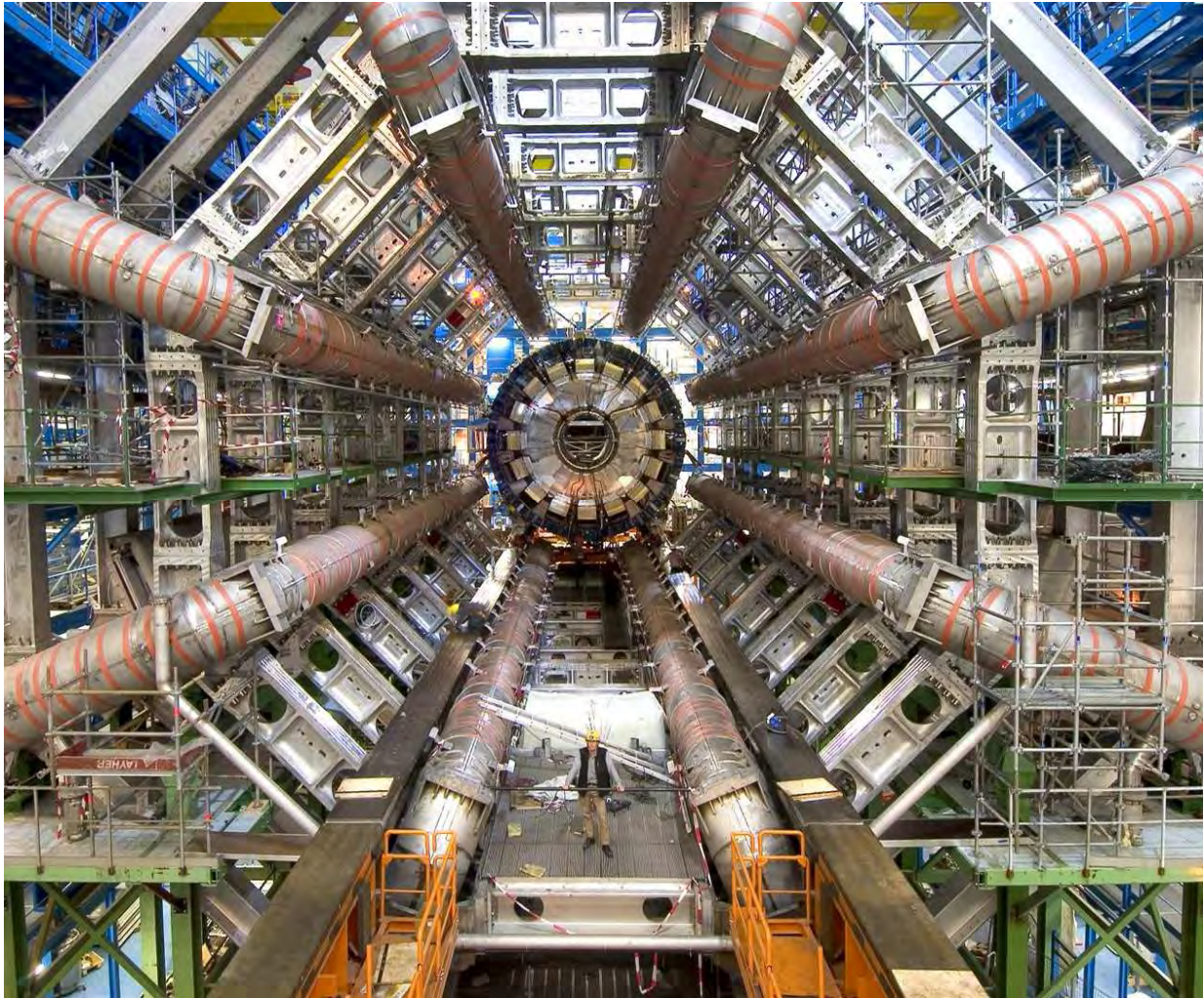
Lutz Gerlach (2009). Interview, geführt von der Verfasserin. Hamburg, 20.10.2009.

Caren Hagner (2009). Interview, geführt von der Verfasserin. Hamburg, 23.10.2009.

Karen Ong (2009). Interview, geführt von der Verfasserin. Hamburg, 23.10.2009.

Hannes Schettler (2009). Interview, geführt von der Verfasserin. Hamburg, 19.10.2009.

11.2. Lehrbuch



Lehrbuch zur Teilchenphysik

*Physikalischer Inhalt, Wissenschaftstheorie und
Arbeitswelt in der Teilchenphysik*

Katrin Kröger
Sächsisches Landesgymnasium Sankt Afra zu Meißen

Inhaltsverzeichnis

0. Vorwort	4
1. Physikalischer Inhalt	5
1.0. Vorangestellte Bemerkungen.....	5
1.1. Was ist Teilchenphysik?.....	5
1.2. Geschichte der Erforschung der Struktur der Materie.....	6
1.3. Heutige Fragestellungen der teilchenphysikalischen Grundlagenforschung.....	7
1.4. Notwendigkeit hoher Energien	8
1.5. Experimenttypen.....	10
1.6. Die Mikroskope der Teilchenphysiker – Teilchenbeschleuniger	12
1.7. Detektoren	16
1.8. Standardmodell der Teilchenphysik.....	18
1.9. Wechselwirkungen	22
1.9.1. Die starke Wechselwirkung.....	22
1.9.2. Die schwache Wechselwirkung	25
1.9.3. Die elektromagnetische Wechselwirkung.....	26
1.9.4. Die Gravitation	26
1.10. Aktuelle Forschungsgebiete	28
1.10.1. Supersymmetrie	28
1.10.2. Vereinigung der Wechselwirkungen	29
1.10.4. Dunkle Materie.....	30
1.10.5. Dunkle Energie.....	30
1.10.6. Antimaterie.....	30
1.10.5. Das Innere des Protons – neueste Erkenntnisse	31
1.10.6. Kosmische Strahlung	32
2. Wissenschaftstheorie	33
2.1. Begriffe Theorie, Experiment, Modell	33

2.2.	Wissenschaftstheoretische Grundlagen.....	34
2.3.	Paradigmenwechsel	35
2.4.	Das Zusammenwirken von Theorie und Experiment in der (modernen) Teilchenphysik	36
2.5.	Simulationen.....	36
2.6.	Grundlagenforschung in der Kontroverse	37
3.	Arbeitswelt	41
3.1.	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN)	41
3.2.	Large Hadron Collider (LHC) - Die Erkenntnismaschine für die Teilchenphysiker.....	41
3.3.	Deutsches Elektronensynchrotron (DESY)	48
3.4.	Das „HERA-Modell“ der internationalen Zusammenarbeit	49
3.5.	Arbeitswelt in der theoretischen Teilchenphysik	51
3.6.	Arbeitswelt in der experimentellen Teilchenphysik.....	52
3.6.1.	Kollaborationen und Arbeitsalltag	52
3.6.2.	Die Messung	54
3.6.3.	Berufliche Laufbahn in der Forschung in der experimentellen Teilchenphysik	55
4.	Nachwort.....	56
5.	Quellenverzeichnis	57
5.1.	Textquellen.....	57
5.2.	Abbildungsquellen.....	58

0. Vorwort

Vor allem in den Jahren 2007 bis 2009 beschäftigte die Wissenschaftsrubriken der Medien immer wieder der LHC – „Large Hadron Collider“ – am CERN nahe Genf. So titelte WELTONLINE mit der „größten Maschine der Welt“¹ und „bild der wissenschaft“² bot einen beeindruckenden Abriss des Materialaufwandes: „Der LHC besitzt zur Beschleunigung der Teilchen rund 9300 Magnete, 1232 Dipole, 858 Quadrupole und 6208 Korrekturmagnete. Er erzeugt ein Magnetfeld von 8,33 Tesla. Die supraleitenden Kabel der LHC-Magnete sind so lang, dass sie 6,8 Mal um den Äquator gewickelt werden könnten. Alle Fasern zusammen würden 5 Mal von der Erde zur Sonne und zurück reichen und noch ein paar Mal zum Mond.“ Die offizielle deutsche Website informiert über den LHC als den kältesten Ort im All und leersten Raum im Sonnensystem.³ Diese beeindruckenden Fakten rufen natürlich unweigerlich die Frage hervor, WOFÜR dieser ganze Aufwand betrieben wird. Die Antwort ist: für die Wissenschaft. Warum aber gerade statt eines Experiments auf dem Labortisch eine Milliarden Euro teure riesige Maschine die Erkenntnis vorantreiben soll, wird häufig nur am Rand behandelt. Hier setzt das vorliegende Material an. Es will über Teilchenphysik informieren. Dabei behandelt es neben dem physikalischen Inhalt auch die zugrunde liegende Wissenschaftstheorie und die Arbeitswelt in der Teilchenphysik. Nach Abschluss der Lektüre steht hoffentlich nicht nur das Kennen der Hintergründe für den enormen Aufwand beim LHC, sondern auch ein breites Wissen über Wissenschaftstheorie sowie den Alltag und die Internationalität beim Arbeiten der Teilchenphysiker.

Mit den drei Kategorien „Physikalischer Inhalt“, „Wissenschaftstheorie“ und „Arbeitswelt“ kann sich unabhängig voneinander beschäftigt werden. Es empfiehlt sich aber vor allem bei der Kategorie „Physikalischer Inhalt“ chronologisch zu lesen, damit das Verständnis gesichert werden kann und nicht an der Unkenntnis gewisser Begriffe oder physikalischer Fakten scheitert.

Viel Spaß und erhellende Momente!

¹ „Größte Maschine der Welt in Gang gesetzt“ auf welt.de; In den Fußnoten sind nur Kurzverweise, die ausführliche Bibliografie findet sich im Quellenverzeichnis.

² Rüdiger Vaas: „Die Erkenntnismaschine - Rekorde über Rekorde“. In: bild der wissenschaft 9/2007

³ „LHC - Zahlen und Fakten“ auf weltmaschine.de

1. Physikalischer Inhalt

1.0. Vorangestellte Bemerkungen

Das Ziel dieses Lehrbuches ist es, aufbauend auf den im Leistungskurs Physik geschaffenen Grundlagen nach dem sächsischen Lehrplan über Teilchenphysik zu informieren. Dabei soll das Niveau über die Populärwissenschaft hinausgehen, jedoch kann es auch nicht Hochschulniveau erreichen. Von daher ist ein sensibler Umgang mit dem hier vermittelten Wissen notwendig: Man muss sich immer im Klaren sein,

- dass es sich bei Modellen um Modelle **für** die Wirklichkeit, nicht **um** die Wirklichkeit handelt, d.h. eine 1:1 Übertragung in die Wirklichkeit nicht möglich ist;
- dass die Modelle nur einen bestimmten Gültigkeitsbereich umfassen und es leicht zu falschen Ergebnissen führen kann, sie auf Phänomene anzuwenden, zu deren Beschreibung sie nicht entworfen wurden;
- dass in dieser Broschüre noch einmal mehr Vorsicht geboten ist, da hier aus didaktischen Gründen manchmal **Modelle für die fachwissenschaftlichen Modelle der Wirklichkeit** angewendet werden;
- dass die Physik eine dynamische Wissenschaft ist, dass Theorien somit nur Theorien sind und sich in den nächsten Jahren als ungültig erweisen können;
- dass gerade in der Teilchenphysik, die den Gesetzen der Quantenmechanik gehorcht, nicht alles allzu wörtlich genommen werden und Alltagserfahrungen und Alltagsvorstellungen zurückgenommen werden sollten.

1.1. Was ist Teilchenphysik?

Schon seit der Antike macht sich der Mensch Gedanken, was die elementaren Bausteine der uns umgebenden Materie sind. Unterteilten frühe Philosophen die Materie in Luft, Erde, Feuer und Wasser, so wurde der griechische Philosoph Demokrit (siehe Abb. 1) mit seinem Begriff des Atoms (vom griechischen „atomos“, zu Deutsch „unteilbar“) begrifflicher Urheber einer Struktur, nach der die Menschheit bis heute auf der Suche ist.



Abb. 1: Demokrit, der begriffliche Schöpfer vom "Atom", lebte ca. 460-370 v. Chr. im antiken Griechenland.

Die moderne Teilchenphysik ist auf der Suche danach, „was die Welt im Innersten zusammenhält“: Sie will die fundamentalen, unteilbaren Teilchen und deren Wechselwirkungen untereinander entdecken und beschreiben und auf dieser Basis eine Erklärung für alle Erscheinungen der Welt entwickeln. Sie ist somit eine Disziplin der Grundlagenforschung.

1.2. Geschichte der Erforschung der Struktur der Materie

Abbildung 2 „Vom Kristall zum Quark“ zeigt die Größendimensionen und das Verhältnis der Größendimensionen untereinander. Wie die Wissenschaft zu immer kleineren Strukturen vordringen konnte, ist nebenstehend erläutert.

Der Großteil der festen Materie besteht aus Kristallen, welche wiederum aus Atomen aufgebaut sind. Neben Kristallen bilden Atome auch Moleküle.

Moleküle entstehen durch Bindungen der Elektronen der beteiligten Atome. Moleküle und Atome wurden bereits sehr gut im 19. Jahrhundert erforscht. Längst hat sich herausgestellt, dass das Atom nicht unteilbar ist, doch der Name blieb.

Hier ist nun eine sehr bedeutende Grenze erreicht: Zwischen den Größendimensionen der Moleküle und Atome, zwischen Nano- und Picometer, liegt die physikalische Grenze zwischen groß und klein. Sie ist deshalb so wichtig, da im Kleinen, im Mikrokosmos, mit der Gültigkeit der Quantenmechanik andere Gesetze als die der klassischen Physik herrschen.

Atome bestehen aus dem Atomkern und der ihn umgebenden Atomhülle. Letztere ist nach dem Atommodell von Bohr-Sommerfeld eine Wolke aus den Elektronen, die um den Kern schwirren. Mit den Elektronen wurde sich Ende des 19. Jahrhunderts viel beschäftigt, sodass damals mehr über sie bekannt war als über die anderen Bausteine des Atoms. Bis heute gelten sie als elementar, als nicht mehr teilbar.

Ein klarer Nachweis der Atomkerne erfolgte 1911 durch Rutherford (siehe Abb. 3): Dieser beschoss eine dünne Goldfolie mit α -Teilchen und leitete aus der erfolgten Ablenkung dieser die Erkenntnis ab, dass das Atom zu großen Teilen leer ist. In der Mitte befindet sich der positiv geladene Atomkern, der fast die gesamte Masse des Atoms in sich vereinigt. Aufgrund der Eigenschaft der positiven Ladung war so ein Beweis für das – etwa einen Femtometer große – Proton gefunden. Zur

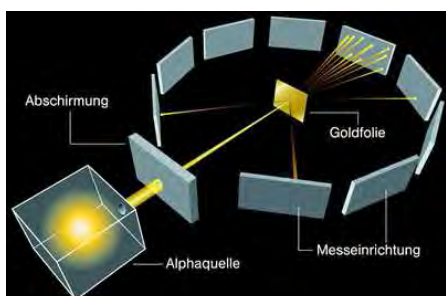


Abb. 3: Versuchsanordnung von Rutherfords Streuexperiment.

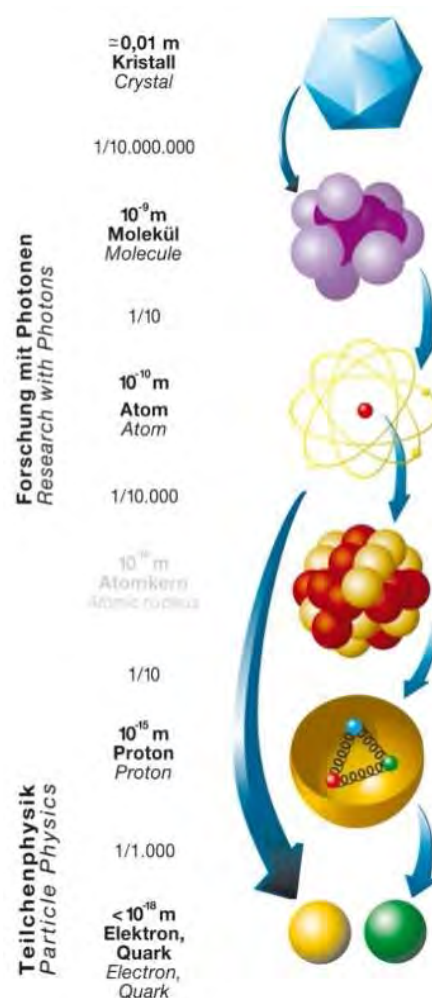


Abb. 2: Größenordnungen auf dem Weg vom Kristall zum Quark.

Veranschaulichung: Wäre das Atom so groß wie ein Fußballfeld, hätte der Atomkern die Größe einer Erbse.

1920 postulierte Rutherford die Existenz eines anderen Teilchens im Atomkern. 1932 bewies James Chadwick, dass es sich dabei um das ungeladene Neutron handelt.

Nun beginnt die moderne Teilchenphysik: Lange Zeit galten Protonen und Neutronen ebenfalls als elementar, bis sich in sogenannten Streuexperimenten die Hinweise auf eine innere Struktur mehrten. Schon 1964 wurden die Quarks als

(hypothetische) Unterstruktur eingeführt, dies ist seit 1974 in der physikalischen Welt akzeptiert. Die Quarks sind kleiner als ein Tausendstel des Protonen-/Neutronendurchmessers. Nach dem heutigen Kenntnisstand sind es die Quarks und Elektronen, die Demokrits Kriterium der Unteilbarkeit genügen und unsere Welt aufbauen.

Anmerkung: Größenangaben

Besonders für die Teilchenphysiker, die in sehr kleinen Dimensionen arbeiten, sind Einheiten Vorsilben eine große Erleichterung: Statt 0,000 000 001 m schreibt man effizienter 1 nm.

Dafür findet sich in Abbildung 4 eine Tabelle als Übersicht über die jeweiligen Vorsilben:

Einheitenvorsätze			
Zahlenwert, mit dem die Einheit multipliziert wird	Vorsatz	Zeichen	Herkunft/Bedeutung
1 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10^{24}	Yotta	Y	ital. otto: acht ($10^{24} = 1\,000^8$)
1 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10^{21}	Zetta	Z	ital. sette: sieben
1 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10^{18}	Exa	E	griech. hexa: sechs
1 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10^{15}	Peta	P	griech. pente: fünf
1 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10^{12}	Tera	T	griech. teras: unermesslich groß
1 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10^9	Giga	G	griech. gigas: riesig
1 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10^6	Mega	M	griech. megas: groß
1 000 = 10^3	Kilo	k	griech. chili: tausend
100 = 10^2	Hekto	h	griech. hekaton: hundert
10 = 10^1	Deka	da	griech. deka: zehn
1 = 10^0			
0,1 = 10^{-1}	Dezi	d	lat. decem: zehn
0,01 = 10^{-2}	Zenti	c	lat. centum: hundert
0,001 = 10^{-3}	Milli	m	lat. mille: tausend
0,000 001 = 10^{-6}	Mikro	μ	griech. mikros: klein
0,000 000 001 = 10^{-9}	Nano	n	griech. nannos: Zwerg
0,000 000 000 001 = 10^{-12}	Piko	p	ital. piccolo: klein
0,000 000 000 000 001 = 10^{-15}	Femto	f	dän. femten: fünfzehn
0,000 000 000 000 000 001 = 10^{-18}	Atto	a	dän. atten: achtzehn
0,000 000 000 000 000 000 001 = 10^{-21}	Zepto	z	lat. septem: sieben
0,000 000 000 000 000 000 000 001 = 10^{-24}	Yokto	y	lat. octo: acht

Abb. 4: Übersicht über die Einheitenvorsätze.

1.3. Heutige Fragestellungen der teilchenphysikalischen Grundlagenforschung

Das übergeordnete Ziel ist die Entdeckung der Weltformel, mithilfe derer man verstehen kann, warum die physikalische Welt so ist, wie sie ist, und nicht anders, und alle Erscheinungen daraus ableiten kann – eben verstehen, „was die Welt im Innersten zusammenhält“ (wie es in Goethes „Faust“ formuliert wird).

Bis zur Weltformel dauert es sicherlich noch einige Zeit – wenn es überhaupt eine gibt. Aber schon heute werden in der Grundlagenforschung Fragestellungen bearbeitet, deren Beantwortung bedeutende Schritte in Richtung einer Weltformel sein würden, wobei bei einigen schon vieles klar ist:

- Wann, woraus und wie entstand das Universum?
- Wohin entwickelt sich unser Universum? Wieso expandiert es, und was ist dafür verantwortlich?
- Woraus besteht unser Universum? Was hat es mit der Dunklen Materie und Dunklen Energie auf sich?
- Ist unser Universum das einzige? Gibt es Paralleluniversen?
- Warum gibt es keine Antimaterie (siehe Unterpunkt „Antimaterie“) mehr?
- Aus welchen Bausteinen bestehen wir, und welche Kräfte vermitteln dazwischen?

- Warum haben z.B. alle Elektronen die gleiche Masse, sie könnten ja auch ein Massenspektrum haben?
- Warum sind Energie und Masse äquivalent?
- Wie entsteht Masse?
- Was sind Raum und Zeit aus physikalischer Sicht? Wie entsteht Raum und Zeit?

Bei einigen dieser Fragen stellt sich auch die Problematik der naturgegebenen Grenzen der menschlichen Erkenntnis. Ob die Teilchenphysik je genaue Aussagen über das, was während des Urknalls geschah, machen kann, ist stark bezweifelt – sie wird wohl eher darüber, was kurz danach geschah, Kenntnis erlangen. Vor allem die Raum-und-Zeit-Fragen besitzen eine Brisanz auch in der Philosophie, sodass bei der Thematik „Weltformel“ auch die Philosophie in gewisser Weise berührt wird und noch nicht einmal klar ist, ob die Physik solche Fragen mit ihren Methoden je abschließend beantworten kann.

1.4. Notwendigkeit hoher Energien

Häufig wird Hochenergiephysik als Synonym für Teilchenphysik gebraucht. Wie hängt das zusammen?⁴

Die immer tiefere Erforschung der Struktur der Materie erforderte immer bessere Messapparaturen (siehe Abb. 5⁵). Die „Mikroskope“ (diesen Begriff bitte nicht nur im Zusammenhang mit dem gewohnten Lichtmikroskop aus dem Biologieunterricht sehen) mussten immer höhere Auflösungen vollbringen. Mit dem sichtbaren Licht ging dies nur solange, bis die zu untersuchenden Strukturen nicht kleiner waren als dessen Wellenlänge. Nach der Formel $c = \lambda \cdot f$ (mit λ : Wellenlänge, f : Frequenz) kam das sichtbare Licht mit einem Spektrum zwischen 380 und 780 nm schon im Bereich der Moleküle an die Grenzen. Neue Untersuchungsmethoden mussten

her. Nach der Formel $E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ (mit h : Planckkonstante, c : Lichtgeschwindigkeit) lässt sich ableiten,

dass für kleine Wellenlängen viel Energie benötigt wird. Für kleinere Dimensionen werden daher in der Teilchenphysik künstlich Teilchen mit hoher Energie erzeugt.

Die Verwendung der beschleunigten Teilchen als „Abtaster“ der Strukturen etablierte sich.

Dies wird durch die Beschleunigung von Teilchen (Erhöhung der Bewegungsenergie) möglich. Da in den Beschleunigern sehr hohe Energien erzielt werden, spricht man auch von Hochenergiephysik. Mittlerweile wurden so kleine Wellenlängen erreicht, dass man mit dem Beschleuniger HERA

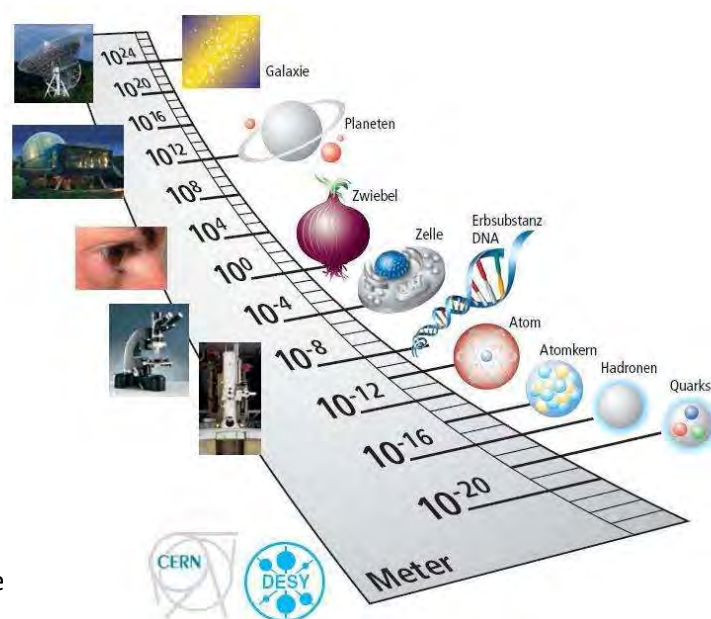


Abb. 5: Verschiedene „Mikroskope“ – vom Teleskop zum Hochenergiebeschleuniger – erschließen Objekte von der Größe einer Galaxie bis zu den elementaren Bausteinen der Materie, den Quarks. Zwischen diesen beiden Extremen liegen mehr als 10^{40} Größenordnungen.

⁴ Der hier vorgestellte Gedankengang der Mikroskope stammt aus einem Interview mit Prof. Caren Hagner.

⁵ Bildunterschrift zitiert nach

<http://www.weltderphysik.de/de/360.php?i=746>, eingesehen am 05.12.2010

am DESY das Proton (etwa einen Femtometer groß) abtasten konnte.

Wozu wird die Energie der Teilchen erhöht?

Eine Erhöhung der Energie bringt eine Erhöhung der Frequenz (und somit eine Verkleinerung der Wellenlänge) des Teilchens, was dem Prinzip der Streuexperimente dienlich ist (siehe Abb. 6⁶).

Sind die Energien der Teilchen niedrig genug, sodass keine Zerstörung der Teilchen erfolgt, funktionieren die Teilchen wie ein Lichtstrahl, der das zu untersuchende Teilchen „durchleuchtet“.

Dabei werden sie gestreut, und dieses Streubild wird nachher von den Detektoren aufgezeichnet und anschließend mithilfe von Computern analysiert. Werden höhere Energien verwendet, werden die kollidierten Teilchen zerstört und ihre Energie wird in Masse umgewandelt. Dies ist möglich durch die Äquivalenz von Energie und Masse, von Einstein formuliert in

$E = m \cdot c^2$ mit (m: Masse, c: Lichtgeschwindigkeit). Eine hohe Bewegungsenergie beim Zusammenstoß führt zur Erzeugung von schwereren Teilchen. Die so neu erzeugten Teilchen werden ebenfalls im Detektor nachgewiesen.

Darüber hinaus erfolgt teilchenphysikalische Forschung mit Experimenten mit der kosmischen Strahlung (siehe Unterpunkt „Kosmische Strahlung“) und in geringem Maße mit der Untersuchung von seltenen Zerfällen.

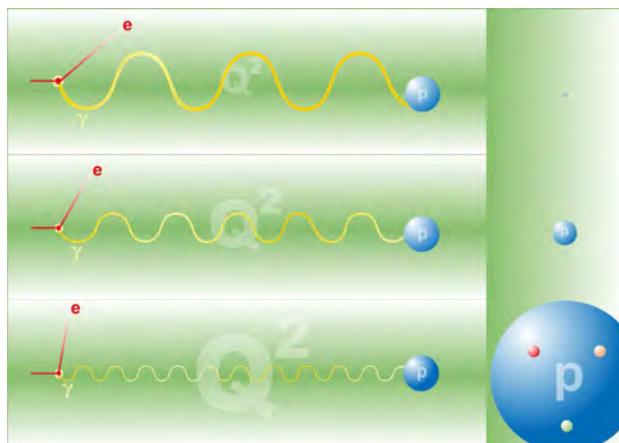


Abb. 6: „Energereiche Teilchen sehen mehr.“

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

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

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

Anmerkung: Quantenmechanische Grundlagen

Teilchenphysik spielt sich in den Dimensionen der Quantenwelt ab. Im Mikrokosmos herrschen Gesetze, die anders sind als in der „normalen“ Welt und teilweise unserem Alltagsverständnis entgegenlaufen.

Die Beschäftigung mit dieser Thematik erfordert das Überwinden von gewohnten Denkmustern und Offenheit für die Vorgänge der Quantenwelt. Das Loslösen von Begriffen wie „logisch“ und „unlogisch“ ist erforderlich.

Welle-Teilchen-Dualismus: „die für die moderne Physik grundlegende Tatsache, dass in der mikroskopischen Welt jedes Objekt sowohl Eigenschaften einer Welle als auch solche von Teilchen aufweist. [...] In einer pragmatischen Sichtweise beschreibt man mikrophysikalische Objekte je nachdem, welche Eigenschaften in einem speziellen Experiment zutage treten bzw. interessieren, im

⁶ Bildunterschrift zitiert nach Deutsches Elektronen-Synchrotron: Das Supermikroskop HERA, S.60

Wellenbild oder im Teilchenbild: Licht als elektromagnetische Welle oder als Photon (Ruhemasse null), Elektronen als Punktladung oder als De-Broglie- oder Materiewelle. Man muss dabei aber immer im Auge behalten, dass beide Objekte weder Wellen noch Teilchen „sind“, sondern eine der menschlichen Anschauung nicht zugängliche Natur besitzen.“⁷ Nur durch den Welle-Teilchen-Dualismus lässt sich z.B. der Umstand erklären, dass in Teilchenbeschleunigern die Energie der *Teilchen* erhöht wird, damit sie eine kleinere *Wellenlänge* erhalten.

1.5. Experimenttypen

Alle Teilchenphysikexperimente beruhen auf dem Prinzip der Streuversuche, auch „scattering experiments“ genannt.

Das Prinzip: Objekte atomarer Größe werden durch den Beschuss mit Teilchen hoher Energie (denn Teilchen mit hoher Energie bringen Streubilder mit hoher Auflösung) untersucht.

Folgendes Modell⁸ soll das Prinzip veranschaulichen (siehe Abb. 7⁹): Du befindest dich bei dichtem Nebel im Urwald, weißt aber, dass irgendwo - für dich unerreichbar hoch - ein Sack an einem Baum aufgehängt ist. Du willst etwas über seine Position und seinen Inhalt erfahren.

Um zunächst einmal die Position ausfindig zu machen, wirfst du mit Bällen durch die Luft, bis du irgendwann die Treffer hörst. Du wirfst weiter in die Richtung, und je häufiger du triffst, desto größer vermutest du seine Größe.

Vom nebenstehenden Indianer nimmst du dir Pfeil und Bogen und schießt auf den inzwischen lokalisierten Sack. Du kannst wieder hören, wann der Pfeil trifft und wann er den Sack wieder verlässt oder, was seltener passiert, auf etwas Härteres trifft. Du stellst Vermutungen an und tippst auf einen Sack voller Baumwolle mit kleinen harten Strukturen.

Jetzt holst du dir ein Maschinengewehr und schießt auf den Sack. Es scheint keinen Widerstand zu geben, doch plötzlich fallen nach einem leichten Knall Stücke einer nussartigen Form auf den Boden.

Du kannst sie jetzt mit deinem Geschmackssinn als Nuss identifizieren, du kannst aus den zerborstenen Stücken abschätzen, wie groß die Nuss ungefähr gewesen sein muss, und du weißt aus der Anzahl der unten liegenden Nussreste, wie viele sich ungefähr im Sack befinden.

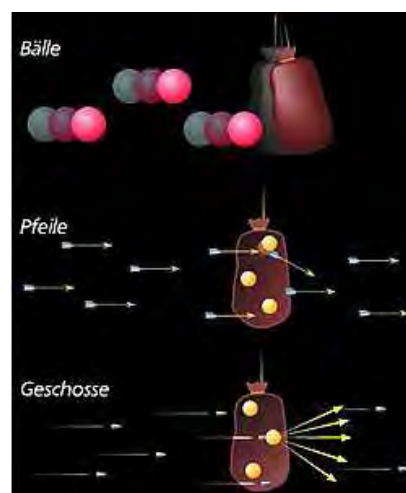


Abb. 7: „Je energiereicher die Projektile, desto mehr verraten sie über den Aufbau eines Objekts: Aus der Ablenkung der Bälle kann man auf die Form des Sacks schließen; die Pfeile lassen die Kugeln in seinem Inneren erkennen; die hochenergetischen Geschosse lassen die Kugeln zerplatzen und offenbaren so deren eventuell vorhandene innere Struktur.“

So ähnlich funktioniert es auch in der Teilchenphysik. Ein bekannter Vertreter ist Rutherford mit seinem Streuexperiment der α -Teilchen an Goldfolie. In der modernen Teilchenphysik wurde z. B. am Beschleuniger HERA am DESY auf diese Weise mit Elektronen das Innere des Protons abgetastet.

⁷ zitiert nach Redaktion Schule und Lernen (2007): Schülerduden Physik, S. 492

⁸ Das hier vorgestellte Modell stammt aus Waloschek (1996): Besuch im Teilchenzoo, S.101 ff.

⁹ Bildunterschrift zitiert nach Deutsches Elektronen-Synchrotron: Das Supermikroskop HERA, S.52

Die wichtigsten Experimenttypen sind „Target“ und „Collider“.

Rutherford hat ein typisches Target-Experiment durchgeführt. Seine Geschosse trafen auf ein ruhendes Ziel, das Target.

Mittlerweile hat sich in den meisten Fällen das Collider-Experiment durchgesetzt, da dadurch die Energieausbeute besser ist: Das Geschoss und das Target bewegen sich aufeinander zu.

Vergleichbar ist dieser Vorgang mit einem Autozusammenprall¹⁰. Fährt ein Auto mit voller Wucht gegen ein ruhendes, so wird dessen Bewegungsenergie zum Teil in die Weiterbewegung der beiden Autos übertragen und nicht vollständig in die Zerstörung umgesetzt, was bei einem frontalen Zusammenstoß zweier aufeinander zufahrender Autos hingegen gegeben ist.

Bei Target-Experimenten bewegt sich das gesamte System nach dem Stoß weiter, bei Collider-Experimenten geht die Energie (fast) vollständig in die eigentliche Kollision hinein.

Je nach Energieaufwand werden entweder nur die Strukturen abgetastet oder die beteiligten Teilchen werden zerstört, bei letzterem geht ihre Ruhemasse und ihre Bewegungsenergie in die Erzeugung von neuen Teilchen über. Werden neue instabile Teilchen erzeugt, so werden diese auf ihre Eigenschaften (z.B. Masse und Ladung) untersucht. Die Rekonstruktion dieses Vorganges erlaubt Aussagen darüber, was genau im Kollisionszentrum passiert ist. Daraus lassen sich Schlussfolgerungen über z. B. Unterstruktur oder Eigenschaften der kollidierten Teilchen ableiten.

„Mit der Weiterentwicklung der Teilchenbeschleuniger wurden die "Geschosse" [...] [energiereicher] und die Zusammenstöße heftiger. Mit steigender Teilchenenergie sondierten die Streuexperimente immer kleinere Abstände, sie offenbarten immer feinere Details. 1954 wurde deutlich, dass die Protonen keinesfalls "Punkte" sind, sondern einen messbaren Durchmesser besitzen; Ende der 1960er Jahre entdeckte man am Beschleunigerzentrum SLAC in Kalifornien die Bausteine der Protonen und Neutronen, die Quarks. Die Experimente H1 und ZEUS an der Speicherringanlage HERA [siehe Unterpunkt „DESY“] schreiben die Erfolgsgeschichte der Streuversuche fort. Auch hier prallen Elektronen auf Protonen, und der Winkel und die Energie der gestreuten Elektronen geben Aufschluss über die Vorgänge im Proton. Da die Protonen bei den HERA-Experimenten nicht ruhen, sondern ebenfalls auf hohe Energien beschleunigt werden, ist die Energie, die den Elektronen während der Kollision zur Verfügung steht, etwa 2600-mal größer als bei dem SLAC-Experiment von 1969 - und 9 000 000-mal höher als die der Alphateilchen von Rutherford. Damit ermöglicht HERA heute den weltweit schärfsten Blick ins Proton - bis hinunter zu Strukturen, die nur den milliardensten Teil eines milliardenstel Meters groß sind, d.h. 2000-mal kleiner als das Proton selbst.“¹¹ Die so zu untersuchenden Strukturen liegen im Bereich 10^{-18} m.

Die gewählte Veranschaulichung der Streuexperimente hat eine Analogie zur tatsächlichen Art der Erkenntnisgewinnung der Teilchenphysiker: Das Zusammentreffen des jeweiligen Geschosses mit dem Sack ist das, was in den Teilchenbeschleunigern vorbereitet und in der Mitte des Detektors durchgeführt wird. Die Messung der Kollision nimmt der Detektor vor, er detektiert (=weist nach) die meisten Teilchen, die in der Kollision gestreut oder auch neu erzeugt werden. Schlussfolgerungen daraus müssen von den Physikern selbst gezogen werden, normalerweise mithilfe von

¹⁰ Das hier vorgestellte Modell stammt aus Waloschek (1996): Besuch im Teilchenzoo, S. 88

¹¹ zitiert nach Deutsches Elektronen-Synchrotron: Das Supermikroskop HERA, S.53

Computerprogrammen. Die Analogie: Im Beispiel hat der Geschmackssinn den Geschmack der Nuss nachgewiesen. Unser Verstand folgert daraus die Existenz von Nüssen.

1.6. Die Mikroskope der Teilchenphysiker – Teilchenbeschleuniger

Auch Teilchenphysiker führen Experimente durch – nur nicht in uns aus dem Alltag gewohnten Maßstäben. Während das zu Untersuchende immer kleiner wird, wird der Aufwand größer. Teilchenbeschleuniger an sich machen noch nicht das Experiment aus, sie kreieren den zu untersuchenden Vorgang. Diese riesigen Maschinen sind nicht nur sehr teuer, sie erfordern auch einen riesigen Aufwand bei Entwicklung und Konstruktion und dabei technische Pionierleistungen.

Beschleunigungsvorgang

Welche Vorteile Teilchen mit hohen Energien haben, wurde unter der Überschrift „Hohe Energien“ behandelt. Hier soll es darum gehen, wie der Energiezuwachs durch Beschleunigung umgesetzt wird. Dazu gehören die zugrundeliegenden physikalischen Gesetze und die technische Realisierung.

Grundprinzip aller Beschleuniger ist die elektrische Anziehung von ungleich Geladenem, dies setzt voraus, dass die zu beschleunigenden Teilchen eine elektrische Ladung besitzen. Für die Beschleunigung von Neutronen wurden weitere Verfahren entwickelt.

Einer der alltäglichsten Teilchenbeschleuniger ist die Braun'sche Röhre, die in vielen Fernsehern Anwendung findet bzw. fand (momentan abgelöst durch z.B. Plasmafernseher). Diese dürfte aus dem Physikunterricht bekannt sein¹². Das Elektron durchläuft hier eine einzige Beschleunigungsstrecke bei Gleichspannung, in der es die Endgeschwindigkeit erreicht.

Theoretisch ist eine Reihenschaltung von solchen Braun'schen Röhren, die mit Gleichspannung betrieben werden, möglich. Nun ist der ständigen Beschleunigung von Teilchen durch Gleichspannung aber eine Grenze gesetzt: Gleichspannungen können mit speziellem Aufwand maximal bis zur Größenordnung von einigen Dutzend Millionen Volt stabil gehalten werden. Diese Spannung reicht nicht aus, um die Teilchen auf die gewünschte Geschwindigkeit zu bringen. Außerdem treten bei diesen Geschwindigkeiten relativistische Effekte auf. Mit der relativistischen Massenzunahme ist immer mehr Energie zur Beschleunigung erforderlich, die Gleichspannung erst recht nicht erzeugen kann.

Die Lösung des Problems besteht in der Verwendung von Wechselspannung.

Die meisten heute benutzten **kleinen Niederenergie-Linearbeschleuniger** beruhen auf einem Prinzip von Rolf Wideroe (1902-1996), er entwickelte den **Hochfrequenz-Linearbeschleuniger**.

Tritt ein Teilchen aus der Teilchenquelle aus, wird es im Spalt beschleunigt. Dann tritt es in die feldfreien metallenen (Stichwort Faradaykäfig) Driftröhren, die eine Zylinderform besitzen, ein.

¹² siehe Sächsisches Staatsministerium für Kultus: Lehrplan Gymnasium Physik, S. 37: in „Lernbereich 4: Geladene Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern“ „Übertragen mechanischer Grundkenntnisse auf die Bewegung geladener Teilchen im elektrischen Feld“: [...], (Energie im elektrischen Feld: Braun'sche Röhre)“

Während der Zeit, die es in der Driftröhre verbringt, polt die Spannung um, sodass es nun erneut beschleunigt wird. Dieser Vorgang wiederholt sich beliebig oft, bis die gewünschte Geschwindigkeit erreicht wurde.

Da die Frequenz konstant bleibt, muss sich die Länge der Röhren verändern, damit der Zyklus nicht beeinträchtigt wird und das Teilchen nachher sogar abgebremst wird: je höher die Geschwindigkeit, umso mehr Strecke in den Driftröhren, da die Zeit, zu der die Spannung umgepolt und die geeignete Amplitude vorhanden ist, konstant bleibt.

Kreisbeschleuniger und **lange Hochenergie-Linearbeschleuniger** nutzen dasselbe Grundprinzip von Wideroe, nur dass hier statt zylinderförmigen Elektroden in **Hohlraumresonatoren** beschleunigt wird. In diesen schwingen hochfrequente elektromagnetische Felder, die in den richtigen Momenten den geladenen Teilchen die passenden Impulse verleihen. Das Teilchen „surft“ auf der elektromagnetischen Welle. Auch hier wird die Länge der sogenannten Kavitäten länger. Das gilt normalerweise nur für den ersten Teil (meist Vorbeschleuniger) des eigentlichen Beschleunigers. Durch diese Technologie ist die Beschleunigung effektiver.

Je näher die Geschwindigkeit sich der Lichtgeschwindigkeit annähert, desto geringer ist die eigentliche Geschwindigkeitszunahme; es erhöht sich dann nur noch die Energie. Dann kann auch die Länge der Driftröhren bzw. Kavitäten konstant bleiben.

Die erreichte Gesamtenergie des Teilchens ist also nicht mehr von der angelegten Spannung abhängig, sondern wird durch die Zahl der Beschleunigungsstrecken und dadurch der Länge des Linearbeschleunigers festgelegt. Auf diese Art und Weise ist aus physikalischer Sicht eine ständige Energieerhöhung möglich, Grenzen werden durch äußere Einschränkungen wie etwa zu hohen Kosten gesetzt.

Im gesamten Rohr, durch das die Teilchen fliegen, besteht ein sehr gutes Vakuum, damit hinderliche Zusammenstöße mit Luftmolekülen unterbunden werden.

Linearbeschleuniger

Aufbau (siehe Abb. 8)

- Teilchenquelle
- Beschleunigungsstrecken, je nach Energiebereich mit Driftröhren oder Hohlraumresonatoren
- Fokussierungsmagnete (Quadrupolmagnete): Da die Teilchen alle die gleiche Ladung tragen, stoßen sie sich gegenseitig ab.

Um dem Auseinanderstreben des Strahlen entgegenzuwirken, werden sie in regelmäßigen Abständen durch die Magnete gebündelt.

- Experiment (Collider oder Target) oder Einleitung in weitere Linearbeschleuniger / Speicherringe

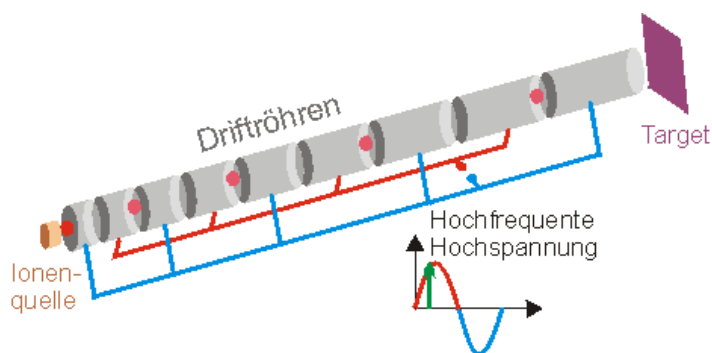


Abb. 8: Beispielhafter Aufbau eines Linearbeschleunigers.

Vorteile:

Da es keine Energieverluste durch Synchrotronstrahlung (hierzu weiter unten mehr) gibt, existiert physikalisch betrachtet keine Grenze bei der Beschleunigung zu immer höheren Energien.

Nachteile:

Da die Beschleunigungsstrecke nur einmal durchlaufen werden kann,

- sind mit hoher Beschleunigung immer viel Strecke und damit ein großer Kostenaufwand verbunden.
- muss am Ende bei der Kollision mit einem anderen Strahl oder einem Target die Reaktionsrate möglichst hoch ausfallen.

Kreisbeschleuniger

Der erste Kreisbeschleuniger war das **Zyklotron** (siehe Abb. 9): In den D-förmigen Elektroden werden die Teilchen mithilfe des Magnetfeldes durch die Lorentzkraft auf Kreisbahnen gelenkt. Im Spalt, in dem eine hochfrequente Wechselspannung anliegt, werden sie beschleunigt. Je höher die Geschwindigkeit ist, desto größer wird der Umlaufradius. Nach Erreichen der Endgeschwindigkeit wird der Teilchenstrahl auf ein Target gelenkt.

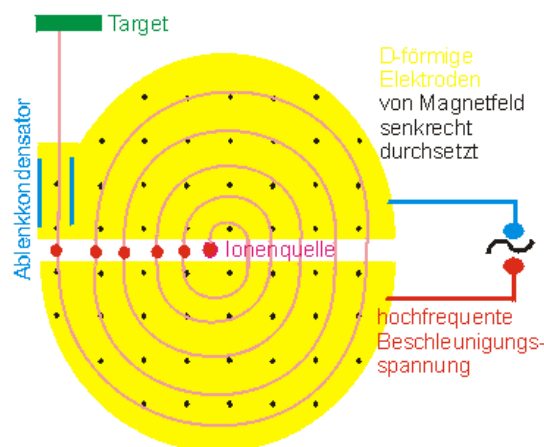


Abb. 9: Beispielhafter Aufbau eines Zyklotrons.

Abgelöst wurde das Zyklotron durch das **Synchrotron**, in dem heutzutage die höchsten Teilchenenergien erlangt werden.

Aufbau:

- Teilchenquelle, aus der Teilchen mit einer bestimmten Anfangsenergie austreten, die sie in Vorbeschleunigern erhalten haben

abwechselnd:

- Beschleunigungsstrecken nach dem Prinzip der Beschleunigung durch elektromagnetische Felder
- Dipolmagnete, die mithilfe der Lorentzkraft die Teilchen auf eine Kreisbahn zwingen
- Quadrupole und Sextupole, die den Teilchenstrahl bündeln und nahe ihrer Sollbahn halten

Nach erreichter Energie:

- Target-Experimente oder Injektion in Speicherringe

Nach Erreichen der gewünschten Energie kreisen die Teilchenpakete stundenlang in **Speicherringen**, wo sie zur fortwährenden Kollision mit entgegengesetzt laufenden Strahlen gebracht werden, es finden also Collider-Experimente statt. Speicherringe sind aufgerüstete Synchrotrone.

Vorteile von Synchrotronen bzw. Speicherringen:

- Die (Beschleunigungs-)Strecke kann beliebig oft durchlaufen werden, dies führt zur Kostendämpfung.
- In Speicherringen werden die gleichen Strahlen immer fortwährend aufeinander gelenkt. Da bei jeder Begegnung relativ wenige Kollisionen stattfinden, werden nur so genügend hohe Kollisionsraten erzeugt. (Die Wahrscheinlichkeit, dass sich zwei Teilchen aus kollidierenden Teilchenstrahlen wirklich treffen, ist sehr gering. Zur Erhöhung der Wahrscheinlichkeit kann man den Strahl sehr stark zusammenpressen, doch ist dies technisch sehr schwierig. Stattdessen lässt man sie in Speicherringen stundenlang kollidieren.)

Wechselfelder in Kavitäten, ein bedeutendes Zentrum hierfür ist das DESY, wo die supraleitenden Kavitäten für den ILC entwickelt wurden.

Jede Medaille hat zwei Seiten: Was für die Teilchenphysiker eher ein Fluch ist, ist für die Photonenforscher ein Segen. Inzwischen werden eigens Beschleuniger für die Erzeugung der Synchrotronstrahlung, die sich im Infrarot- bis Röntgenspektrum befindet (siehe Abb. 11), gebaut. Die Vorteile: Welche Wellenlänge die Strahlung genau annimmt, kann mithilfe der Änderung der Strahlenergie eingestellt werden. Die so erzeugte Strahlung ist sehr stark gebündelt und somit sehr

intensiv. Genutzt wird sie z.
B. in der

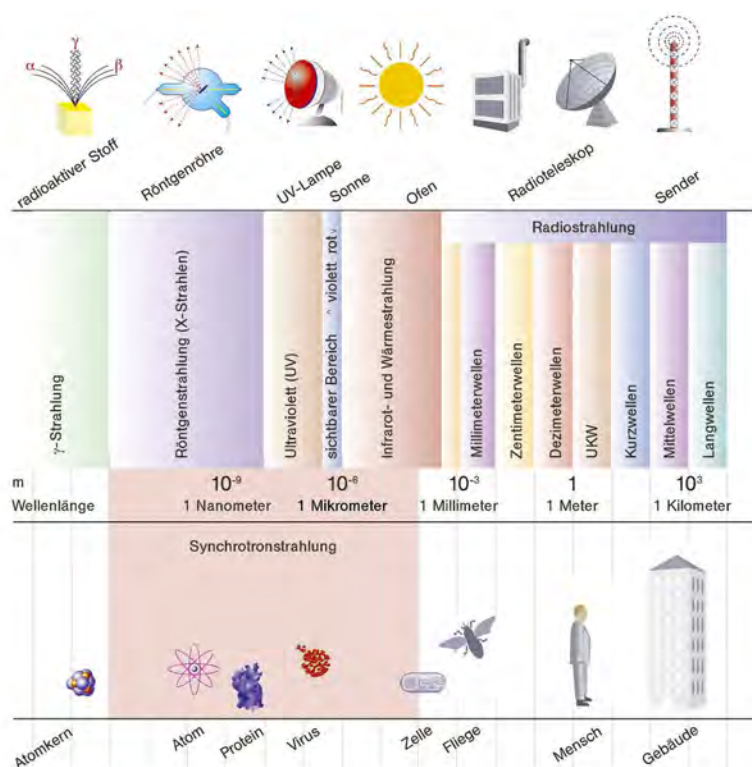


Abb. 11: Ausschnitt aus dem Spektrum der elektromagnetischen Strahlung, Synchrotronstrahlung eignet sich mit ihrer Wellenlänge hervorragend zur Untersuchung von Strukturen wie Viren, Proteinen und Atomen.

Röntgenstrukturanalytik. Bedeutendes deutsches Zentrum ist das „Hamburger Synchrotronstrahlungslabor“ (HASYLAB) am DESY.

1.7. Detektoren¹³

Detektoren (von engl. „to detect“ - nachweisen) weisen in der Teilchenphysik die Teilchen nach. Sie gehören zum Teilchenbeschleuniger: Der Beschleuniger schafft die Voraussetzungen zur Kollision, die Kollision findet im Detektor statt, der Detektor weist die bei der Kollision entstehenden Teilchen bzw. deren Eigenschaften nach, auf dieser Basis wird dann das Teilchen identifiziert. Je nach Untersuchungsgegenstand ist der Aufbau eines jeden

¹³ Inhalte dieses Kapitel, zum großen Teil wörtlich übernommen, von der CD-ROM: Hands on Particle Physics.

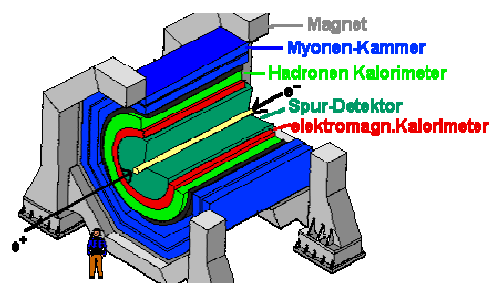


Abb. 12: Der zwiebelschalenartige Aufbau des Detektors um das Strahlrohr.

Detektors einzigartig. Es gibt jedoch ein Grundschema, das hier vorgestellt wird. Ein Detektor aus der Spurkammer, den darauf folgenden Kalorimetern und nachfolgend den Myonenkammern. Dabei umgeben die einzelnen Schichten zwiebelschalenartig das Strahlrohr (siehe Abb.12).

Spurkammer / -detektor

In der innersten Detektorschicht direkt um das Strahlrohr wird die Flugbahn von geladenen Teilchen gemessen, sie werden in einem Magnetfeld auf einer Kreisbahn gekrümmt und ionisieren das Detektormaterial. In älteren Spurkammern hinterlassen die Teilchen im gasgefüllten Raum kleine Ionisationswölkchen. In modernen Detektoren bestehen die Spurkammern meist aus Silizium-Halbleitern. Aus der Krümmung und Richtung der Kreisbahn kann Impuls und Ladung des Teilchens bestimmt werden.

Kalorimeter

Außerhalb der Spurdetektoren befinden sich Kalorimeter, um die Energie der Teilchen zu erfassen. Mit Kalorimetern kann die Energie sowohl von geladenen als auch von neutralen Teilchen gemessen werden.

Wenn ein Teilchen in ein Kalorimeter eintritt, kollidiert es mit dem dichten Material des Detektors. Die Kollisionen verursachen einen Schauer von sekundären Teilchen, wobei die gesamte Energie des ursprünglichen Teilchens im Kalorimeter absorbiert wird. Dabei ist die kinetische Energie des einfallenden Teilchens proportional zur Heftigkeit des ausgelösten Teilchenschauers, was Rückschlüsse auf die in der Kollision erhaltene bzw. verlorene Energie des Teilchens erlaubt. Kalorimeter sind deswegen außerhalb der Spurdetektoren angeordnet, da so die Flugbahn des Teilchens bereits registriert werden kann, bevor es im Kalorimeter absorbiert wird.

Das Kalorimeter besteht wiederum aus zwei Lagen. In der inneren Lage, dem elektromagnetischen Kalorimeter, werden z. B. Elektronen absorbiert. In der äußeren Lage, dem hadronischen Kalorimeter, werden schwerere Teilchen mit einer höheren Durchschlagskraft, wie z. B. Protonen, absorbiert.

Normalerweise sind Myonen und Neutrinos die einzigen Teilchen, die die Kalorimeter durchdringen und zu den Myondetektoren gelangen.

Myonkammer

Myonen, die massereichere Partner der Elektronen aus der zweiten Familie im Standardmodell (siehe Kapitel „Standardmodell der Teilchenphysik“), hinterlassen in allen bisher besprochenen Detektorkomponenten nur eine Ionisationsspur, und verlassen diese fast ungebremst. Für die Absorption im elektromagnetischen Kalorimeter sind sie zu schwer. Danach passieren sie, weil sie genau wie Elektronen nicht der Starken Wechselwirkung unterliegen, auch das hadronische Kalorimeter nahezu ungehindert. Außerhalb des hadronischen Kalorimeters registrieren Myonenkammern dann die Ionisation dieser durchdringenden Teilchen. Myonen sind die einzigen messbaren Teilchen, die es vom Wechselwirkungspunkt bis nach hier außen in die Myonenkammern (und noch viel weiter) schaffen.

Neutrinos wechselwirken fast überhaupt nicht mit Materie. Sie können nur indirekt nachgewiesen werden, indem zur Erfüllung der Erhaltungssätze auf sie rückgeschlossen wird.

Je nach Teilchenart werden Signale in verschiedenen Detektorschichten aufgezeichnet. Anhand der Lage der Signale lassen sich Rückschlüsse auf das Teilchen ziehen (siehe Abb. 13¹⁴).

Bevor die Daten eines Ereignisses dann abgespeichert werden und somit den zukünftigen Analysen der Physiker zur Verfügung stehen, müssen sie noch den Trigger passieren. In diesem Fall durchsucht der Trigger die Daten und selektiert interessante Ereignisse. Schon bekannte und ausreichend untersuchte Prozesse werden nicht mehr abgespeichert. Stattdessen wird der Speicherplatz für interessantere Ergebnisse freigehalten.

1.8. Standardmodell der Teilchenphysik

„Die Bezeichnung Standardmodell bezieht sich normalerweise auf eine unter Experten allgemein anerkannte Sammlung von Theorien, Annahmen und experimentellen Ergebnissen.“¹⁵

Das Standardmodell der Teilchenphysik ist experimentell bisher hervorragend bestätigt und zählt zu den erfolgreichsten naturwissenschaftlichen Theorien überhaupt. Es gab bisher noch keine Phänomene, die den Aussagen des Standardmodells widersprochen haben, obwohl ständig nach solchen gesucht wird. Ein großes Manko ist allerdings die Frage nach der Herkunft der Masse der Teilchen (siehe Kapitel „Die Gravitation“). Die besondere Stärke des Standardmodells ist, dass sich sein Inhalt in wenigen Zeilen mathematisch beschreiben lässt. Für den Status „Weltformel“ reicht es bisher allerdings nicht, da noch zu viele Annahmen und Konstanten in das Standardmodell einfließen. Außerdem birgt es noch zu viele offene Fragen, z. B.:

- Wie entsteht Masse?
- Wieso gibt es drei Generationen der Materieteilchen?
- Wieso existieren die Quarks nicht frei?
- Warum haben die Naturkonstanten den Wert, den sie nun einmal haben?
- Warum besitzen Proton und Elektron genau die gleiche Ladung, nur mit entgegengesetztem Vorzeichen?

Weitere Problemstellen sind:

- die Vereinigung aller Kräfte (die Gravitation ist im Standardmodell nicht berücksichtigt),
- die Vorgänge während des Urknalls werden nicht behandelt,
- das Phänomen der Dunklen Materie.

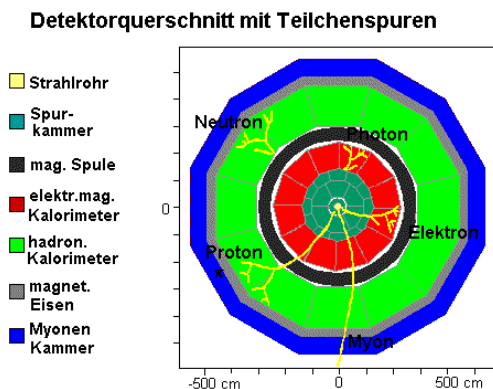


Abb. 13: Der Querschnitt durch einen Teilchendetektor. Man blickt in die Richtung, in der die kollidierenden Teilchen im Strahlrohr laufen, d. h. senkrecht zur Zeichenebene. Deutlich erkennt man, dass die unterschiedlichen Teilchen durch Kombination der Information von verschiedenen Detektorschichten nachgewiesen werden.

¹⁴ Bildunterschrift zitiert nach CD-ROM: Hands on Particle Physics.

¹⁵ zitiert nach Waloschek (1996): Besuch im Teilchenzoo, S. 41

Entstehungsgeschichte

Schon zuvor waren bei Experimenten in der Höhenstrahlung neuartige Teilchen entdeckt wurden, bis 1950 mit der Inbetriebnahme der ersten modernen Teilchenbeschleuniger ständig neue Teilchen entdeckt wurden. Um 1960 sprachen die Wissenschaftler von einem regelrechten „Teilchenzoo“ mit über 300 Teilchen mit verschiedensten Eigenschaften, die sich jeder Ordnung entzogen. Anfang der 70er Jahre wurde das Standardmodell entwickelt, welches das Chaos auflöste und nur 12 fundamentale Materieteilchen und drei der vier bekannten Wechselwirkungen zur Erklärung der experimentellen Ergebnisse benötigte.

Inhalt

Das Standardmodell „beinhaltet neben den Teilchen und den Theorien der Kräfte zwischen den Teilchen auch die 1905 von Einstein eingeführte spezielle Relativitätstheorie, die im 20. Jahrhundert entwickelte Quantentheorie wie auch die immer gültigen Grundgesetze der Physik.“¹⁶ Auch sind spezielle Naturkonstanten eingegeben. Dies alles bildet die Basis für das Ordnungssystem der elementaren Teilchen und drei der vier grundlegenden Wechselwirkungen (die Gravitation ist noch nicht erfasst). Abbildung 14 beinhaltet das Standardmodell, die folgenden Texte erläutern dieses.

Spin, Fermionen und Bosonen

Es gibt verschiedene Muster der Einordnung, beispielsweise nach der Eigenschaft Spin (Eigendrehimpuls).

Erläuterungen zum Spin¹⁷: „allgemein der infolge der Drehung eines Körpers um die eigene Achse auftretende Drehimpuls, im engeren Sinne eine in der Quantentheorie auftretende Größe, die man als Eigendrehimpuls eines Quantenteilchens (z.B. Atom, Elektron, Atomkern, Elementarteilchen) interpretieren kann. Diese Interpretation darf aber nicht zu wörtlich gefasst werden, denn ein punktförmiges Teilchen hat definitionsgemäß kein Trägheitsmoment, kann aber trotzdem einen Spin besitzen. Auch gibt es Teilchen, die erst nach zwei Spin-„Umdrehungen“ wieder ihren Ausgangszustand erreichen.“ Dann beträgt der Spin $\frac{1}{2}$, dies gilt z. B. für das Elektron.

Fermionen sind Teilchen, die einen halbzahligen Spin besitzen. Die Materieteilchen sind elementare Fermionen.

Fermionen können nur paarweise erzeugt und vernichtet werden (Paarerzeugung und Paarvernichtung).

Bosonen haben einen ganzzahligen Spin. Die Wechselwirkungsteilchen sind elementare Bosonen und heißen Eichbosonen.

Bosonen können in beliebiger Zahl abgestrahlt und eingefangen werden.

Die elementaren Fermionen bauen die Materie auf, während die elementaren Bosonen zwischen ihnen ausgetauscht werden.

¹⁶ zitiert nach Waloschek (1996): Besuch im Teilchenzoo, S. 41

¹⁷ zitiert nach Redaktion Schule und Lernen (2007): Schülerduden Physik, S. 416

Fermionen

elektrische Ladung	1. Familie	2. Familie	3. Familie
Quarks	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{2}{3}$
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
Leptonen	-1	-1	-1
	0	0	0

Eichbosonen

Starke Wechselwirkung	G	Gluon $m \approx 0 \text{ eV}$
Schwache Wechselwirkung	W^+ $m \approx 80,399 \text{ GeV}$ W^- $m \approx 80,399 \text{ GeV}$ Z^0 $m \approx 91,187 \text{ GeV}$	W^+ $m \approx 80,399 \text{ GeV}$ W^- $m \approx 80,399 \text{ GeV}$ Z^0 $m \approx 91,187 \text{ GeV}$
Elektromagnetische Wechselwirkung	γ	Photon $m < 1 \cdot 10^{-18} \text{ eV}$
Massenerzeugung	H	Higgs-Teilchen $m > 114,4 \text{ GeV}$

Abb. 14: Standardmodell der Teilchenphysik

Drei Familien

Die Fermionen werden in drei Familien eingeteilt. Diese unterscheiden sich nur in ihrer Masse: Die Teilchen der ersten Familie sind die leichtesten, die der dritten die schwersten. Die uns umgebende Materie ist nur aus den Teilchen der ersten Familie aufgebaut. Teilchen aller drei Familien entstanden beim Urknall. Teilchen der zweiten und dritten Familie existierten im frühen Universum, zerfielen aber dann in die leichteren Teilchen der ersten Familie.

Quarks

Murray Gell-Mann sagte 1964 die Existenz der Quarks voraus.

Die Ladung der Quarks ist nicht ganzzahlig. Jedoch wurden in der Natur (bisher) nur ganzzahlige Ladungen frei beobachtet. Quarks schließen sich daher immer so zusammen, dass eine ganzzahlige Ladung entsteht.

Elektron, Myon, Tau

Die Verwandten Elektron, Myon und Tau unterscheiden sich lediglich in ihrer Masse. Damit verbunden ist das leichteste Teilchen der drei am stabilsten. Das Elektron ist somit ein mögliches Produkt, wenn ein Myon zerfällt. Das Tau wiederum zerfällt in das Myon. Das Myon wurde 1937 in der Höhenstrahlung, das Tau 1975 an Teilchenbeschleunigern entdeckt.

Neutrino

Neutrinos wechselwirken nur äußerst selten mit ihrer Umgebung. Ihre Detektion ist sehr schwer, denn sie sind elektrisch neutral und besitzen nur eine verschwindend geringe Masse. Daher wurden sie auch erst 1956 entdeckt. 1930 postulierte Wolfgang Pauli deren Existenz, damit das Prinzip der Energierhaltung bei der schwachen Wechselwirkung eingehalten wird.

Punktförmigkeit

Die Teilchen im Standardmodell sind nach heutigem Kenntnisstand punktförmig. „Punktförmig“ bedeutet in der Sprache der Physiker, dass Größe und Form des Teilchens bisher nicht messbar waren, da sie so klein sind. Es ist lediglich festgestellt, dass sie kleiner als 10^{-18} m sind. Bei Rechnungen werden sie dann als geometrischer Punkt aufgefasst. Sollte mit besseren Messmethoden eines Tages die Größe eines Teilchens im Standardmodell identifiziert werden, so bedeutet das, dass das Teilchen eine innere Struktur besitzt, somit ist es nicht mehr elementar. Das Gegenteil von punktförmig ist im physikalischen Sprachgebrauch „verschmiert“.

Ein anderes Einordnungsmittel sind die Wechselwirkungen (siehe Abb. 15): Auf die Teilchen der jeweiligen Ebene wirken sowohl die Wechselwirkung, auf deren Stufe sie stehen, als auch die weiter unten stehenden Wechselwirkungen.

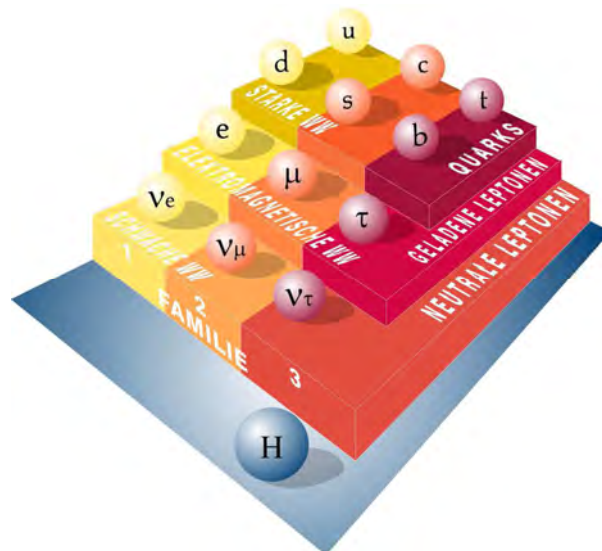


Abb. 15: Die Teilchen aus dem Standardmodell und die Wechselwirkungen, die auf sie wirken.

1.9. Wechselwirkungen

Häufig werden die vier fundamentalen Wechselwirkungen auch als fundamentale Kräfte bezeichnet, jedoch ist die Bezeichnung „Kraft“ streng genommen physikalisch falsch. Kräfte verursachen nur Anziehung und Abstoßung, die Eichbosonen jedoch sorgen neben Anziehung und Abstoßung auch für Umwandlung von Teilchen.

Genauer sorgt die schwache Wechselwirkung für die Umwandlung von Teilchen, sodass hier nur von „Wechselwirkung“ die Rede sein kann, während bei den anderen drei Wechselwirkungen auch der Begriff „Kraft“ angewendet werden kann.

Die fundamentalen Wechselwirkungen werden durch Teilchen vermittelt.

1.9.1. Die starke Wechselwirkung

Wirkt auf: Quarks

Eichboson: Gluon

Reichweite: 10^{-15} m

Wirkung: hält Quarks innerhalb der Nukleonen zusammen, sorgt für den Zusammenhalt des Atomkerns

Farbladung

Die Quantenchromodynamik (QCD) beschreibt die starke Wechselwirkung mithilfe von Farbladungen der Quarks. Natürlich sind die Quarks nicht farbig, die Farbladung ist eine Analogie zu einer abstrakten Eigenart der Quarks.

Per Definition gibt es für Quarks die positiven Farbladungen Blau, Rot und Grün, für Antiquarks die negativen Farbladungen Antiblau, Antirot und Antigrün.

Verbindungen, die frei existieren können, müssen immer farbneutral, d.h. weiß, sein.

Weiß wird erreicht durch

- alle drei Farben (siehe Abb. 16)
- alle drei Antifarben
- Farbe + Antifarbe.

Bei Teilchenumwandlungen gilt das Gesetz der Erhaltung der Farbladung.

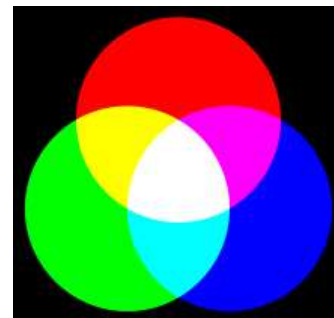


Abb. 16: Durch Mischen von drei Quarks mit den Farbladungen Blau, Grün und Rot entsteht die Farbladung Weiß, das so entstandene Teilchen kann somit frei existieren.

„Build your own particle“

Mit ein paar Überlegungen und Berücksichtigen des Gesetzes, dass nur farbneutrale Teilchen mit ganzzahliger Ladung frei existieren können, kann man sich selbst reale Quarkverbindungen herleiten.

Teilchen, die aus Quarks bestehen, heißen **Hadronen**.

Abbildung 17 bietet eine Übersicht von existierenden Verbindungen aus up- und down-Quarks.

Baryonen bestehen aus drei Quarks. Die bekanntesten Vertreter sind das Proton und das Neutron.

Das Proton ist aus zwei up-Quarks (zweimal die Ladung $+\frac{2}{3}$) und einem down-Quark (Ladung $-\frac{1}{3}$)

zusammengesetzt, $2 \cdot \left(+\frac{2}{3}\right) + 1 \cdot \left(-\frac{1}{3}\right) = +1$.

Beim Neutron führen ein up- und zwei down-Quarks zur Gesamtladung 0.

Das Gleiche gilt natürlich auch für die Kombinationen aus Antiquarks: Hierbei entstehen Antibaryonen mit der betragsmäßig gleichen Ladung, aber entgegengesetztem Vorzeichen.

Die Farbe Weiß wird durch die jeweilige Kombination aller Farben bzw. aller Antifarben erreicht.

Baryonen sind immer Fermionen.

u-Quark $+\frac{2}{3}$
d-Quark $-\frac{1}{3}$

Anti-u-Quark $+\frac{2}{3}$
Anti-d-Quark $-\frac{1}{3}$

Ladung

Δ^{++}	$u + u + u$	+2	$\bar{d} + \bar{d} + \bar{d}$	$\bar{\Delta}^{--}$
Δ^+	p $u + u + d$	+1	$\bar{u} + \bar{d} + \bar{d}$	$\bar{n}$ $\bar{\Delta}^0$
Δ^0	n $u + d + d$	0	$\bar{u} + \bar{u} + \bar{d}$	$\bar{p}$ $\bar{\Delta}^-$
Δ^-	$d + d + d$	-1	$\bar{u} + \bar{u} + \bar{u}$	$\bar{\Delta}^{--}$
		-2		

π^+	$u + \bar{d}$	+1	$u + \bar{u} / d + \bar{d}$	π^0
π^0	$u + \bar{u} / d + \bar{d}$	0	$d + \bar{u}$	π^-
		-1		

Zusammenstellung aller Zweier- und Dreierverbindungen mit ganzzahliger elektrischer Ladung, die man aus u-Quarks, d-Quarks und ihren Antiquarks bilden kann. Die Antiteilchen werden mit einem Balken über dem Symbol dargestellt.

Abb. 17: Im oberen Teil sind die Baryonen, im unteren die Mesonen gezeigt.

Mesonen bestehen aus einem Quark-

Antiquark Paar. Das Quark trägt eine bestimmte Farbe, das Antiquark die jeweilige Antifarbe. Sie können elektrisch positiv, neutral oder negativ geladen sein.

Mesonen sind Bosonen, denn ihr Spin ist ganzzahlig.

Da Mesonen aus einem Quark und Antiquark bestehen, zerfallen sie meist sehr schnell.

Die leichtesten Mesonen sind die Pionen.

Die geladenen Pionen (up-Anti-down bzw. down-Anti-up) zerstrahlen nicht sofort, da sie aus einem Quark und einem andersartigen Antiquark bestehen. Dafür ist zunächst eine Teilchenumwandlung vonnöten, ehe die Annihilation folgen kann.

Eine Sonderstellung nimmt das neutrale Pion ein.

Beispiel: Aus einem up-Anti-up Pion wird ein Gluon, das aber sofort wieder in ein Pion, diesmal ein down-Anti-down, umgewandelt wird. „Wenn man also ein neutrales Pion in Gedanken fotografiert, wird es zu 50 Prozent in dem einen und zu 50 Prozent in dem zweiten Zustand erscheinen. In der Quantentheorie kann man solche Mischzustände verstehen und beschreiben.“¹⁸

Wichtig ist noch die Einsicht, dass sich die Gesetze von Farbneutralität und ganzzahliger Ladung gegenseitig ergänzen. Aus der Sicht der ganzzahligen Ladung spricht nichts dagegen, dass es eine Verbindung aus zwei up-Quarks, einem down-Quark und einem Anti-up-Quark existiert. Jedoch kann dieses Teilchen aufgrund der erforderlichen, aber nicht vorhandenen Farbneutralität nicht existieren.

¹⁸ zitiert nach Waloschek (1996): Besuch im Teilchenzoo, S. 191

Theoretisch sind auch gewisse Verbindungen aus mehr als drei Quarks möglich (z.B. zwei up-Quarks mit zwei Anti-up-Quarks), bisher ist aber die Existenz solcher Tetra- und Pentaquarks etc. nicht ausreichend bewiesen.

Gluonen

Eichbosonen der starken Wechselwirkung sind die Gluonen. Über sie wechselwirken die farbgeladenen Quarks mit dem Feld der starken Wechselwirkung. Die Gluonen sind eine Art „Klebstoff“, da sie für den Zusammenhalt sowohl der Quarks unter sich als auch des gesamten Nukleus sorgen.

Die starke Kraft ist sehr stark, ihre Stärke wird durch einen häufigen Austausch von Gluonen beschrieben. In einem Hadron (frei existente Verbindung aus Quarks) emittieren und absorbieren die Quarks ständig Gluonen und wechseln dadurch ständig ihre eigene Farbe, die momentane Farbladung eines Quarks festzustellen ist nicht möglich. Dieser Mechanismus sorgt für das Zusammenhalten der Quarks. Beispiel:

„Ein Proton p enthält die Quarks u (blau), u (grün) und d (rot).

Das d-Quark emittiert ein Gluon mit der Farbladung (antigrün/rot).

$d(\text{rot}) \rightarrow g(\text{antigrün/rot}) + d(\text{grün})$.

Ein solches Gluon wird von dem u-Quark (grün) aufgenommen: $u(\text{grün}) + g(\text{antigrün/rot}) \rightarrow u(\text{rot})$

Das Proton p enthält dann die Quarks u (blau), u (rot), d (grün).“¹⁹

Da die Gluonen selbst eine Farbladung (eine Farbe sowie eine beliebige Antifarbe) besitzen, treten unter ihnen Farbkräfte auf.

Während die Photonen neutral sind und sich nicht gegenseitig beeinflussen und so das bekannte Feldlinienbild erzeugen (siehe Abb. 18), ist das Ganze bei dem Feldlinienbild der starken Wechselwirkung schon wesentlich komplizierter. Das Feld wird dadurch, dass die Gluonen nochmals untereinander in Wechselwirkung treten, komprimiert (siehe Abb. 19).

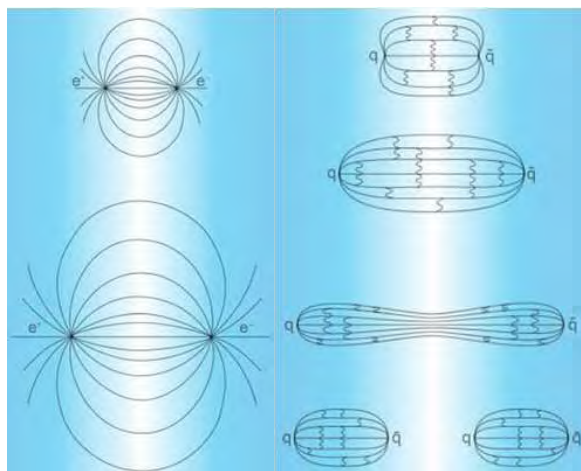


Abb. 18: Wächst die Entfernung zwischen elektrischen Ladungen, so verringert sich die elektrische Kraft zwischen diesen. Dies zeigt der größer werdende Abstand zwischen den Feldlinien.

Abb. 19: Beim Auseinanderbringen von Quarks wird die Kraft immer stärker, bis die in ihr gespeicherte Energie so groß wird, dass ein neues Quark-Antiquark-Paar entstehen kann.

Confinement

„Confinement“ bezeichnet die Gefangenschaft der Quarks. Gemeint ist der Umstand, dass in der Natur nur farbneutrale Objekte und somit keine einzelnen Quarks frei existieren können.

Versucht man, farbgeladene Teilchen zu trennen, so muss man Energie aufwenden. Beispielhaft wird hier das Trennen von einem Quark-Antiquark-Paar, einem sogenannten Meson, untersucht.

Beim Auseinanderbringen von elektrischen Ladungen nimmt die aufzuwendende Energie mit größerem Abstand ab. Bei den Quarks ist jedoch das Gegenteil der Fall: Je größer der Abstand

¹⁹ zitiert nach Grehn, Krause (2007): Metzler Physik, S. 532

zwischen ihnen wird, desto stärker wird die zusammenhaltende Kraft. Als Analogie kann man sich hier ein Gummiband²⁰ vorstellen: Anfänglich ist das Dehnen noch einfach, wird aber immer schwerer. Irgendwann reißt das Gummiband. Bei dem Meson aber liegt der Sachverhalt anders: Ab einem Abstand von einem Femtometer ist die in dem Feld gespeicherte Energie so groß, dass aus dieser nach $E = m \cdot c^2$ ein Quark-Antiquark-Paar entsteht, die sich mit dem vorliegenden Quark und Antiquark zu zwei Mesonen verbinden. Die Trennung eines hier erzeugten Mesons würde wieder ein Quark-Antiquark-Paar und somit zwei neue Mesonen erzeugen.

Quarks lassen sich also (bisher) nicht trennen, da ab gewissen Abständen weitere Quarkpaare erzeugt werden. Sie sind in gewisser Weise gefangen, da sie nie allein frei sein können.

Rechnungen mit dem Feld der starken Wechselwirkung werden theoretisch durch die Quantenchromodynamik abgedeckt. Allerdings sind die Rechnungen bisher nur bei geringen Abständen erfolgreich. Gemeint sind damit z. B. Quarks im Inneren eines Protons. Sie sind so dicht beieinander, dass die starke Wechselwirkung relativ schwach ist, die Quarks können sich fast frei bewegen, dieser Zustand heißt „asymptotische Freiheit“. Anschaulich würde das bedeuten, dass die Gummibänder ungedehnt sind und durchhängen. Wenn die Abstände und damit die Kraft größer werden, versagt die Mathematik. Außerdem ist nicht klar, ob die Kraft unbegrenzt immer größer wird oder ob es irgendwann einen Punkt gibt, an dem sie wieder schwächer wird. Wäre dem so, wäre es nur eine Frage der Zeit und der verfügbaren Mittel, bis so leistungsfähige Beschleuniger gebaut worden sind, die die ersten freien Quarks erzeugen.

An HERA am DESY wurde bestätigt, dass zwischen den Abständen 10^{-16} m und 10^{-18} m die Stärke der starken Kraft immer weiter zunimmt.

Lediglich kurze Zeit nach dem Urknall bei der damals sehr großen Energiedichte sollen freie Quarks existiert haben: Im Quark-Gluon-Plasma (siehe Abb. 20) konnten Quark und Gluonen sich ungebunden bewegen. Am LHC am CERN wird versucht, diesen Zustand zu erzeugen, um ihn dann zu untersuchen.

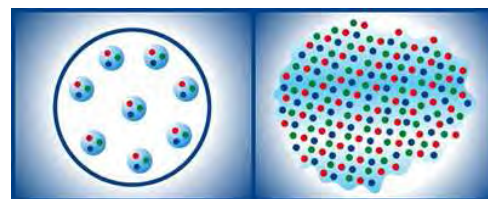


Abb. 20: Im Quark-Gluon Plasma existieren die Quarks nicht mehr in gebundenen Zuständen, sondern existieren frei.

Kernkraft

Lange Zeit galt die Kernkraft als Sorgenkind der Physiker, da sie sich nicht erklären konnten, warum die positiv geladenen Protonen sich nicht abstoßen. Mit der starken Wechselwirkung ist aber eine Erklärung gefunden worden:

„Die Kernkraft ist also eine Art Resteffekt der viel stärkeren Farbkraft zwischen Quarks und Gluonen. Es gibt sie natürlich nur in einem Umkreis von etwa einem Femtometer. Bei größerer Entfernung wirkt sie nicht, weil sich die farbgeladenen Teilchen gar nicht so weit von ihren Nukleonen entfernen können. Diese Kernkraft ist aber immer noch sehr viel stärker als die elektrische Abstoßung, zum Beispiel zwischen den elektrisch positiv geladenen Protonen.“²¹

²⁰ Analogie nach Waloschek (1996): Besuch im Teilchenzoo, S. 178-179

²¹ zitiert nach Waloschek (1996): Besuch im Teilchenzoo, S. 194

1.9.2. Die schwache Wechselwirkung

Wirkt auf: alle Teilchen außer dem Photon

Eichboson: W^+ , W^- , Z^0

Reichweite: 10^{-17} m

Wirkung: Umwandlung von Teilchen

Die schwache Wechselwirkung ist dafür verantwortlich, dass Teilchen sich in eine andere Teilchenart umwandeln können.

Mit ihr lässt sich z.B. der β -Zerfall erklären (siehe Abb. 21):

Ein Neutron wandelt sich um in ein Proton unter Abgabe eines Elektrons und ein Neutrino.

Im ersten Schritt verwandelt sich das down-Quark unter Emission eines W^- -Bosons in ein up-Quark.

$(u,d,d) \rightarrow (u,d,u) + W^-$

Im zweiten Schritt zerfällt das W^- -Boson in ein Elektron und ein Antineutrino.

$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$

Das ergibt die Gesamtgleichung

$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Prozesse, die durch die schwache WW erst möglich sind, sind z. B. die Energieerzeugung in der Sonne.

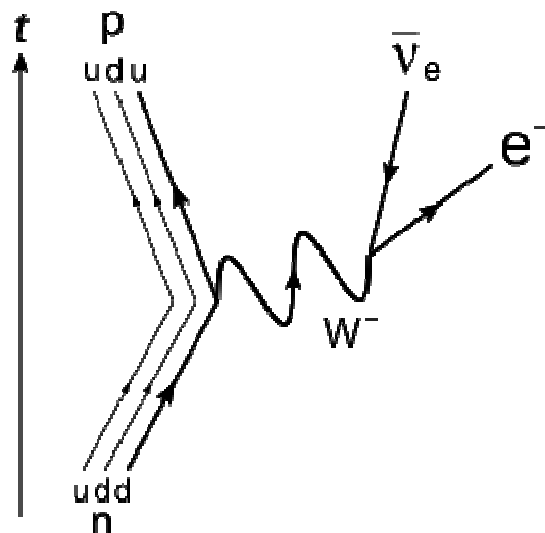


Abb. 21: Schema des β^- -Zerfalls eines Neutrons. Der Zeitpfeil zeigt nach oben. Der wellenförmige Pfeil des W^- -Bosons ist lediglich die typische Kennzeichnung von Eichbosonen in solchen Diagrammen und bedeutet nicht, dass es in der Zeit zurückgeht.

1.9.3. Die elektromagnetische Wechselwirkung

Wirkt auf: elektrisch geladene Teilchen

Eichboson: Photon

Reichweite: unendlich

Wirkung: verantwortlich für alle Phänomene der elektromagnetischen Theorie, dazu gehören u. A. Elektrizität, Magnetismus, Optik; spielt außerdem eine wichtige Rolle in der Chemie

1.9.4. Die Gravitation

Wirkt auf: Masse

Eichboson: darüber macht das Standardmodell keine Aussage

Reichweite: unendlich

Wirkung: Massenanziehung

Für Betrachtungen im Mikrokosmos ist die Gravitationskraft nicht von Bedeutung, denn ihr Einfluss ist verschwindend klein.

Jedoch ist die Erklärung der Massenanziehung ein großes Problem des Standardmodells. Es erklärt nicht die Gravitation. Außerhalb des Standardmodells wurde das Graviton postuliert, das die anziehende Wirkung der Gravitationskraft vermitteln soll, ähnlich der Rolle des Photons in der Vermittlung der elektromagnetischen Kraft. Das Graviton ist noch nie beobachtet worden. Es ist kein Bestandteil des Standardmodells, sondern stellt nur eine mögliche Erweiterung dar, sollte sich in Zukunft dessen Existenz beweisen und es sich widerspruchsfrei in das bestehende Theoriemodell einfügen lassen.

Ein weiteres Problem ist, dass im Standardmodell die Teilchen zunächst eigentlich masselos sind. In der Theorie kann die starke, schwache und elektromagnetische Wechselwirkung schön beschrieben werden, aber die Masse der entsprechenden Teilchen kommt nicht vor. In der Praxis haben sie aber Massen. Eine Möglichkeit, die Massen einzufügen, besteht in der Definition des Higgs-Mechanismus. Dieser ist im Standardmodell enthalten und noch nicht im Experiment bewiesen. Er erklärt, warum Teilchen eigentlich eine Masse besitzen bzw. wie sie zu ihrer Masse gelangen.

Peter Higgs postulierte den Higgs-Mechanismus: Masse ist ihm zufolge keine Teilcheneigenschaft, sondern das Ergebnis einer Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld. Dabei entspricht eine stärkere Wechselwirkung einer größeren Masse.

Da sie sehr viel Geld in die Suche nach dem Higgs investierten, wollten englische Politiker von den Teilchenphysikern den Higgs-Mechanismus leicht verständlich erklärt bekommen. Im Zuge dieses Gespräches entwickelte sich eine Analogie (siehe Abb. 22), die heute immer noch gerne zur Erklärung benutzt wird.

Das Higgs-Feld ist überall, auch im Vakuum, anwesend. Teilchen interagieren nun mehr oder weniger stark mit diesem und erhalten so ihre spezifische Masse. Manche Teilchen, wie das Photon, interagieren gar nicht und haben somit auch keine Masse.



Abb. 22: Analogie zum Higgs-Mechanismus.

Beim LHC am CERN ist nun einer der Schwerpunkte, das Higgs-Boson zu finden. Einige Theorien sagen die Existenz von mehreren Higgs-Bosonen voraus. Aus vorangegangenen Berechnungen lässt sich ableiten, dass mindestens ein Higgs dort wirklich gefunden wird. Die Überzeugung geht soweit, dass einige Teilchenphysiker behaupten, dass bei Nichtentdeckung des Higgs der Physik irgendwo zwischen Newton und heute ein Fehler unterlaufen sein muss. Taucht das Higgs nicht auf, würde dieser Umstand die Wissenschaft Physik wohl in eine tiefe Krise stürzen.

1.10. Aktuelle Forschungsgebiete

1.10.1. Supersymmetrie

Bei der Supersymmetrie (SUSY) wird jedem Teilchen des Standardmodells ein supersymmetrisches Partnerteilchen zugeordnet. Dabei werden den Fermionen Teilchen mit ganzzahligem Spin (Bosonen) zugeordnet. Die supersymmetrischen Partnerteilchen der Bosonen hingegen besitzen einen halbzahligem Spin und sind somit Fermionen. Dieses Zuordnungsprinzip lässt die strikte Trennung zwischen Materie- und Wechselwirkungsteilchen wegfallen. Die Zahl der elementaren Teilchen verdoppelt sich mit somit.

Die SUSY-Teilchen der Fermionen enthalten jeweils ein „S“ vorangestellt, die Wechselwirkungsteilchen werden in dem SUSY-Modell mit einem „-ino“ versehen: So gibt es Squarks, Sleptonen, Higgsinos, Photinos, Gluinos etc.; Abbildung 23 zeigt die existieren fundamentalen Teilchen nach der SUSY-Theorie.

Nur ist diese Hälfte der Teilchenwelt noch nie beobachtet worden. Die Physiker begründen dies damit, dass die SUSY-Teilchen sehr schwer sind und die Energiebereiche der bisherigen Teilchenbeschleuniger nicht ausreichend waren. Momentan wird am TEVATRON und am LHC nach SUSY-Teilchen gesucht.

Ein weiteres Merkmal der SUSY ist, dass in theoretischen Berechnungen die Vereinigung der Kräfte zu einer einzigen Superkraft enorm vereinfacht wird.

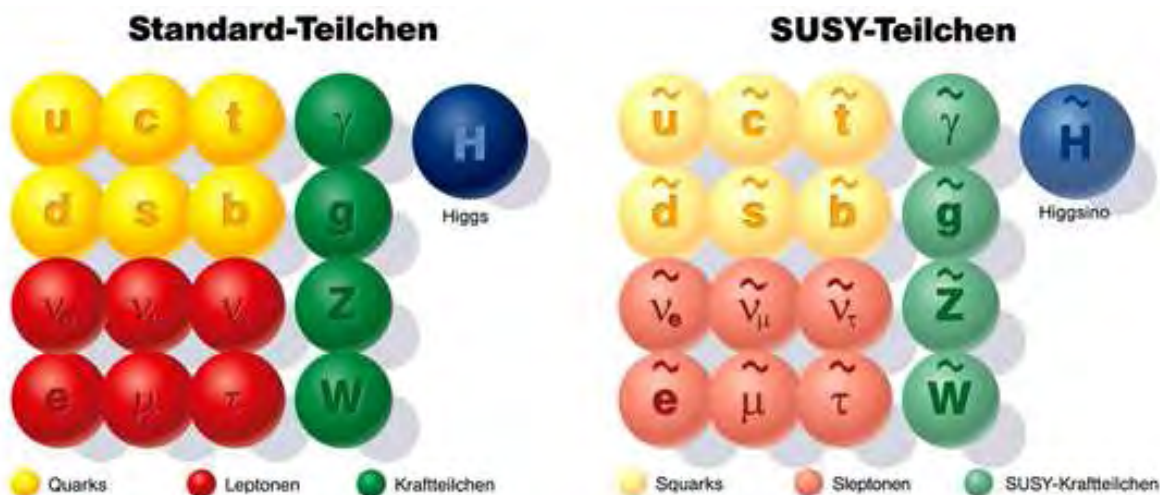


Abb. 23: Jedem Standardmodell-Teilchen wird ein SUSY-Teilchen zugeordnet, es ergibt sich obige Teilchenvielfalt.

1.10.2. Vereinigung der Wechselwirkungen

Die Idee hinter der Vereinigung der Wechselwirkungen ist, dass im ganz jungen Universum nur eine einzige Wechselwirkung, die „Urkraft“, vorhanden war, die sich dann mit Ausdehnung und Abkühlung des Universums in die uns bekannten vier Wechselwirkungen aufspaltete. Die Theorie postuliert, dass sich die Urkraft zunächst von der Gravitation trennte, dann von der starken Wechselwirkung, sodass die elektroschwache Wechselwirkung übrig blieb. Diese spaltete sich bei niedrigeren Energien dann auch wieder auf.

Zum Beweis dieser Theorie betrachtet man das Verhalten der Eichbosonen in den Energiebereichen, in denen der Theorie zufolge gewisse Vereinigungen von Wechselwirkungen herrschten. Ein höherer Energiebereich bedeutet mehr Annäherung an den Urknall und somit kleinere Abstände: Schließlich war das Universum zu Beginn extrem klein und energiereich. In Teilchenbeschleunigern untersucht man daher, wie sich die Eichbosonen bei hohen Energien verhalten, und überträgt die Kenntnisse daraus auf frühe Phasen des Universums. An HERA gelang es, mithilfe von Kollisionen von Protonen und Elektronen, die elektroschwache Vereinigung nachzuweisen (siehe Abb. 24²²).

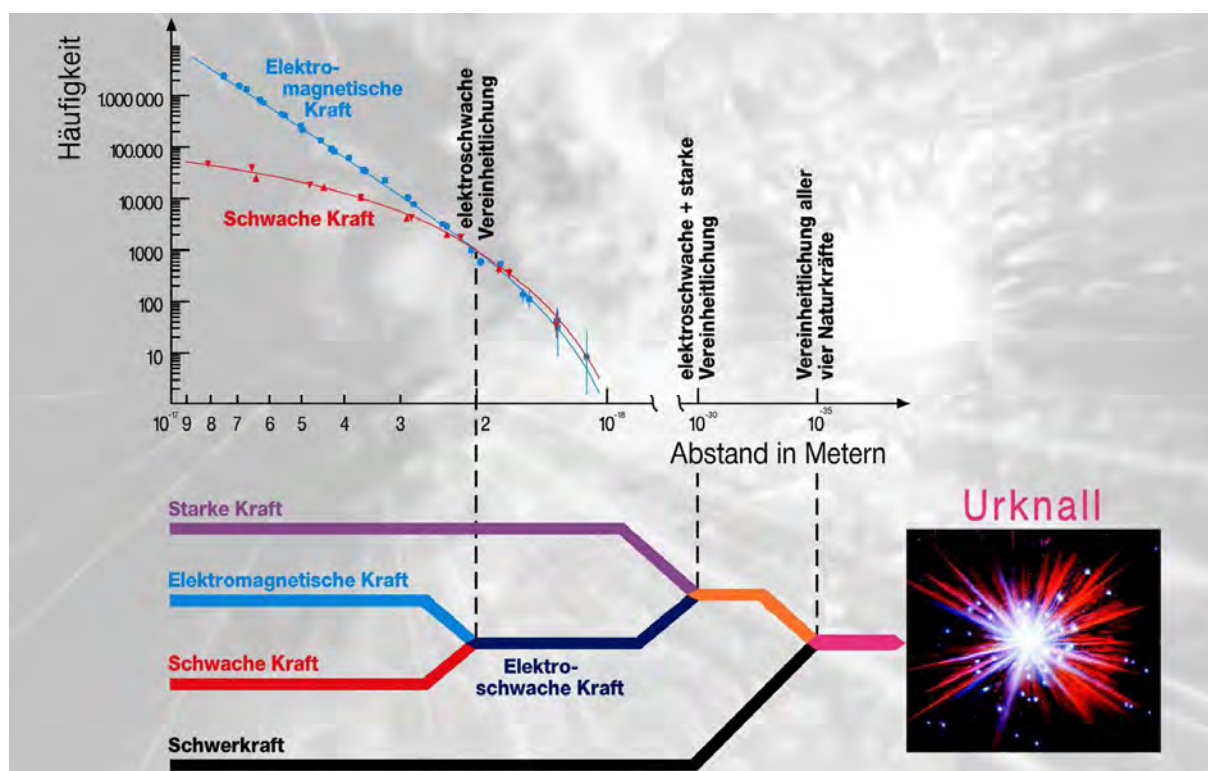


Abb. 24: „Elektroschwache Vereinheitlichung: Ein wichtiges Ergebnis der HERA-Physik war der experimentelle Nachweis der so genannten elektroschwachen Vereinheitlichung. Die Grafik zeigt die Häufigkeit von Teilchenreaktionen der elektromagnetischen und der schwachen [Wechselwirkung] als Funktion des Minimalabstands beim Stoß. Nach rechts hin werden die Abstände kleiner. Bei Abständen, die größer als die Reichweite der schwachen [Wechselwirkung] sind, tritt die elektromagnetische Reaktion wesentlich häufiger auf als die schwache. Bei kleineren Abständen sind beide Reaktionen etwa gleich häufig - aus der Messung kann man also direkt die elektroschwache Vereinheitlichung ablesen, wie sie auch theoretisch vorhergesagt wurde (durchgezogene Linien). Im unteren Teil der Abbildung ist der Weg der Vereinheitlichungen der vier Naturkräfte symbolisch dargestellt.“

²²

Bildunterschrift zitiert nach

http://www.desy.de/images/content/e8/e76/imageobject183/kraeftevereinigung_hr_ger.jpg,
eingesehen am 04.08.2010

1.10.4. Dunkle Materie

Astrophysikalischen Beobachtungen zufolge besteht nur 4-5% des Universums aus uns bekannter Materie. Nach der Analyse von Planeten- und Galaxienbewegungen gelangte man zum Ergebnis, dass die vorhandene erfasste Masse nach den Gesetzen für die Planetenbewegungen nicht für die tatsächlichen beobachteten Bewegungen ausreicht. Stattdessen muss es einen Anteil an nicht detektierbarer Masse geben, der dafür sorgt, dass die Bewegungen den bekannten Gravitationsgesetzen folgen. Da diese Masse bisher noch nicht registriert wurde, ergab sich so der Name der „Dunklen Materie“. Man weiß bisher nicht, woraus die Dunkle Materie besteht, vermutet aber, dass sie 23% der Gesamtmaterie des Universums ausmacht. Kandidaten gibt es aber schon: So könnte z. B. das leichteste supersymmetrische Teilchen, falls es nicht in die uns bekannte Materie zerfallen darf, die dunkle Materie bilden.

Am LHC versucht man, das Geheimnis um die Dunkle Materie (wenigstens ein bisschen) zu lüften. Denn da es sich um Teilchen handelt, müssten sie ja auch an Teilchenbeschleunigern erzeugbar sein.

1.10.5. Dunkle Energie

Mit der dunklen Energie ist es ein bisschen so wie mit der Dunklen Materie: Die Physiker können sich ein Phänomen nicht erklären, es widerspricht den bisherigen Gesetzen. Damit dieser Widerspruch aufgelöst wird, wird etwas Neues eingeführt, das diesen scheinbaren Widerspruch auflösen kann. Leider ist das Neue meistens auch noch so unbekannt, dass keiner weiß, woraus es denn bestehen soll.

Die fortdauernde Expansion des Universums gibt den Physikern ein großes Rätsel auf, da eigentlich die Gravitation dem entgegen wirken sollte. Mit der Dunklen Energie ist der Antrieb dafür gefunden: Sie ist eine Art Antigravitation und sorgt dafür, dass sich das Universum beschleunigt ausdehnt. Sie macht 72% der Materie des Universums aus. Woraus sie besteht, weiß keiner. Sie ist aber nicht so sehr Gegenstand aktueller Forschung wie die Dunkle Materie.

1.10.6. Antimaterie

1928 von dem englischen Physiker Dirac vorausgesagt, wurde 1932 in der Höhenstrahlung das Antiteilchen des Elektrons, das Positron, nachgewiesen.

Antimaterie ist identisch mit den normalen Teilchen, jedoch besitzen sie die entgegengesetzte elektrische Ladung. Außerdem bewegen sich Antiteilchen im Magnetfeld in die entgegengesetzte Richtung.

Trifft ein Fermion mit einem Antifermion zusammen, kann es zur Annihilation (zur Zerstrahlung) in ein Wechselwirkungsteilchen kommen. Dieser Vorgang heißt auch Paarvernichtung, da Fermionen sich immer paarweise vernichten. Annihilation funktioniert aber nicht bei jeder beliebigen Kombination, die Erhaltungssätze müssen eingehalten werden.

Umgekehrt ist es aber auch möglich, dass sich Strahlung in Masse verwandelt: Dieser Vorgang nennt sich Paarerzeugung.

Beispielhaft ist die Paarerzeugung und Paarvernichtung bei Elektron-Positron-Paaren und Photonen: Da die Summe der Ladungen von Elektron und Positron Null ist, kann so ein ungeladenes Photon durch Paarvernichtung entstehen: $e^- + e^+ \rightarrow \gamma$

Je nach Bewegungsenergie der Elektronen und Positronen entstehen auch mehrere Photonen.

Besitzt ein Photon genügend Bewegungsenergie für die Ruhemasse von Elektron und Positron, kann Paarerzeugung stattfinden, noch vorhandene überschüssige Bewegungsenergie wird dann als Bewegungsenergie auf die Produkte verteilt: $\gamma \rightarrow e^- + e^+$

Diese Beispiele zeigen, dass Fermionen immer paarweise erzeugt und vernichtet werden, wohingegen Bosonen auch in ungeraden Anzahlen entstehen und verschwinden.

Reicht die Energie aus, finden diese Umwandlungen ständig statt. Im Licht ist somit auch immer ein gewisser Anteil an Elektronen und Positronen. Die Gluonen sind für kurze Zeit auch immer in Form eines Quark-Antiquark-Paares existent.

Diese Tatsachen würden bedeuten, dass wir und unsere Umgebung immer zu einem gewissen Anteil aus Antimaterie bestehen. Nun stellt sich die Frage, warum dann bei der gegenseitigen Vernichtung nicht ständig kleine Explosionen mit zerstörerischer Wirkung vonstattengehen. Das liegt daran, dass es sich hier um „virtuelle Teilchen“ handelt, ein Phänomen, das aus der Verbindung von Quantenmechanik und Relativitätstheorie resultiert. Eine vollständige Erklärung, was das für Teilchen sind und welche Eigenschaften sie besitzen, führt wegen der hohen Komplexität zu weit. Es wird vermutet, dass virtuelle Teilchen zu kurz existieren, um sie oder deren Auswirkungen (wie eine Vernichtung mit zerstörerischer Kraft) zu beobachten, aber es sie trotzdem geben muss.

Im Urknall wurden Materie und Antimaterie zu gleichen Teilen erzeugt. Nach dem heutigen Forschungsstand aber gibt es in unserem Universum keine Antimaterie mehr, nur die, die bei Zerfällen, z.B. in der oberen Atmosphäre mit der Höhenstrahlung, entsteht, dann aber auch schnell wieder vernichtet wird. Daraus folgt, dass im Laufe der Zeit die Antimaterie vollständig annihiliert wurde. Dabei blieb ein „kleiner“ Rest Materie übrig: immerhin so groß, dass daraus das Universum entstehen konnte. Wie dieser Überschuss zustande kam, ist ein Rätsel. Am LHCb-Detektor des LHC soll jetzt untersucht werden, wie es zu dem Ungleichgewicht gekommen ist.

1.10.5. Das Innere des Protons – neueste Erkenntnisse

Der Kenntnisstand über den Aufbau des Protons hat sich im Laufe der Zeit verändert (siehe Abb. 25²³). Bei dem Abtasten des Protons mit Elektronen wurde mithilfe von HERA entdeckt, dass das Innere des Protons nicht nur aus drei Quarks besteht. Vielmehr ist dort eine regelrechte Suppe aus vielen Gluonen, Quarks und Antiquarks vorhanden. Die sogenannten Valenzquarks sind die drei bekannten Hauptquarks. Die Gluonen vermitteln zwischen ihnen die starke Wechselwirkung. Die überschüssigen Quarks und Antiquarks rühren

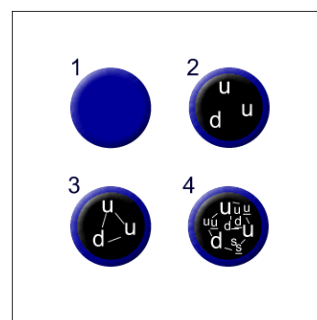


Abb. 25: Im Laufe der Zeit wurde die Struktur der Protonen immer komplexer. Galten sie zunächst noch als unteilbar (1), entdeckte man in den 1960er Jahren die Quarks (2), die über Gluonen zusammengehalten werden (3). Heute macht das komplexe Wechselspiel dieser Bestandteile das Proton noch immer zu einem Forschungsobjekt voller Fragen (4).

²³ Bildunterschrift zitiert nach <http://www.weltderphysik.de/de/3724.php>?¹ eingesehen am 08.12.2010

daher, dass immer ein Teil der im Proton vorhandenen Gluonen in Form des Quark-Antiquark-Paares existiert. Noch mehr über die Unterstruktur des Protons zu erfahren, ist Gegenstand aktueller Forschungen.

1.10.6. Kosmische Strahlung

Im Weltall gibt es quasi riesige Teilchenbeschleuniger. In Sternen werden verschiedene Teilchen durch verschiedene Prozesse auf äußerst hohe Energien beschleunigt. Unsere Erde wird jede Sekunde von einem Teilchenstrom getroffen, viele davon stammen aus dem Sonnenwind. Wenn sie in die Erdatmosphäre eintreten, kommt es in den oberen Schichten der Atmosphäre zu verschiedenen Reaktionen. Treffen Teilchen der kosmischen Strahlung auf Moleküle der Atmosphäre, kommt es z. B. zu Zertrümmungen (siehe Abb. 26). Dabei entstehen sogenannte Teilchenlawinen. Die hochenergetischen Teilchen übertragen beim Zerfall ihre Energie nach dem Energieerhaltungssatz an die neu entstehenden Teilchen, welche dann noch relativ viel Energie besitzen und wiederum zerfallen, sodass eben eine Lawine von Zerfallsprozessen entsteht, die allein auf die hohe Energie der ankommenden Teilchen aus dem All zurückzuführen ist. Auf Höhe der Erdoberfläche kommen dann neben einer großen Anzahl nur schwach wechselwirkender Neutrinos nur noch Myonen an. Um die Teilchen aus den kosmischen Weiten und deren Reaktionen aber trotzdem untersuchen zu können, ging man denen dann entgegen: Auf hohen Bergen und in Ballons, die man zuvor in die oberen Gebiete der Atmosphäre entsandt hatte, wurden mit Blasen- und Nebelkammern die Spuren der ankommenden und entstehenden Teilchen registriert.

Die Spuren wurden später im Labor ausgewertet. In dieser Zeit wurden viele neue Teilchen entdeckt, die dann später mit dem Standardmodell eine Ordnung erfuhren.

Da die kosmische Strahlung immer noch die Teilchen mit den höchsten Energien beinhaltet, wäre es natürlich ein Traum der Physiker, einfach diese Teilchen für die Experimente zu benutzen. Neben der Tatsache, dass sich das ingenieurstechnisch wohl kaum realisieren lässt, mindert auch der Umstand, dass diese Reaktionen rein zufällig und nicht geregelt stattfinden, die Attraktivität dieser Idee.

Trotzdem gibt es aber einige Experimente mit kosmischer Strahlung. So wird bei „IceCube“ am Südpol der kosmische Neutrinostrom erforscht.

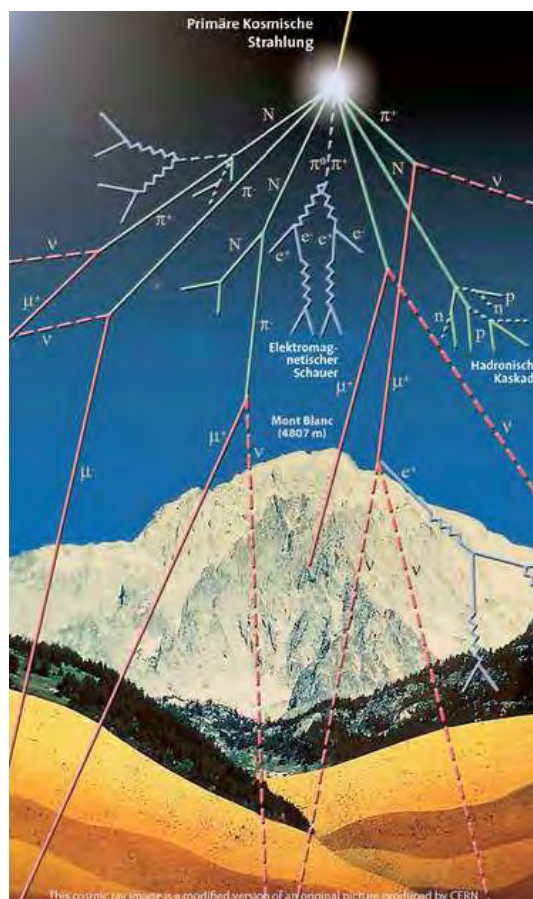


Abb. 26: Einige Zerfallsmechanismen eintreffender kosmischer Strahlung. Die aus dem All kommende Strahlung ist die primäre kosmische Strahlung, wobei die auf der Erde ankommenden Teilchen, die aus Zertrümmungen entstehen, sekundäre kosmische Strahlung heißen.

2. Wissenschaftstheorie

Wissenschaftstheorie ist ein Teilgebiet der Philosophie und ist von Naturwissenschaftlern und Philosophen geprägt worden.

2.1. Begriffe Theorie, Experiment, Modell²⁴

Theorie

Eine Theorie ist eine systematisch geordnete, strukturierte, in sich widerspruchsfreie Zusammenfassung von zumeist gesetzesartigen Aussagen über einen bestimmten Gegenstandsbereich.

Theorien lassen sich nie abschließend verifizieren, sondern nur falsifizieren. Eine Theorie gilt solange als wahr, wie die Ergebnisse von Experimenten dieser nicht widersprechen. Sollten sie dies aber tun, so gilt die Theorie als falsch. Sie muss modifiziert werden, um erneut als wahr zu gelten. Manchmal ist dies aber nicht mehr möglich, dann muss sie komplett verworfen werden.

Dann gibt es noch Theorien, die keine experimentelle Beobachtung zulassen. Damit lassen sie sich zwar nicht falsifizieren, aber der Nutzen einer Theorie, die zwar Erklärungen, aber keine überprüfbaren Vorhersagen liefert, ist fragwürdig. Dies gilt z. B. für die sehr aktuelle String-Theorie, die gerne als die Weltformel gefeiert wird, aber bei genauerem Hinsehen diesem Anspruch zumindest solange nicht genügen kann, solange sie keine möglichen Bestätigungen zulässt.

Experiment

Im Experiment stellt der Physiker eine gezielte Frage an die Natur. Ein Experiment ist nicht nur bloße Beobachtung allein, wie sie etwa der Biologe vielfach zum Ausgangspunkt seiner Wissenschaft nimmt. Experimente vereinfachen die vorhandene Natur in bestimmter Weise und zielen bewusst nur auf einen Ausschnitt der „Wirklichkeit“ ab. Insofern haftet Ihnen etwas Theoretisches an.

Die Vorstellung von der überragenden Bedeutung objektiver Experimente für die Naturwissenschaften entstand in der Renaissance. Damals vollzog sich der bedeutende Schritt weg von der historisch belegten Autoritätenmeinung als Grundpfeiler der Wissenschaft.

Das entscheidende Kriterium für ein Experiment und für das mit ihm neu gefundene Phänomen ist deren Reproduzierbarkeit. Das Experiment mit seinem Ergebnis muss so beschrieben sein, dass es auch an anderer Stelle wiederholbar, reproduzierbar, ist; seine Durchführung muss kontrollierbar sein.

Modell

Modelle sind (im Allgemeinen auf einen Bereich beschränkte) Vorstellungshilfen, sie sind Wirklichkeitskonstruktionen, die eine Theorie exakt erfüllen. Diese Wirklichkeitskonstruktionen sind aber nicht die Wirklichkeit selbst.

²⁴ Dieses sowie das nächste Unterkapitel orientieren sich stark an folgenden Quellen, teilweise sind auch Formulierungen wörtlich übernommen: Grehn, Krause (2007): Metzler, S.106, 107, 562, 563 und Waloschek (1996): Besuch im Teilchenzoo, S. 40, 43, 44, 45 sowie Hering (2007): Wie Wissenschaft ihr Wissen schafft, S. 35

In der Physik werden Theorien aus Denkvorstellungen, sogenannten Modellen entwickelt, deren Eigenschaften einer genauen mathematischen Analyse zugänglich sind. Je nach dem Sachverhalt, der untersucht werden soll, wird ein mehr oder weniger umfangreiches Modell herangezogen. Beispielhaft wird der freie Fall am einfachsten mit dem Modell des Massenpunktes beschrieben; sobald der Luftwiderstand berücksichtigt werden soll, wird statt des Massenpunktes das Modell des starren Körpers verwendet; das Auftreffen auf eine elastische Fläche würde mit dem Modell des deformierbaren Körpers untersucht werden.

Modelle werden aus Gründen der Vereinfachung (bei Interferenz und Beugung wird im Wellenmodell die Polarisation weggelassen) oder zur didaktischen Veranschaulichung (Bohr'sches Atommodell als ein auf klassischen Vorstellungen beruhendes Bild für anschaulich nicht zugängliche Phänomene) oder als Analogiebetrachtung (Strom von Ladungen im Vergleich zu Wasserströmen) aufgestellt.

2.2. Wissenschaftstheoretische Grundlagen

Naturwissenschaftliche Erkenntnisse beruhen auf einem Wechselspiel aus Theorie und Experiment.

Die Physik ist eine theoriegeleitete experimentelle Wissenschaft.

Galilei (1564-1642) ist mit seiner naturwissenschaftlichen Methode Begründer der modernen Naturwissenschaft:

- Der Naturvorgang wird aus seinem natürlichen Zusammenhang gelöst und von allen störenden Einflüssen getrennt betrachtet.
- Es werden Vermutungen (= Hypothesen) aufgestellt und mathematisch formuliert, wobei das Prinzip möglichst großer Einfachheit gilt.
- Die Hypothesen werden im Experiment überprüft, und zwar so, dass dies von jedermann wiederholt und nachvollzogen werden kann.
- Aus den Ergebnissen des Experimentes werden Schlussfolgerungen für die Theorie gezogen.

Newton (1643-1727) griff die Gedanken von Galilei auf und erhob die Physik dadurch in den Rang einer exakten Wissenschaft, dass er die Konzepte der Mechanik in die Sprache der Mathematik übersetzte. Die möglichst elegante mathematische Formulierung steht bei jeder Theoriebildung als Ziel.

Naturgesetze können nicht im Sinne der Mathematik bewiesen werden.

Jedes Gesetz (und jede Theorie) hat einen Gültigkeitsbereich und eventuell sogar Randbedingungen, innerhalb derer es anwendbar ist. Die Tatsache, dass ein Gesetz außerhalb dieses Bereiches nicht anwendbar oder sogar falsch ist, beinhaltet also nicht, dass es deshalb als absolut falsch zu betrachten ist.

Was man in den Naturwissenschaften als wahr oder gültig betrachtet, entspricht nicht dem Begriff des absolut Wahren oder Falschen, wie man ihn oft in der Logik definiert.

Naturwissenschaftliche Wahrheit ist das, was durch Experimente fortdauernd bewiesen und bestätigt wird. Sie ist ein objektiv verifizierbares Gefüge von Tatsachen, die sich gegenseitig stützen und ergänzen. Sie ist nicht gleichzusetzen mit der absoluten Wahrheit, mit der sich Logik und Philosophie beschäftigen.

Die Modelle der Naturwissenschaft sind in keiner Weise als Abbildungen der Realität aufzufassen. Ein Modell dient zur Beschränkung der Untersuchung auf jeweils als wesentlich betrachtete Phänomene.

Aussagen darüber zu treffen, was die Wirklichkeit eigentlich ist, obliegt nicht der Naturwissenschaft. Sie kann nur die messbare Realität beschreiben. Die Physik beschäftigt sich dabei mit der gesamten materiellen Welt, die Massen, Energien, Kräften, Umwandlungen, Raum und Zeit umfasst. Ihr Ziel ist es, die Erscheinungen der materiellen Welt elegant und korrekt zu beschreiben, mit möglichst wenig Eingaben, Grundbegriffen, Annahmen, oder Hypothesen. Zu den Eingaben zählen z. B. Naturkonstanten, Massen und Stärke von Kräften. Gesucht wird eine einheitliche Theorie, die die Grundlage der anderen Naturwissenschaften bildet. In diesem Zusammenhang wird auch oft von der Weltformel gesprochen, mithilfe derer man verstehen kann, „was die Welt im Innersten zusammenhält“. Wann und ob sie überhaupt je gefunden wird oder werden kann, ist unbekannt.

Nun ist es so, dass in der Wissensvermittlung vornehmlich diese Modelle vermittelt werden würden. Allerdings sind sie in sehr komplizierten mathematischen Strukturen definiert, für deren Verständnis der Kenntnisstand eines Schülers oder eines Studenten noch nicht ausreicht. In der Didaktik wird daher versucht, die grundlegenden gedanklichen Muster der Modelle analogienhaft darzustellen. Dabei wird – im wahrsten Sinne des Wortes – ein (didaktisch sinnvolles) Modell für das (fachwissenschaftliche) Modell gefunden. In diesem Buch ist ein Beispiel hierfür die Erklärung des Streuexperimentes mit der Analogie, im Urwald mit verschiedenen Projektilen den Inhalt des am Baum hängenden Sacks zu erforschen. Dies ist natürlich eine starke Vereinfachung dessen, was an physikalischen Prozessen bei der Kollision zweier Teilchen passiert (z. B.: Elektronen haben im Gegensatz zu Nüssen keine Ausdehnung), zeigt aber den zugrunde liegenden Gedanken. Der sich daraus ergebenden Einschränkungen sollte man sich aber stets bewusst sein.

Bei der Formulierung neuer Naturgesetze aufgrund neuer experimenteller Ergebnisse und neuer theoretischer Einsichten spielt die Konsensbildung innerhalb der Physikergemeinschaft eine wesentliche Rolle.

Die Übernahme einer Entdeckung als gültiges Gesetz setzt voraus, dass die Gruppe der damit in aller Welt beschäftigten Physiker das veröffentlichte Ergebnis als neues Phänomen anerkennt. Dies ist das Konsensprinzip der Naturwissenschaft. Erst die allgemeine Akzeptanz macht den wissenschaftlichen Fortschritt aus. Dabei entstehen natürlich auch Kontroversen. Wären sich alle Physiker immer einig, so gäbe es keinen wissenschaftlichen Fortschritt. Das Konsensprinzip beansprucht eine gewisse Zeitdauer. Zunächst muss das Experiment erst einmal nachvollzogen werden, allein dieser Schritt beansprucht schon eine gewisse Zeit. Ergebnisse eines Experimentes werden ebenfalls nicht von heute auf morgen anerkannt – vor allem, wenn Experimente gegensätzliche Ergebnisse hervorbringen. Die Akzeptanz neuer Theorien beträgt Jahre bis Jahrzehnte.

2.3. Paradigmenwechsel²⁵

Werden die bisherigen Grundlagen der Naturwissenschaft von einer Entdeckung erschüttert, wobei die Entdeckung wiederholt gemacht wurde und nicht mehr auf Fehler zurückführbar ist und von der

²⁵ Dieses Unterkapitel orientiert sich stark an folgender Quellen, teilweise sind auch Formulierungen wörtlich übernommen: Hering (2007): Wie Wissenschaft ihr Wissen schafft, S. 21, 78

forschenden Gemeinschaft anerkannt wurde, so muss ein großer Teil der bisherigen Erkenntnisse umgedeutet werden - ein solcher Vorgang heißt Paradigmenwechsel. In der Physik zählt dazu die kopernikanische Wende mit ihrer Abkehr vom geozentrischen Weltbild des Aristoteles. Newton vereinigte die Kräfte, die den Apfel auf die Erde fallen lassen und den Mond auf seiner Umlaufbahn halten. Faraday und Maxwell zeigten, dass Elektrizität, Magnetismus und Licht der gleichen Wurzel, dem Elektromagnetismus, entstammen. Einstein beendet die Absolutheit von Raum und Zeit. Der letzte Paradigmenwechsel war die Entdeckung der Quantentheorie.

Niemand kann behaupten, ob und wann der nächste Paradigmenwechsel kommt. Fest steht nur, dass die Physik kein statisches Gebäude von Lehrmeinungen, sondern eine dynamische Wissenschaft ist, die sich schon früher oft völlig neuen Erkenntnissen anpassen musste. Kein physikalisches Gesetz kann für sich den Anspruch erheben, absolut und ewig gültig zu sein.

2.4. Das Zusammenwirken von Theorie und Experiment in der (modernen) Teilchenphysik²⁶

Seit dem Standardmodell laufen Theorie und Praxis immer weiter auseinander. Bis dahin gingen beide noch einigermaßen Hand in Hand bzw. die Theorie musste eher nach Erklärungen für die Experimente suchen. Jetzt bestätigen die Experimente eher die Theorien, die diesen inzwischen weit vorausseilen. Higgs-Boson und Supersymmetrie sind Beispiele für theoretische Vorhersagen, die der LHC zu bestätigen versucht. Außerdem decken einige Theorien Energiebereiche ab, die von Experimenten zumindest in naher Zukunft nie abgedeckt werden können. Wenn deren Vorhersagen für den erreichbaren Energiebereich am Beschleuniger bestätigt werden, so erhöht sich die Wahrscheinlichkeit dafür, dass sie auch in den höheren Energiebereichen stimmen.

2.5. Simulationen

Mit dem immer größer werdenden Aufwand für Experimente im klassischen Sinne werden Simulationen in der Teilchenphysik immer beliebter. Simulationen bilden eine Verbindung zwischen Theorie und Experiment. Dabei muss die Formulierung der Fragestellung genau überlegt werden, denn diese muss experimentell nachweisbar sein. Ist klar, wonach gesucht werden soll, so wird mithilfe des Computers eine Simulation durchgeführt.

Simulationen sind nicht nur ressourcenschonend, sie ermöglichen auch dadurch erst den wissenschaftlichen Fortschritt: wenn für einen neuen Beschleuniger z. B. die optimale Auswahl der Magnete untersucht werden soll, so wäre es fatal – sowohl aus finanzieller als auch aus zeitlicher Sicht – eine Vielzahl von Magneten bauen zu lassen und dann mit diesen wirkliche Testläufe zu starten. Effizienter ist die Nutzung eines leistungsfähigen Computers, der den Vorgang simuliert.

Vor allem aber werden Simulationen für Detektoren durchgeführt. Im Simulationsprogramm sind die betreffenden Teilchen und deren Reaktionsmechanismen einbeschrieben sowie der Aufbau des Detektors. Simuliert werden mit diesen Daten der Zusammenstoß im Strahlrohr, die dort ablaufenden Reaktionen und Streuungen und die anschließenden Flugbahnen. Dabei wird geschaut, welche Teilchen in welchen Detektorkomponenten Spuren hinterlassen. Die so erzeugte ideale

²⁶ zu den Informationen dieses Unterkapitels vgl. Bobrovskyi (2009)

Verteilung wird dann im Nachhinein mit den gemessenen Daten verglichen. Dadurch lassen sich verschiedene Rückschlüsse ziehen.

Simulationen werden heute in allen Bereichen der teilchenphysikalischen Forschung genutzt und sind ein unverzichtbares Handwerkszeug für die Physiker geworden.

2.6. Grundlagenforschung in der Kontroverse

Grundlagenforschung hat in der heutigen Zeit das Problem, den dafür notwendigen enormen finanziellen Aufwand mit zunächst keinem erkennbaren wirtschaftlichen Nutzen rechtfertigen zu können. Heutzutage ist nämlich die Tatsache, dass dadurch der Wissensschatz der Menschheit erhöht wird, in Anbetracht der hohen Kosten kein ausreichendes Argument mehr. Aber aus neuen grundlegenden Erkenntnissen lassen sich natürlich auch neue Impulse für technische Entwicklungen ableiten. Das Wissen aus der Grundlagenforschung wird somit für neue Erkenntnisse in anderen Naturwissenschaften und als Fundament für neue Technologien verwendet. Die ersten Fernseher entstanden auch nur deshalb, weil sich früher Forscher mit elektrischen Ladungen und deren Verhalten in magnetischen Feldern beschäftigt haben, ohne dabei zu wissen, wofür die Erkenntnisse aus ihrer Arbeit später gut sein würden. Im Grunde beruht unsere gesamte technische Zivilisation aus Erkenntnissen, die die Physiker zutage förderten in ihrem bloßen Ziel, die Welt ein bisschen besser zu verstehen.

„Die moderne Großforschung hat zu einer Wechselwirkung zwischen reiner Forschung und Anwendungen, häufig spin-off genannt, und zu Techniken geführt, die zunächst für die Forschung entwickelt und dann ihres großen Erfolges wegen in die allgemeine Technologie übernommen wurden. So sind zahlreiche Verfahren, vom modernen Tunnelbau über die Magnettechnologie bis zur Elektronik und Datenverarbeitung, aus Großprojekten der Grundlagenforschung entstanden. [Beispielsweise wurde das Internet am CERN von Wissenschaftlern entwickelt, die ihre Daten vom CERN zu einem anderen Labor schicken wollten.] So etwas kann natürlich niemand am Beginn einer wissenschaftlichen Untersuchung vorhersehen.“²⁷

Weitere Beispiele, konkret von der Teilchenphysik befördert, umfassen Tieftemperaturtechnik, Supraleitung, Vakuumtechnik, Mikroelektronik und Bauingenieurwesen. Synchrotronstrahlung und Neutronenstrahlung bilden die Basis für Grundlagenforschung in vielen anderen Wissenschaftsgebieten. Die Materialwissenschaft benutzt die neuen Erkenntnisse über das Verhalten und die Eigenschaften von Strahlung zur zerstörungsfreien Untersuchung von Materialien, in der Medizin dienen sie der Diagnose und Therapie von Krankheiten, z. B. in der Tumorbehandlung.

Die nächsten drei Abbildungen zeigen, welche Technologien aus dem ATLAS-Projekt am LHC (siehe Kapitel LHC) entstanden sind.

²⁷ zitiert nach Hering (2007): Wie Wissenschaft ihr Wissen schafft, S. 14

Medizin

Neue winzige elektronische Silizium Chips wurden für den ATLAS Detektor entworfen, um die Spuren von Elementarteilchen in unmittelbarer Nähe des Kollisionspunktes der beiden Protonenstrahlen des LHC zu verfolgen. Diese Pixel-Halbleiterdetektoren zeichnen sich durch hohe Nachweiseffizienz und geringes Rauschen aus. Sie eignen sich daher in besonderer Weise auch für Röntgenuntersuchungen in der Radiologie, für Strukturuntersuchungen von Proteinen und für Anwendungen in den Materialwissenschaften. Selbst einzelne Photonen sind über einen weiten Energiebereich mit genauer Ortsbestimmung bei extrem kurzer Messdauer nachweisbar.

Pixelmatrix
bestehend aus
18 x 160 Pixelzellen.
Rechts ein
Streichholzkopf zum
Größenvergleich.



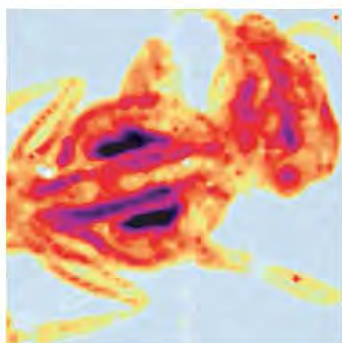
3D Abbildung eines Mäuseskeletts
mit PIXSCAN



Retina eines Salamanders auf einer
Schaltmatrix mit 512 Elektroden

Digitales Röntgen

Die innersten Bereiche des ATLAS Experiments bestehen aus Silizium-Pixeldetektoren. Nahezu 100 Millionen Detektorzellen, mit individuellen Verstärkern versehen, markieren exakt die Spuren der geladenen Elementarteilchen, die bei den Proton-Proton Kollisionen entstehen. Die gleichen Pixeldetektoren eignen sich für biomedizinische Bildgebungsverfahren, wenn hohe räumliche Auflösung erforderlich ist, zum Beispiel in der Mammographie. Dabei wird in jede Pixelzelle ein Zähler integriert, der die einzelnen absorbierten Röntgenquanten registriert. So erhält man ein digitales Röntgenbild der absorbierten Strahlung. Die Aufnahme entsteht in Echtzeit, eine Entwicklung von Röntgenfotos ist nicht mehr erforderlich. Detektormodule aus solchen Multi Picture Element Counters (MPECs), entstanden aus einer geringen Modifikation des ATLAS Pixeldetektors, ermöglichen somit digitale Röntgenaufnahmen.



Digitale Röntgenaufnahme einer
Hornisse

Computer- tomographie

PIXSCAN ist eine neue Methode für die Computertomographie. Dabei wird der XPAD Chip eingesetzt, ein Photonen zählender Detektor auf der Basis des ATLAS Pixel-Chips. Durch PIXSCAN erhöht sich der Kontrast bei der Abbildung von Gewebe, wobei 400 Aufnahmen in zwei Sekunden möglich sind. Ein Prototyp zur Untersuchung kleiner Tiere wurde bereits entwickelt. Wegen der winzigen Organe ist eine besonders hohe räumliche Auflösung nötig. Erste Computertomographien belegen die Qualität der neuen Technik. Der extrem dünne Detektor kann in Positronen-Emissions-Tomographen (PET) eingebaut werden. Hierbei bildet der PET das Tumorgewebe ab, durch PIXSCAN wird die Lage des Tumors im Organ sichtbar.



Ausschnitt aus der Schaltmatrix
mit 512 Elektroden

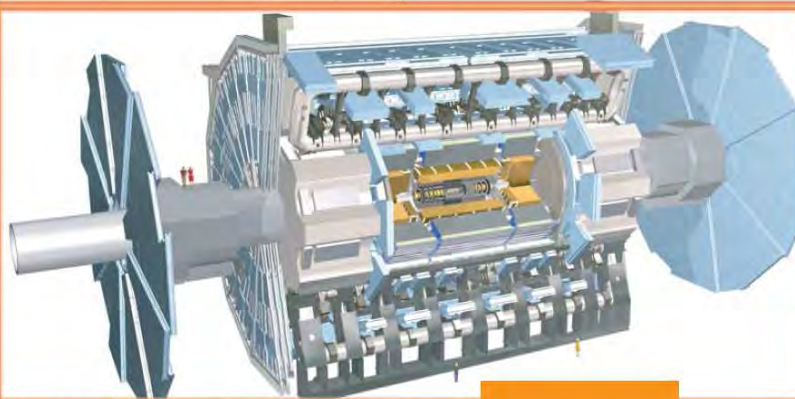
Retina Projekt

Gemeinsam mit Neurobiologen haben ATLAS Physiker untersucht, wie das Auge Informationen zum Gehirn übermittelt. Die Retina wirkt dabei wie ein hoch entwickelter Pixeldetektor, der die Bildinformationen in Form von codierten elektrischen Nervenimpulsen, so genannten "Spikes", zum Sehzentrum des Gehirns sendet. Um die Kodierung dieser Spikes zu entschlüsseln, wird lebendes Retinagewebe untersucht und dessen Nervenaktivität aufgezeichnet. Eine besonders präzise und großräumige Aufzeichnung gelingt mit der Technologie des ATLAS Siliziumstreifen Detektors. Solche Experimente helfen Neurobiologen zu verstehen, wie unser Nervensystem Informationen verarbeitet und verschlüsselt, was eines Tages zu künstlichen Sehhilfen für Blinde führen könnte.

Abb. 27: Technologietransfer aus dem ATLAS-Projekt für Medizin.

Technik

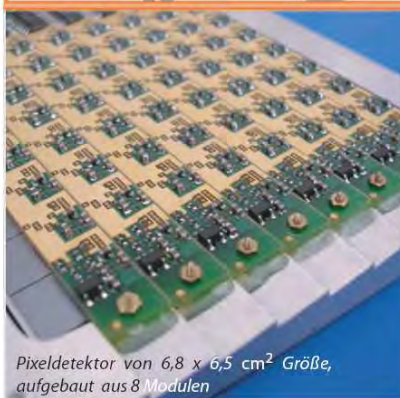
Alle Detektorteile des ATLAS Experiments sind hoch entwickelte Geräte, deren Technologie und Leistungsanforderungen oft über das vorhandene industrielle Know-how hinausgehen. Neue Technologien, die zunächst für die Grundlagenforschung der Teilchenphysik erarbeitet wurden, finden anschließend vielfältige Anwendung in anderen Bereichen.



Schematische Darstellung des ATLAS Detektors



Der ATLAS Detektor hat etwa die Größe eines fünfstöckigen Gebäudes



Pixeldetektor von $6,8 \times 6,5 \text{ cm}^2$ Größe, aufgebaut aus 8 Modulen

Detektoren für Materialforschung

XPIX ist ein neuartiger Röntgendetektor, bei dem der für das ATLAS Experiment speziell entwickelte XPAD Chip eingesetzt wird. Dieser Detektor eignet sich besonders für die Forschung mit Synchrotronstrahlung aus hochintensiven Strahlungsquellen, wie sie heute zur Erforschung von Eiweißstrukturen und in der Kristallographie verwendet wird. Ein Prototyp mit einer Fläche von $6 \times 6 \text{ cm}^2$ ist schon bei der europäischen Strahlungsquelle ESRF in Grenoble im Gebrauch. Die ersten Experimente zeigen eine deutlich verbesserte Bildqualität. Gleichzeitig konnte die Bestrahlungszeit und somit auch die Beschädigung des untersuchten Materials erheblich reduziert werden.

Gasanalyse mit Ultraschall

Für das ATLAS Experiment wurde eine Ultraschall-Analysetechnik entwickelt, um die Zusammensetzung der Fluorkohlendampf zu kontrollieren, die den inneren Detektor kühlen. Das gleiche Verfahren dient jetzt in der industriellen Halbleiterproduktion dazu, den Anteil schwerer Elemente in der Gasphase zu regeln. Die Zusammensetzung der Gase wird dabei mit einer Präzision von einem in 100 000 Gasatomen gemessen. Eine Testanwendung in der klinischen Anästhesie ergab, dass sich mit dieser Methode die Zusammensetzung typischer Anästhesiemixturen mit hoher Genauigkeit bestimmen lässt. In Ölraffinerien wird diese Technik zur Analyse von Kohlenwasserstoffen eingesetzt.

Lokalisierung von Personen

Um bei einem Unfall in der ATLAS Experimentierhalle gefährdete oder verletzte Personen zu lokalisieren, wurde ein spezielles System entwickelt.

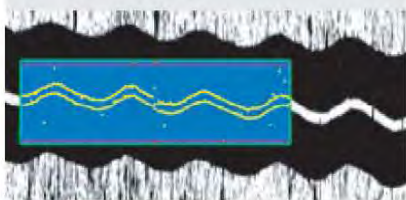
Eine Vielzahl von in der Detektorhalle installierten Infrarotsensoren ermöglicht es den Mitarbeitern im Kontrollraum, den Bewegungen sämtlicher Personen in der Halle zu folgen. Ein ähnliches System kann kostengünstig überall dort eingesetzt werden, wo Personen schwer aufzufinden sind, etwa in Minen. In Notfällen, speziell wenn Nebel oder Rauch die Sicht behindert, werden Rettungsteams über dieses System zu den gefährdeten Personen geführt.

Abb. 28: Technologietransfer aus dem ATLAS-Projekt für Technik.

Kultur

Elementarteilchenphysiker und Kosmologen erforschen, wie sich die fundamentalen Bausteine der Materie verhalten, wie unser Universum begann, und wie es sich zu dem entwickelt hat, was wir heute beobachten. Das Bestreben, die Grenzen unseres Wissens zu erweitern und nach den Ursprüngen zu suchen, ist Teil unseres Wesens und unserer Kultur. Über die ATLAS Webseite und verschiedene Formen von Informationsmaterial, darunter Liveübertragungen und Demonstrationsfilme, lassen die Forscher des ATLAS Experiments die Öffentlichkeit uneingeschränkt an den Ideen und Erkenntnissen dieser modernen Forschung teilhaben.

Optische Verfahren ermöglichen die Rekonstruktion von alten Schallplattenaufnahmen



Durch das LHC Computing Grid können weltweit verteilte Rechner- und Speicherkapazitäten für die Datenauswertung genutzt werden



Montage des Silizium-Spurdetektors, bestehend aus 16 000 einzelnen Siliziumdetektoren mit insgesamt 6,3 Millionen Auslesekanälen, die in 4 088 Modulen angeordnet sind.



Reproduktion von Tonträgern

Mit Hilfe von präzisen Verfahren der Bildverarbeitung justieren die Forscher beim ATLAS Experiment die 16 000 Siliziumdetektoren für die Rekonstruktion der Teilchenspuren. Mit dem gleichen Verfahren lassen sich auch die Rillen mechanischer Tonträger, wie Schallplatten oder Zylinder, exakt ausmessen. Um aus der Form der Rillen die akustischen Informationen zu extrahieren, finden Datenreduktionsverfahren und Angleichungsstrategien Anwendung, wie sie auch zur Rekonstruktion von Teilchenbahnen im ATLAS Detektor genutzt werden. So konnten Aufnahmen mit hoher Wiedergabequalität und geringem Rauschen reproduziert werden. *Da das Verfahren ohne Kontakt zu den Oberflächen arbeitet, ist es auch für empfindliche oder beschädigte Tonträger und historische Aufnahmen geeignet.* Diese Technologie wird derzeit für die Anwendung in großen Tonarchiven und Sammlungen weiterentwickelt.

Grid Computer- vernetzung

ATLAS und die anderen LHC Experimente produzieren jährlich mehrere Millionen Gigabyte an Daten. Um die Messergebnisse zu speichern und den über 5 000 beteiligten Wissenschaftlern auf allen Kontinenten zur Verarbeitung zugänglich zu machen, entsteht ein globales Computernetz (Grid). Zwischen einigen großen Regionalen Rechenzentren, wie dem GridKa am Forschungszentrum Karlsruhe, und mehreren hundert weiteren Standorten, die alle über Hochgeschwindigkeitsleitungen vernetzt sind, wird eine automatische Daten- und Lastverteilung vorgenommen. *Das weltweite LHC Computing Grid Projekt (LCG) betreibt das Computernetzwerk für die LHC Experimente in Zusammenarbeit mit anderen bedeutenden Grid Projekten, die – wie die deutsche D-Grid Initiative – Forschung und Wirtschaft verbinden.* Mehr als 20 Anwendungen gibt es bereits 2006, wie z.B. Erdbeobachtung, Klimavorhersagen, Erkundung von Erdölvorkommen und Medikamentenforschung. Mehrere Fachpreise für außerordentliche Innovationen im Hochleistungsrechnen belegen die herausragende Qualität der Grid Initiativen.

Ausbildung

An Instituten in aller Welt beteiligen sich Studenten und Nachwuchswissenschaftler sowie an einigen Orten auch Lehrer und Schüler an Entwicklung, Bau und Test von Teilen des ATLAS Detektors. *Diese Projekte vermitteln Kompetenzen in moderner Laborarbeit, aktueller Forschung, Zusammenarbeit in internationalen Kollaborationen und der Lösung komplexer Probleme.* Eine solche Ausbildung bereitet die Studenten auf ein breites Spektrum von Tätigkeiten in Wissenschaft und Industrie, in Ausbildungsberufen und Verwaltung vor.

Abb. 29: Technologietransfer aus dem ATLAS-Projekt für Kultur.

3. Arbeitswelt

3.1. Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN)²⁸

Das CERN ist ein 1954 gegründeter Rat zur europaweiten Zusammenarbeit bei der Forschung an Kernenergie zur friedlichen zivilen Nutzung und inzwischen das weltweit größte Forschungszentrum für Teilchenphysik. Es befindet sich nahe Genf auf dem Grenzgebiet von Schweiz und Frankreich. Das Gesamtbudget betrug im Jahr 2007 ca. 650 Millionen Euro und setzt sich zusammen aus den Beiträgen der 20 europäischen Mitgliedsstaaten, wobei Deutschland 20% des Budgets bereitstellt und dadurch größter Beitragszahler ist. Trotz der ausschließlich europäischen Finanzierung forschen am CERN Physiker aus aller Welt. Neben 2500 Angestellten in Verwaltung und Forschung besuchen 8000 Gastwissenschaftler aus über 80 Ländern das CERN; insgesamt ist mehr als die Hälfte aller Teilchenphysiker weltweit mit Projekten am CERN beschäftigt.



Abb. 30: Die verschiedenen Flaggen liefern einen Eindruck von der am CERN bestehenden internationalen Atmosphäre.

Auswahl wichtiger Entdeckungen bzw. Entwicklungen:

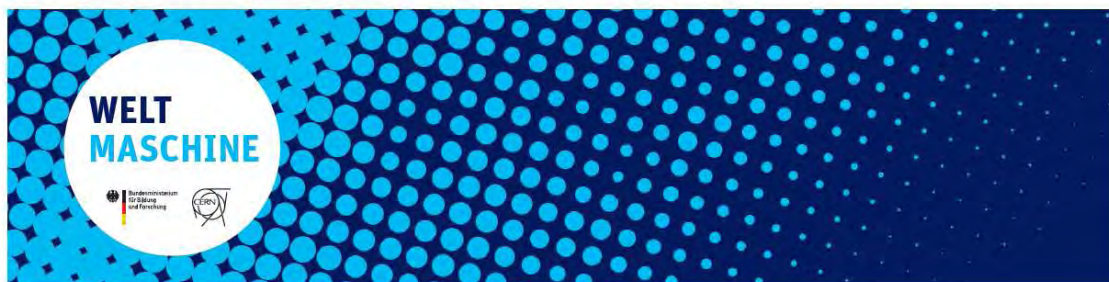
- 1983 Entdeckung der W- und Z-Bosonen
- 1989 Inbetriebnahme vom LEP („Large Electron-Positron Collider“, Untersuchung von Phänomenen im Standard-Modell), Bestätigung, dass es nur drei Arten von Neutrinos existieren
- 1990 Tim Berners-Lee erfindet das World Wide Web zur Verteilung der riesigen Datenmengen von den Detektoren
- 1993 erste Hinweise am LEP auf die „CP-Verletzung“, einen Mechanismus, der teilweise das Materie-Antimaterie-Ungleichgewicht erklärt
- 1995 erste irdische Erzeugung eines Antimaterie-Atoms (Anti-Wasserstoff)
- 1999 Baubeginn des LHC
- 2000 Erzeugung von Quark-Gluon-Plasma
- 2002 erste Forschungsergebnisse zu Anti-Wasserstoff
- 2008 Inbetriebnahme LHC

3.2. Large Hadron Collider (LHC) - Die Erkenntnismaschine für die Teilchenphysiker

Der LHC ist der bisher größte und leistungsstärkste Teilchenbeschleuniger, der je gebaut wurde. Er sucht nach dem Higgs-Boson sowie nach „Neuer Physik“ (Phänomene jenseits des Standardmodells) und führt Präzisionsmessungen zum Standardmodell durch. Sein Energiebereich beträgt noch nie erreichte 7 TeV. Er schießt Blei-Ionen oder Protonen aufeinander und wurde im LEP-Tunnel erbaut. Der Baubeginn war 1999, die Inbetriebnahme erfolgte 2008.

²⁸ viele Informationen aus BMBF (2008): Weltmaschine und Kommunikationsgruppe des CERN (2008): CERN

Der LHC besitzt insgesamt 6 Experimente, die auf den folgenden Seiten vorgestellt werden:



ATLAS – der Riese

ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) ist der größte Teilchendetektor, der jemals an einem Beschleuniger gebaut wurde: Er ist etwa so groß wie ein fünfstöckiges Haus. ATLAS wird ein breites Spektrum physikalischer Phänomene erforschen und zum Beispiel nach dem Higgs-Boson, supersymmetrischen Teilchen und nach Extra-Dimensionen suchen.

Hauptmerkmal von ATLAS ist das ringförmige Magnetsystem. Es besteht aus acht 25 Meter langen supraleitenden Magnetspulen, die zylinderförmig um das im Innern liegende Strahlrohr angeordnet sind. So wird ein toroides magnetisches Feld erzeugt, das die in den Kollisionen entstandenen Teilchen ablenkt.

Ähnlich wie eine Digitalkamera verfügt ATLAS über 100 Millionen elektronische Kanäle, die im Gegensatz zur Digitalkamera aber 40 Millionen Mal pro Sekunde ausgelesen werden.

Mehr als 2700 Wissenschaftler von 172 Instituten aus 37 Ländern arbeiten am ATLAS-Experiment. Aus Deutschland sind 15 Institutionen beteiligt.

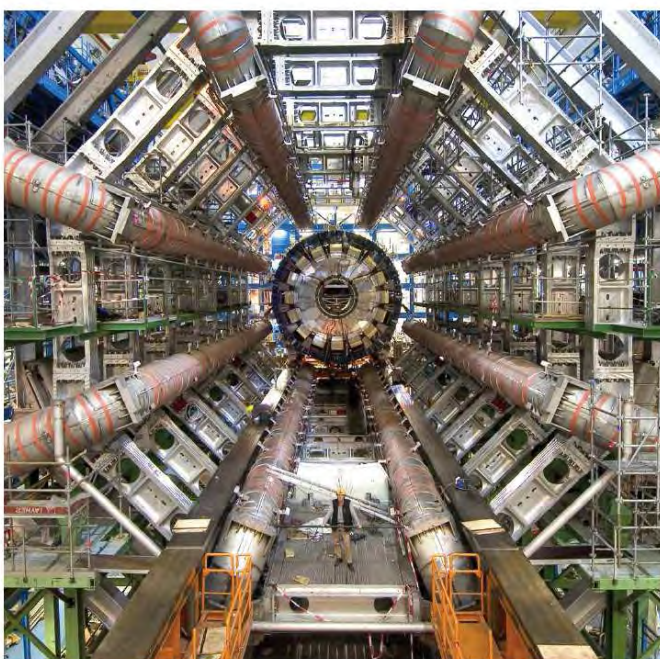


Foto: CERN

Der ATLAS-Detektor auf einen Blick

- Größe: 46 Meter lang, 25 Meter Durchmesser
- Gewicht: 7 000 Tonnen
- Standort: Meyrin, Schweiz
- ATLAS-Kollaboration:
Mehr als 2700 Mitarbeiter aus 37 Ländern

Deutsche Beteiligung an ATLAS

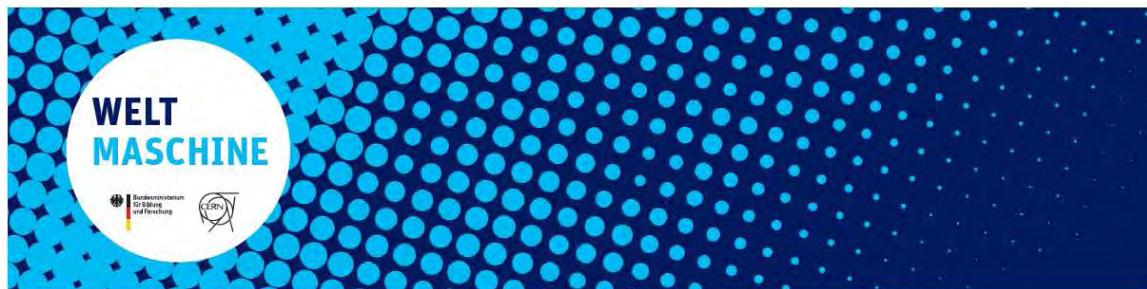
- Beteiligte Institutionen: 15
- Beteiligte Wissenschaftler: etwa 430
- Universitäten Berlin (HU), Bonn, Dortmund, Dresden, Freiburg, Gießen, Göttingen, Heidelberg, Mainz, München (LMU), Siegen, Wuppertal, Würzburg, MPI für Physik München, DESY

Deutsche Beiträge zum ATLAS-Experiment

Trigger, Pixeldetektor, Toroid-Magnet, Flüssig-Argon-Kalorimeter, Myon-Spektrometer, Mikrostreifen-Detektor, Vorwärts-Detektor, Datennahme, Datenanalyse

CERN- / LHC-Kommunikation Deutschland
c/o Deutsches Elektronen-Synchrotron (PR)
www.weltmaschine.de
lhc-kommunikation@desy.de
Stand: Juni 2010

Abb. 31: Steckbrief ATLAS-Detektor.



CMS – der Schwere

CMS (*Compact Muon Solenoid*) ist der schwerste Teilchendetektor, der jemals an einem Beschleuniger gebaut wurde. Wissenschaftler suchen am Multifunktionsdetektor CMS unter anderem Hinweise auf das Higgs-Teilchen, auf Teilchenkandidaten für die Dunkle Materie und auf Extra-Dimensionen.

Im Inneren des CMS-Detektors befindet sich ein großer Solenoidmagnet. Dieser besteht aus einer zylindrischen Spule aus supra-leitendem Kabel und produziert ein Magnetfeld von 4 Tesla. Das ist etwa 100 000 Mal stärker als das Magnetfeld der Erde. Das enorme Gewicht des Detektors von 12 500 Tonnen entsteht vor allem durch das massive Eisenjoch, das das Magnetfeld führt.

Das Besondere an der Montage dieses Detektors war, dass er im Gegensatz zu den anderen Detektoren an der Oberfläche gebaut wurde. Anschließend wurden die 11 Scheiben des Detektors einzeln in die Kaverne heruntergelassen und dort wieder zusammengebaut.

Mehr als 3000 Wissenschaftler arbeiten am CMS-Experiment. Sie kommen von 183 Instituten aus 39 Ländern. Aus Deutschland sind vier Institutionen beteiligt.

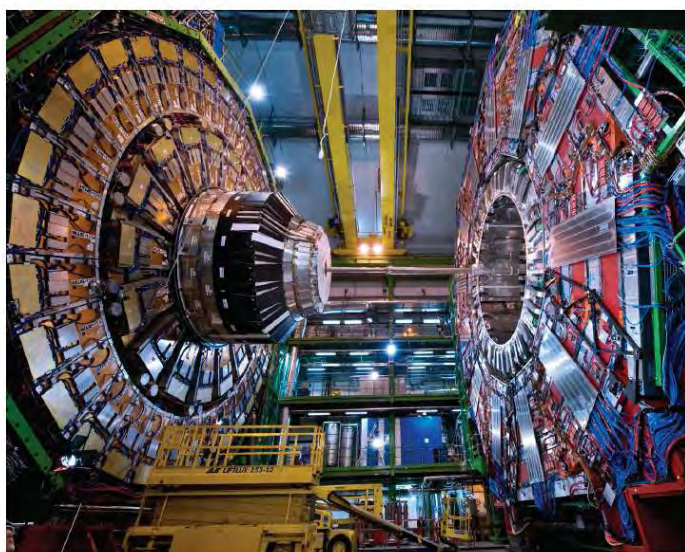


Foto: CERN

Der CMS-Detektor auf einen Blick

- Größe: 21 Meter lang, 15 Meter Durchmesser
- Gewicht: 12 500 Tonnen
- Standort: Cessy, Frankreich
- CMS-Kollaboration:
Mehr als 3000 Mitarbeiter aus 39 Ländern

Deutsche Beteiligung an CMS

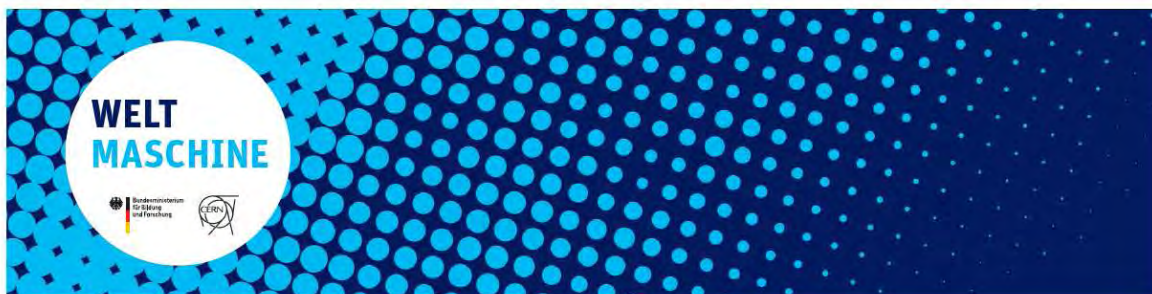
- Beteiligte Institutionen: 4
- Beteiligte Wissenschaftler: etwa 180
- RWTH Aachen, Universität Hamburg, Universität Karlsruhe, DESY

Deutsche Beiträge zum CMS-Experiment

- Endkappen des Spurdetektors, Detektor-Alignment,
- Endkappen des Trackers, Myon-Detektor,
- Datenanalyse

CERN-/LHC-Kommunikation Deutschland
c/o Deutsches Elektronen-Synchrotron (PR)
www.weltmaschine.de
lhc-kommunikation@desy.de
Stand: Juni 2010

Abb. 32: Steckbrief CMS-Detektor.



ALICE – die Plasmaschmiede

Im ALICE-Detektor (*A Large Ion Collider Experiment*) soll die Ursuppe hergestellt und untersucht werden, die in den ersten Augenblicken des Universums existierte. Dafür werden Blei-Ionen zur Kollision gebracht. Wissenschaftler versprechen sich vom ALICE-Detektor Erkenntnisse darüber, wie sich die Teilchen bildeten, aus denen unser Universum heute besteht.

Die Materie im Universum besteht gewöhnlich aus Atomen. Jedes Atom hat einen Kern aus Protonen und Neutronen. Diese wiederum bestehen aus Quarks, die von Gluonen zusammengehalten werden. Wenige Sekunden nach dem Urknall jedoch war das Universum noch extrem heiß und bestand aus einem Quark-Gluon-Plasma, der Ursuppe. Die Wissenschaftler werden mit dem ALICE-Detektor dieses Quark-Gluon-Plasma beobachten.

Der ALICE-Detektor verfügt über 600 Millionen Auslesekanäle. Mit diesen können pro Sekunde 1000 Proton-Proton-Kollisionen ausgelesen werden, wenn man die Kanäle, die kein Signal liefern, ausblendet.



Foto: CERN

Mehr als 1000 Wissenschaftler von 111 Instituten aus 32 Ländern arbeiten zusammen am ALICE-Experiment. Aus Deutschland sind sieben Institutionen beteiligt.

Der ALICE-Detektor auf einen Blick

- Größe: 26 Meter lang, 16 Meter Durchmesser
- Gewicht: 10 000 Tonnen
- Standort: St Genis-Pouilly, Frankreich
- ALICE-Kollaboration:
Mehr als 1000 Mitarbeiter aus 32 Ländern

Deutsche Beteiligung an ALICE

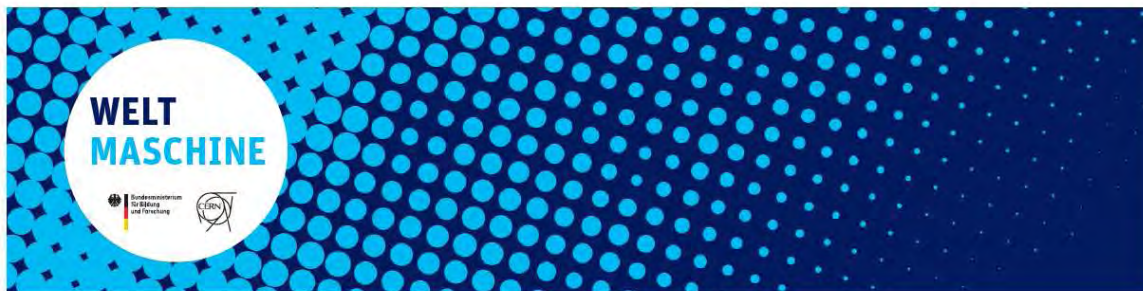
- Beteiligte Institutionen: 7
- Beteiligte Wissenschaftler: etwa 120
- Universitäten Darmstadt, Frankfurt, Heidelberg, Münster, FH Köln, FH Worms, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung

Deutsche Beiträge zum ALICE-Experiment

Zeitprojektionskammer, Übergangsstrahlungsdetektor, Trigger, Datenanalyse

CERN-/LHC-Kommunikation Deutschland
c/o Deutsches Elektronen-Synchrotron (PR)
www.weltmaschine.de
lhc-kommunikation@desy.de
Stand: Juni 2010

Abb. 33: Steckbrief ALICE-Detektor.



LHCb – die Suche nach dem kleinen Unterschied

Das LHCb-Experiment (*Large Hadron Collider beauty*) geht der Frage nach, warum unser Universum hauptsächlich aus Materie und nicht aus Antimaterie besteht, obwohl sie beim Urknall in gleichen Mengen erzeugt wurden. Wissenschaftler untersuchen Prozesse, bei denen Teilchen und Antiteilchen sich unterschiedlich verhalten. Diese kleine Asymmetrie zwischen der Welt der Materie und der Antimaterie ist Voraussetzung dafür, dass unsere Erde existiert.

Der LHCb-Detektor ist ein so genanntes Vorwärts-spektrometer: Seine Subdetektoren sind auf 20 Metern entlang des Strahlrohrs aufgebaut. Diese Geometrie ist auf den Nachweis von B-Mesonen optimiert, die die zu untersuchenden Beauty-Quarks enthalten.

700 Wissenschaftler von 52 Instituten aus 15 Ländern arbeiten gemeinsam am LHCb-Experiment. Aus Deutschland sind drei Institutionen beteiligt.



Foto: CERN

Der LHCb-Detektor auf einen Blick

- Größe: 21 Meter lang, 10 Meter hoch, 13 Meter breit
- Gewicht: 5600 Tonnen
- Standort: Ferney-Voltaire, Frankreich
- LHCb-Kollaboration: mehr als 700 Mitarbeiter aus 15 Ländern

Deutsche Beteiligung an LHCb

- Beteiligte Institutionen: 3
- Beteiligte Wissenschaftler: etwa 50
- TU Dortmund, Universität Heidelberg, MPI für Kernphysik Heidelberg

Deutsche Beiträge zum LHCb-Experiment

- Spurdetektor, Ausleseelektronik, Spurrekonstruktion, Strahlmonitor, Datenanalyse

CERN-/LHC-Kommunikation Deutschland
c/o Deutsches Elektronen-Synchrotron (PR)
www.weltmaschine.de
lhc-kommunikation@desy.de
Stand: Juni 2010

Abb. 34: Steckbrief LHCb-Detektor.

Es gibt noch zwei weitere kleinere Experimente: TOTEM („Total Cross Section, Elastic Scattering and Diffraction Dissociation“) und LHCf („LHC-forward“) untersuchen keine Kollisionen, sondern auftretende Phänomene, die entstehen, wenn sich die Teilchen nur streifen.

Die nächsten beiden Abbildungen 35 und 36 bieten interessante Fakten zum LHC:

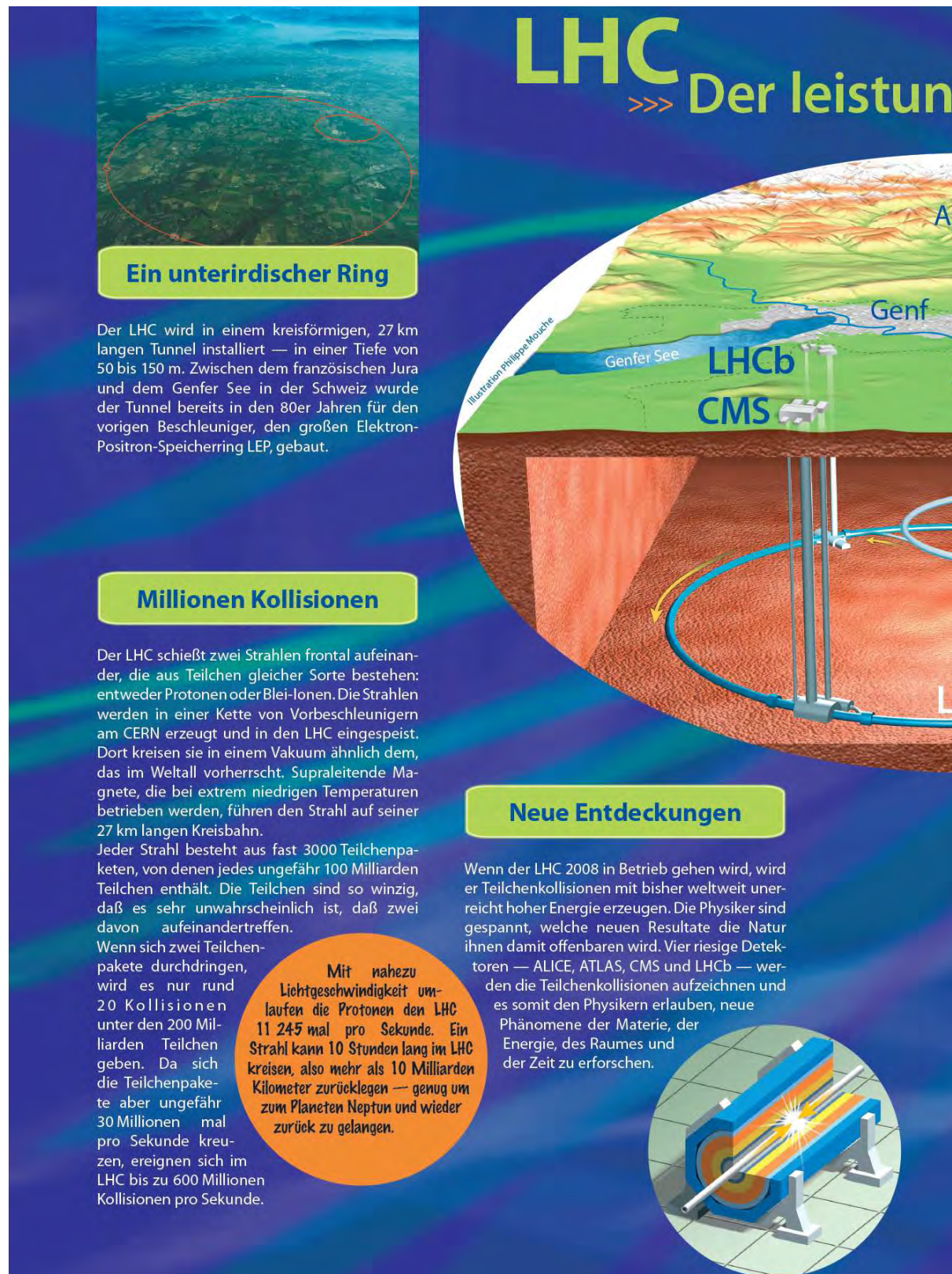
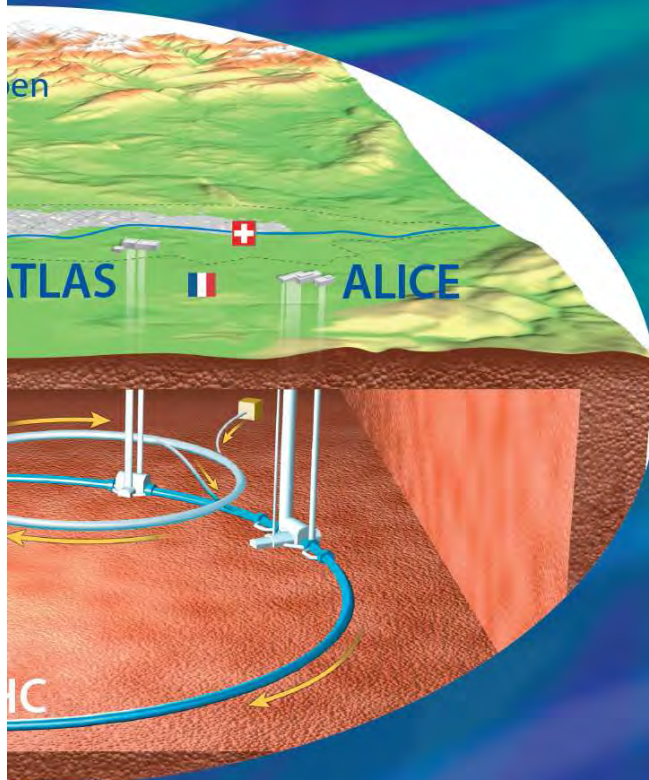


Abb. 35: Fakten zum LHC 1.

gsstärkste Beschleuniger der Welt



Innovative Technologien

Nachdem die Strahlen in der Vorbeschleunigerkette des CERNs eine Energie von 0.45 TeV erreicht haben, werden sie in den LHC-Ring eingespeist, den sie millionenfach umkreisen. Bei jedem Umlauf erhalten die Strahlen in speziellen Kavitäten von einem elektrischen Feld einen zusätzlichen Energieschub, bis sie ihre endgültige Energie von 7 TeV erreicht haben.

Um die Strahlen bei so hohen Energien noch auf ihrer Kreisbahn halten zu können, werden im LHC rund 1800 supraleitende Ablenkmagnete eingesetzt. Diese Elektromagnete bestehen aus supraleitendem Material, das bei tiefen Temperaturen den elektrischen Strom ganz ohne Wider-

Bestünde der LHC aus normalen „warmen“ Magneten anstelle von supraleitenden, dann müßte der Ring einen Umfang von mindestens 120 km haben, um die gleiche Kollisionsenergie zu erreichen – außerdem würde er 40 mal mehr Strom verbrauchen.

Geballte Energie

Der LHC ist eine Maschine um Energie auf sehr kleinem Raum zu konzentrieren. Teilchenenergien werden beim LHC in Tera-Elektronvolt (TeV) angegeben. 1 TeV entspricht ungefähr der Bewegungsenergie einer Mücke; allerdings ist ein Proton ca. eine Billion mal kleiner als eine Mücke.

Ein im LHC kreisendes Proton wird eine Energie von 7 TeV haben, so daß die Energie beim Zusammenstoß zweier Protonen 14 TeV betragen wird. Blei-Ionen enthalten viele Protonen, und haben deswegen im LHC eine noch viel größere Energie. Die Kollisionsenergie zweier Blei-Ionen-Strahlen beträgt 1150 TeV.

Bei voller Energie besitzt jeder Strahl ungefähr soviel Energie wie ein Auto bei 1600 km/h. Die in den Ablenkmagneten gespeicherte Energie wäre genug, um 50 Tonnen Kupfer zu schmelzen.



Widerstand leitet und dadurch viel stärkere Magnetfelder erzeugen kann als normalleitende Elektromagnete. Die LHC-Magnete bestehen aus einer Niob-Titan-Legierung und werden bei einer Temperatur von nur 1.9 K (-271°C) betrieben.

Die Stärke von Magnetfeldern wird in Einheiten von „Tesla“ angegeben. Im LHC werden Magnetfelder von ungefähr 8 Tesla herrschen, wohingegen normalleitende, „warme“ Magnete nur Felder von maximal 2 Tesla erzeugen können.

Abb. 36: Fakten zum LHC 2.

3.3. Deutsches Elektronensynchrotron (DESY)²⁹

Das DESY befindet sich in Hamburg, hat aber eine Außenstelle in Zeuthen (Brandenburg). Gegründet wurde es 1959. Heute hat es drei Forschungsgebiete: Beschleunigertechnik, Photonenforschung, Teilchenphysik. Es ist Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren und „Physik an der Teraskala“. In der Helmholtz-Allianz „Physik an der Teraskala“ haben sich alle



Abb. 37: Das DESY-Gelände in Hamburg.

deutschen Universitäten und Institute zusammengeschlossen, die am LHC mitarbeiten.

Das Gesamtbudget von 192 Millionen Euro wird aus öffentlichen Mitteln finanziert, 90% stammen dabei vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, 10% von der Stadt Hamburg und dem Land Brandenburg. Jährlich besuchen über 3000 Gastwissenschaftler aus mehr als 40 Ländern DESY. 1900 Personen sind angestellt, sowohl in der Verwaltung als auch in der Forschung.

Auswahl wichtiger Entdeckungen

1975	Nachweis der Existenz schwerer Quarks
1987	Hinweis, dass das noch nicht entdeckte Top-Quark sehr massereich ist
1979	Entdeckung des Gluons
1980	Bottom-Quark wird identifiziert
1992-2007	mit HERA: Erkenntnisse zur Unterstruktur des Protons, Nachweis der Vereinigung zur elektroschwachen Kraft bei hohen Energien

Heute hat das DESY keine großen eigenen Projekte in der Teilchenphysik, sondern arbeitet unter Anderem an den LHC-Experimenten ATLAS und CMS mit.

Der Teilchenbeschleuniger HERA, ausführlich „Hadron-Elektron-Ring-Anlage“, war von 1992 bis 2007 am DESY in Hamburg in Betrieb. Die aktive Datennahme ist beendet, die Datenanalyse dauert an. Mithilfe des Beschleunigers HERA werden die Struktur des Protons und die darin wirkenden Kräfte untersucht. Es gab vier Detektoren: H1 und ZEUS als die beiden sich gegenseitig ergänzenden und überprüfenden Universaldetektoren untersuchten Proton-Elektron Kollisionen, HERMES den Spin der Protonen sowie Neutronen und HERA-B schwere Quarks.



Abb. 38: Im HERA-Tunnel.

HERA war der erste Beschleuniger, dessen Bau nicht mehr alleine durch ein Land finanziert wurde, sondern in internationaler Zusammenarbeit entstand. Danach entstand das sogenannte „HERA-Modell“ als Beispiel für die multinationale Arbeit.

²⁹ viele Informationen aus DESY: Forscherwelt

3.4. Das „HERA-Modell“ der internationalen Zusammenarbeit

Das „HERA-Modell“ der internationalen Zusammenarbeit

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

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

Internationale Zusammenarbeit in dieser Form war etwas völlig Neues

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



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

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

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

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

Abb. 39: Das HERA-Modell der internationale Zusammenarbeit 1.

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



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

So wurde der Bau von HERA zum internationalen Großereignis: Insgesamt elf Länder trugen ihren Teil dazu bei. Institute aus Frankreich, Italien, Israel, Kanada, den Niederlanden und den USA lieferten auf eigene Rechnung wesentliche Teile der Anlage oder führten wichtige Tests durch. Großbritannien, Polen, die CSFR, die Schweiz, die Volksrepublik China und deutsche Institute aus der DDR und der Bundesrepublik entsandten Fachkräfte zur Mitarbeit. Zeitweise machte das mit projektgebundenen Zeitverträgen angestellte Personal aus dem Ausland fast die Hälfte der HERA-Mitarbeiter aus. „Das mag eine außergewöhnliche Art und Weise sein, Beschleuniger zu bauen“, meinte Wiik dazu. „Aber es ist gut gegangen, und ich glaube, es war

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

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

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

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

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



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

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

3.5. Arbeitswelt in der theoretischen Teilchenphysik

Die Arbeitsweise in der theoretischen Teilchenphysik unterscheidet sich nicht von anderen theoretischen Wissenschaften, der einzige Unterschied ist die Thematik.

Folgende Auszüge aus einem Interview³⁰ mit dem Theoretiker Prof. Wilfried Buchmüller von DESY geben Einblicke in die Arbeitswelt eines theoretischen Teilchenphysikers.

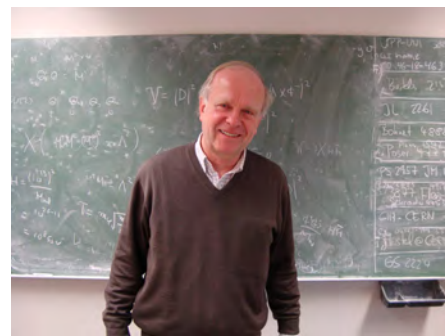


Abb. 41: Prof. Wilfried Buchmüller

Was machen Sie als Theoretiker?

Als theoretischer Teilchenphysiker beschäftigt man sich mit der Struktur der Materie bei kleinsten Abständen, in den letzten Jahren auch mit dem Zusammenhang von der Physik bei kleinsten und bei größten Abständen, d.h. den Zusammenhang von Teilchenphysik und Kosmologie. Als Theoretiker versucht man die Gesetze, die es dabei gibt, in Form von mathematischen Formeln zu beschreiben.

Arbeiten Sie dabei auch mit dem Computer?

Zunächst mal einfach mit Bleistift und Papier, dann kommen kleinere Rechnungen analytischer Art mit analytischen Programmen auf dem Computer, und wenn man dann kompliziertere Dinge ausrechnen muss, macht man auch numerische Rechnungen.

Die Experimentalphysiker machen ihre Experimente an Teilchenbeschleunigern an sehr großen Kollaborationen. Arbeitet man in der Theorie allein?

Als theoretischer Physiker arbeitet man alleine oder zu zweit oder zu dritt, das ist so die Regel. Wenn es hoch kommt, mal zu viert.

Natürlich gibt es Konferenzen, da tauscht man einfach die Ergebnisse aus, zu den verschiedenen Arbeitsgruppen kommen.

Sie arbeiten mit Formeln und beschreiben damit mathematisch das Zusammenspiel von Teilchen auf engstem Raum.

Ja. Nehmen wir mal ein ganz einfaches Beispiel: Das Coulombgesetz – welche Kraft wirkt auf eine elektrische Ladung? Oder das entsprechende Gravitationsgesetz: Welche Kraft wirkt ein Körper aufgrund der Gravitation auf einen anderen aus? Das ist ein Naturgesetz und beschreibt in diesem Fall einfach die Gravitationskraft. Und so gibt es eben andere Kräfte, es gibt elektromagnetische, schwache, starke Kräfte und die genügen alle entsprechenden Naturgesetzen. Da gibt es die Relativitätstheorie, da gibt es das Standardmodell der Teilchenphysik, und das sind letztendlich alles mathematische Strukturen, durch die unsere Wirklichkeit beschrieben wird.

Wie würden Sie den Forschungsprozess beschreiben?

Forschung ist eigentlich ein Wechselspiel zwischen einem naiven Nachdenken über unsere Vorstellungen, die wir haben, bis dann hin zur präzisen Formulierung in Form der Mathematik.

³⁰ Buchmüller (2009)

3.6. Arbeitswelt in der experimentellen Teilchenphysik

3.6.1. Kollaborationen und Arbeitsalltag

Die experimentelle Teilchenphysik unterscheidet sich stark von anderen experimentellen Disziplinen der Physik. Grund dafür ist der riesige Aufwand, der für die Erforschung der kleinsten Strukturen erforderlich ist. Damit ist sowohl finanzieller, materieller als auch mentaler Aufwand gemeint.

Folgendes Zitat stammt von Achim Geiser³¹, einem Experimentalphysiker, der über die Spezifik seines Forschungsbereiches redet: „Im Wesentlichen sind es die Großprojekte im experimentellen Bereich, die die Teilchenphysik von anderen Wissenschaftsbereichen abgrenzen. Es gibt wenig andere Wissenschaftszweige, wo sich 2000 oder 3000 Leute zusammensetzen, um ein gemeinsames Projekt zu verwirklichen. Ich will nicht sagen, keine, denn in der Raumfahrt oder Fusionsforschung gibt es dies teilweise auch, aber Forschung an Großanlagen ist schon eher spezifisch für die experimentelle Teilchenphysik.“ Im Laufe der Zeit hat sich die Größe der Kollaborationen immer weiter vergrößert (siehe Abb. 42).

Unter der Überschrift „Das HERA-Modell der internationalen Zusammenarbeit“ ist die Entwicklung zu Kollaborationen (= Gruppen von Wissenschaftlern und Ingenieuren, die zusammen ein Thema bearbeiten) beschrieben. Arbeiten im Team ist heute eine überall existente Form in der experimentellen Teilchenphysik. Daraus ergeben sich spezifische Elemente in der Arbeitswelt.

Ein wichtiger Aspekt ist die sich ergebende Internationalität. Menschen aus aller Welt arbeiten zusammen mit der gleichen Zielsetzung: Erhöhung des Wissensschatzes der Menschheit. Aus der Arbeit mit Menschen verschiedenster Herkunft ergibt sich somit ein multikulturelles Arbeitsumfeld, das trotz aller kulturellen Differenzen aber produktiv bleibt. Kommunikationssprache ist Englisch.

Natürlich erfordert diese Art der Zusammenarbeit auch Hierarchien. Wie mir aber mehrere Teilchenphysiker selbst erzählt haben, sind es eher flache Hierarchien in einer netten und lockeren Arbeitsatmosphäre ohne allzu große gegenseitige Konkurrenz. Das mag daran liegen, dass alle das gleiche Ziel haben – Erhöhung des Wissensschatzes der Menschheit – und Profitstreben in diesem Beruf sowieso nicht in besonders ausgeprägtem Maße befriedigt werden kann.³²

Bei solch großen Kollaborationen sind Kommunikation und Koordination sehr wichtige Faktoren.³³ Bei der Vielzahl von Arbeitsgruppen muss unter Anderem sichergestellt werden, dass dasselbe Problem nicht von mehreren Gruppen bearbeitet wird – es sei denn, dies geschieht bewusst, z. B. aus Gründen der gegenseitigen Kontrolle.

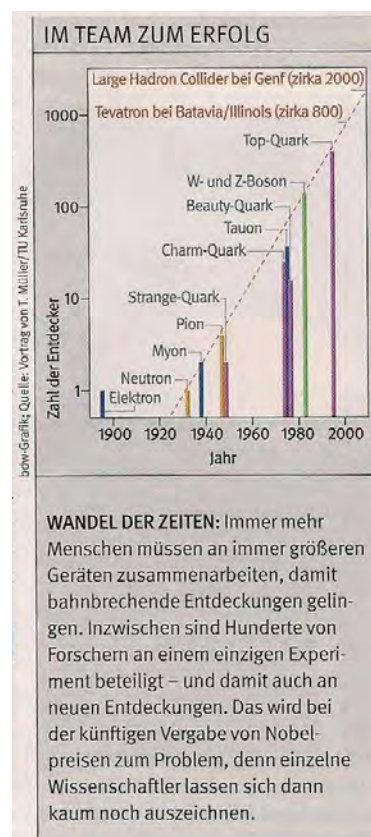


Abb. 42: Obiges Diagramm verdeutlicht, dass immer mehr Menschen für die Entdeckung neuer Teilchen zusammenarbeiten.

³¹ zitiert nach Geiser (2009)

³² zu den Informationen dieses Absatzes vgl. Behnke (2009)

³³ vgl. Bobrovskyi (2009)

Der Austausch über neue Entwicklungen und Ergebnisse in der Forschung erfolgt auf unterschiedlichen Ebenen:

- Die Arbeitsergebnisse einzelner Gruppen bzw. Personen werden in Papers veröffentlicht.
- Innerhalb der Arbeitsgruppe bzw. in einem kleineren Kreis von mehreren Arbeitsgruppen erfolgt der Informationsaustausch in kurzen Zeitabständen (z. B. einer Woche) auf verschiedenen Wegen, wie z. B. kurzen Teammeetings und Videokonferenzen, wo über Fachliches und Organisatorisches geredet wird. Videokonferenzen sind deshalb besonders populär, da so ein direkter Kontakt mit Menschen überall auf der Welt hergestellt werden kann. Trotz der wenigen Forschungszentren arbeiten Menschen aus vielen Orten an den Experimenten mit, die Kommunikation zwischen diesen wird so extrem erleichtert.
- Für jedes Fachgebiet gibt es Workshops oder kleinere Konferenzen, Tagungen und Symposien.
- In einem größeren Kontext werden neue Forschungen dann auf entsprechend größeren Konferenzen, Tagungen und Symposien besprochen. Dabei gibt es diese sowohl zu einzelnen Spezialgebieten als auch zu einem großen Spektrum von Themen. Eins der größten Symposien in der Teilchenphysik ist das alle zwei Jahre stattfindende „Lepton Photon“ (siehe Abb. 43), auf dem es einen Rundumblick über aktuelle Forschung in der Astro- und Teilchenphysik gibt.



Abb. 43: Banner des Lepton Photon 2009, das in Hamburg stattfand.

Durch das Internet wurde die internationale Zusammenarbeit noch einmal deutlich erleichtert. Neben den vielen verbesserten Kommunikationsmöglichkeiten können über das Internet auch die Forschungsdaten wesentlich besser verteilt werden.

Die momentane Arbeitsweise kann sich aber auch sehr schnell ändern, wenn sich die Fragestellungen ändern: „Man hat vor 50 Jahren anders gearbeitet als heute. Im Moment sind wir gerade in einer sehr vom Internet und Globalisierung dominierten Arbeitsweise in der Teilchenphysik.“³⁴

Die Arbeit in der experimentellen Teilchenphysik lässt sich in verschiedene Arbeitsfelder einteilen:

Hardware umfasst Elektronik und Technik im Allgemeinen, meistens ist damit Aufbau von Detektoren und anderen Experimenten gemeint. Software beinhaltet Detektorauslese, Datenverarbeitung, Physikanalyse und Simulation.

Schichten

Einen weiteren wichtigen Bestandteil im Alltag der Physiker bilden die Schichten. Wenn der Beschleuniger in Betrieb ist, so wird dieser im Kontrollzentrum permanent überwacht (siehe Abb. 44). Dies



Abb. 44: Schicht im CERN-Kontrollraum.

³⁴ aus Interview mit Prof. Caren Hagner

umfasst, auf die richtigen Bedingungen zu achten, wie z. B. fortdauernde Kühlung, richtige Spannung und Stromzufuhr, richtige Magnetfeldstärke usw. Auch werden von hier die Injektionen der Teilchenstrahlen und das Zusammenspiel mit den Vorbeschleunigern koordiniert. Auch die Datennahme durch die einzelnen Experimente wird von diesen in deren Kontrollräumen rund um die Uhr überwacht.

3.6.2. Die Messung³⁵

Was letztendlich gemessen wird, sind in den meisten Fällen Energie- und Winkelverteilungen. An einem einfachen Beispiel erklärt, sieht dies so aus: Ein Elektron wird auf ein Proton geschossen. Mit dem Detektor wird gemessen, in welchem Winkel mit welchem Energiebetrag es nach der Kollision weiterfliegt. Die Werte werden in ein Diagramm eingetragen, dem sogenannten „Plot“, ein. In diesem Fall ist auf der x-Achse entweder der Winkel oder die Energie aufgetragen, während die y-Achse die Anzahl der Ereignisse darstellt. Dabei reicht die Messung von einem einzigen Ereignis natürlich nicht aus. Da sich in diesen Bereichen quantenmechanische Effekte bemerkbar machen, somit Wahrscheinlichkeiten, muss eine relativ hohe Zahl von Ereignissen ausgewertet werden, damit die statistische Erfassung aussagekräftig wird. Da, wo sich dann besonders viele Ereignisse einordnen lassen, ist der sogenannte „Peak“. An dieser Stelle wird es dann interessant. Bereiche, die auch interessant sind, sind die, in denen man Ereignisse sieht, obwohl man in dem entsprechenden Bereich keine erwartet hätte (Physik jenseits des Standardmodells).

Wie genau geht eine Physikdatenauswertung vonstatten?

Zunächst werden die vom Detektor kommenden Daten nach bestimmten Parametern selektiert. Mögliche Parameter sind dabei z. B. Impuls- oder Winkelverteilung. Wie die Parameter gewählt werden, muss sich der Physiker vorher meist anhand der Theorie und mit Hilfe von Simulationen überlegen, denn je nach zu untersuchenden Teilchen bzw. Prozessen sind die zu selektierenden Variablen anders. Dann wird der sogenannte Untergrund subtrahiert. Zum Untergrund zählen dabei die schon bekannten und erklärbaren Ereignisse, heute ist dies quasi der Bereich, den das Standardmodell abdeckt. Häufig wird deswegen auch von der Suche nach „Neuer Physik“ gesprochen, da es eben darum geht, das schon sehr gut bestätigte Standardmodell um neue Inhalte zu erweitern. Ist das Signal dann durch diese Filtervorgänge bestimmt, so folgt die Fehleranalyse: Bei der Analyse der systematischen Fehler werden z. B. technische Probleme des Detektors beachtet und korrigiert, bei der Analyse des statistischen Fehlers werden mathematische Methoden angewendet. Dann wird untersucht, inwieweit sich das experimentelle Ergebnis von der theoretischen Vorhersage unterscheidet. Die Theorie macht Vorhersagen darüber, mit welcher Wahrscheinlichkeit bei einer bestimmten Kollision welche Teilchen erzeugt werden. Daraus ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung. Diese Modellvorstellung wird mit den gemessenen Daten verglichen. Daraus können dann neue Erkenntnisse gewonnen werden.

³⁵ zu den Informationen dieses Unterkapitels vgl. Behnke (2009)

3.6.3. Berufliche Laufbahn in der Forschung in der experimentellen Teilchenphysik

Abitur

6 Semester Physikstudium: „Bachelor of Science“

weitere 4 Semester Physikstudium: „Master of Science“

Promotion, 3 Jahre Doktorarbeit: „Dr. rer. nat.“

Während der Promotion wird sowohl für die eigene Arbeit geforscht als auch „Services“ abgeleistet, die dem Arbeitgeber nützen, wie z. B. das Übernehmen von Schichten oder das Organisieren von Meetings.

Die Doktorarbeit in der experimentellen Teilchenphysik hat folgende Struktur:

1 Jahr der Serviceteil, in dem der Doktorand ein gewisses Thema, meistens technischer Art, zum Wohle der Allgemeinheit behandelt. Meistens bringt es ihm für seine eigentliche Analyse nichts, sichert jedoch die konstante Weiterentwicklung der Technik, die für die Forschung unerlässlich ist.

2 Jahre die Analyse, in der er das Thema seiner Wahl behandelt und Daten von Experimenten in Hinsicht auf eine bestimmte Fragestellung analysiert.

Beispiel: Hannes Schettler promoviert am DESY. In seinem Serviceteil arbeitet er für „DQM“ (Data Quality Monitoring) am CMS-Detektor. Er programmiert ein System, welches die vom Detektor kommenden Daten sofort und sehr schnell ein wenig dahingehend analysiert, ob alles regulär funktioniert, keine Detektorkomponente ausgefallen ist usw. Im Analyseteil geht es um Supersymmetrie, genauer um „Search for Supersymmetry using opposite sign Lepton Signatures“. Sein Arbeitsalltag besteht vor allem aus Programmieren und Meetings.



Abb. 45: Hannes Schettler

Post-Doc, je nach Stelle 2-5 Jahre, beliebige Anzahl von Post-Doc-Stellen möglich

Der Post-Doc arbeitet z. B. in Forschungsgruppen und forscht dort an einem Thema. Seine Ergebnisse werden nur in Papers veröffentlicht, d. h. es gibt keine spezielle Post-Doc-Arbeit.

Beispiel: Dr. Isabell Melzer-Pellmann arbeitet seit 2001 als Post-Doc am DESY. Ihre bisherigen Tätigkeiten waren unter Anderem Kalibration und Überwachung der Datenqualität eines Urankalorimeters, Datenanalyse und Simulation. Jetzt baut sie als Gruppenleiterin eine Nachwuchsgruppe am DESY auf, die sich mit der Suche nach Supersymmetrie bei CMS und Studien für zukünftige Experimente beschäftigen wird. In ihrer Gruppe sollen dabei neben ihr zwei Postdocs und mehrere Doktoranden mitarbeiten. Als Gruppenleiterin gibt es viele verwaltungstechnische Sachen zu organisieren, z. B. Koordination und Einarbeitung von Mitarbeitern. Desweiteren wird von ihr auch festgelegt, in welche Richtung sich das Projekt inhaltlich entwickeln soll. Daneben steht natürlich noch die forschende Tätigkeit als aktive Physikerin.

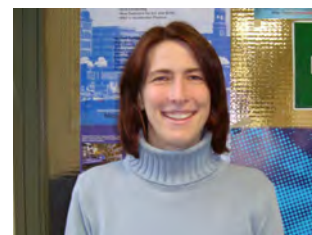


Abb. 46: Dr. Isabell Melzer-Pellmann

3-5 Jahre Habilitation, Bewerbung auf Professur: „Prof.“

Beispiel: Caren Hagner

Die Professorin Caren Hagner arbeitet am DESY sowie an der Universität Hamburg. Dort hat sie einen Lehrauftrag. Mit Lehre und Forschung beschäftigt sie sich zu gleichen Teilen. Die Lehre umfasst Vorlesungen, Doktorandenbetreuung sowie typische Universitätsangelegenheiten. In der Arbeit in der Forschung forscht sie weniger direkt selbst, sondern gibt in ihrer Arbeitsgruppe die Richtung an und koordiniert die verschiedenen Forschungsaufgaben. Auf Konferenzen stellt sie die Forschungsergebnisse vor. Desweiteren kümmert sie sich um die Finanzierung der Forschungsprojekte und Mitarbeiterstellen. Die finanziellen Mittel werden beim Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) und bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) beantragt. Außerdem übt sie eine Gutachtertätigkeit in einem Ausschuss des BMFT aus.



Abb. 47: Prof. Caren Hagner

In der Forschung haben die Forscher eine freie Zeitverwaltung: Die Physiker kennen keinen Routinealltag. Bei Forschungen auf einem neuen Gebiet treten immer neue Probleme auf, die gelöst werden müssen. Die Zeiteinteilung ist relativ frei, bestimmte Aufgaben müssen zu einer bestimmten Frist umgesetzt werden.³⁶

4. Nachwort

Mit dieser Lektüre ist das Gebiet Teilchenphysik hoffentlich ein bisschen verständlicher und klarer geworden, ohne davon allzu viel von seiner Faszination zu verlieren – im Gegenteil, wünschenswert wäre natürlich, dass sich der Zauber noch vergrößert hat. Warum so ein riesiger Aufwand für den LHC erforderlich ist und trotzdem bewältigt wird, dürfte klar geworden sei. Auf jeden Fall ist nicht nur über Teilchenphysik als Wissenschaft informiert worden. Auch der Alltag der Menschen, die sich damit beschäftigen, sowie die hinter der Arbeit liegenden Muster naturwissenschaftlicher Erkenntnis sind dargestellt worden.

³⁶ zu den Informationen dieses Absatzes vgl. Jung (2009)

5. Quellenverzeichnis

5.1. Textquellen

Literaturquellen

Rüdiger Vaas: „Die Erkenntnismaschine - Rekorde über Rekorde“. In: bild der wissenschaft 9/2007, S. 48-49

Wilhelm Tim Hering: Wie Wissenschaft ihr Wissen schafft. Vom Wesen naturwissenschaftlichen Denkens. Erschienen 2007 im Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, Reinbek bei Hamburg.

Pedro Waloschek: Besuch im Teilchenzoo. Vom Kristall zum Quark. Erschienen 1996 im Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, Reinbek bei Hamburg.

Das Supermikroskop HERA. Blick ins Innerste der Materie. Herausgegeben vom Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in der Helmholtz-Gemeinschaft. Erschienen in Hamburg.

Forscherwelt. Herausgegeben vom Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY.

Metzler Physik. Herausgegeben von Joachim Grehn und Joachim Krause. 4. Auflage erschienen 2007 im Schroedel Verlag, Braunschweig.

Schülerduden Physik. Das Fachlexikon von A-Z. Herausgegeben von der Redaktion Schule und Lernen. Erschienen 2007 im Verlag Bibliographische Institut & F. A. Brockhaus AG, Mannheim.

Weltmaschine - Die kleinsten Teilchen und größten Rätsel des Universums. Herausgegeben vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF. Erschienen 2008 in Bonn und Berlin.

Internetquellen

Kommunikationsgruppe des CERN: „CERN. Europäische Organisation für Kernforschung.“
http://www.weltmaschine.de/sites/site_weltmaschine/content/e92/e189/e78814/column-objekt78861/lbox/infoboxContent78862/CERN_CERN-Brochure-2008-002-Ger.pdf, eingesehen am 3.11.2010

„Größte Maschine der Welt in Gang gesetzt“,
<http://www.welt.de/wissenschaft/urknallexperiment/article2422160/Groesste-Maschine-der-Welt-in-Gang-gesetzt.html>, eingesehen am 12.11.2010

„LHC - Zahlen und Fakten“, http://www.weltmaschine.de/cern_und_lhc/lhc/zahlen_und_fakten/, eingesehen am 12.11.2010

CD-ROM

Hands on Particle Physics. Interactive educational material on Particle Physics in 17 languages.
Herausgegeben von European Particle Physics Outreach Group.

\exercises\hands-on-cern\hoc_v21de\index.html

\exercises\manchester\de\detector1.html

\exercises\unischule\exp\Experimente7.htm

Interviews

Olaf Behnke (2009). Interview, geführt von der Verfasserin. Hamburg, 23.10.2009.

Sergei Bobrovskiy (2009). Interview, geführt von der Verfasserin. Hamburg, 23.10.2009.

Wilfried Buchmüller (2009). geführt von der Verfasserin. Hamburg, 22.10.2009.

Achim Geiser (2009). Interview, geführt von der Verfasserin. Hamburg, 20.10.2009.

Caren Hagner (2009). Interview, geführt von der Verfasserin. Hamburg, 23.10.2009.

Hannes Jung (2009). Interview, geführt von der Verfasserin. Hamburg, 22.10.2009.

Isabell Melzer-Pellmann (2009). Interview, geführt von der Verfasserin. Hamburg, 22.10.2009.

5.2. Abbildungsquellen

Das Titelbild zeigt den ATLAS-Detektor. <http://www.stfc.ac.uk/resources/image/hadroncolliderlg.jpg>,
eingesehen am 13.12.2010

Abb. 1: http://www.leifiphysik.de/web_ph08_g8/grundwissen/02teilchenmodell/demokrit01.jpg, eingesehen
am 05.12.2010

Abb. 2: http://zms.desy.de/images/content/e81/e83/imageobject148/VKZQ_DEEN_gr_ger.jpg, eingesehen am
26.07.2010

Abb. 3: http://www.weltderphysik.de/_img/article_large/streuversuche_Rutherford_Vers_anord.jpg, eingesehen
am 05.12.2010

Abb. 4: Schülerduden Physik. Das Fachlexikon von A-Z. Herausgegeben von der Redaktion Schule und Lernen.
Erschienen 2007 im Verlag Bibliographische Institut & F. A. Brockhaus AG, Mannheim. S. 509

Abb. 5: <http://www.weltderphysik.de/de/360.php?i=746>, eingesehen am 05.12.2010, bearbeitet durch die
Verfasserin mit Paint

Abb. 6: http://www.desy.de/images/content/e8/e76/imageobject186/wellenlaenge_impuls_hr_ger.jpg,
eingesehen am 05.12.2010

Abb. 7: <http://www.weltderphysik.de/de/250.php?i=512>, eingesehen am 27.07.2010

Abb. 8: http://www.leifiphysik.de/web_ph12/umwelt_technik/02linearbesch/linearbeschl.htm, eingesehen am 27.07.2010

Abb. 9: http://www.leifiphysik.de/web_ph12/umwelt_technik/02zyklotron/zykloani.gif, eingesehen am 27.07.2010

Abb. 10: <http://public-old.web.cern.ch/public-old/Objects/Chapters/AboutCERN/HowStudyPrtcles/CERNAccelComplex/Accelerators.gif>, eingesehen am 05.12.2010

Abb. 11: http://www.desy.de/images/content/e101/e103/imageobject197/spektrum_hr_ger.jpg, eingesehen am 05.12.2010

Abb. 12, 13: CD-ROM: Hands on Particle Physics. Interactive educational material on Particle Physics in 17 languages. Herausgegeben von European Particle Physics Outreach Group.
E:\exercises\unischule\exp\Experimente7.htm

Abb. 14: erstellt von Fridolin Pflüger, Quelle der Angaben:
http://pdg.lbl.gov/2010/tables/contents_tables.html, eingesehen am 13.12.2010

Abb. 15: http://www.desy.de/images/content/e8/e76/imageobject182/materiebausteine_hr_ger.jpg, eingesehen am 27.07.2010

Abb. 16: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e0/Synthese%2B.svg/220px-Synthese%2B.svg.png>, eingesehen am 08.12.2010

Abb. 17: Pedro Waloschek: Besuch im Teilchenzoo. Vom Kristall zum Quark. Erschienen 1996 im Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, Reinbek bei Hamburg. S.191

Abb. 18: <http://www.weltderphysik.de/de/3724.php?i=855>, eingesehen am 05.12.2010

Abb. 19: <http://www.weltderphysik.de/de/3724.php?i=856>, eingesehen am 05.12.2010

Abb. 20: <http://www.weltderphysik.de/de/3724.php?i=877>, eingesehen am 05.12.2010

Abb. 21: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/89/Beta_Negative_Decay.svg/290px-Beta_Negative_Decay.svg.png, eingesehen am 08.12.2010

Abb. 22: http://www.desy.de/e428/e548/e550/e5838/e242/index_ger.html, eingesehen am 02.08.2010

Abb. 23: <http://www.scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/2008/09/10/susy.jpg>, eingesehen am 08.12.2010

Abb. 24: http://www.desy.de/images/content/e8/e76/index_ger.html, eingesehen am 04.08.2010

Abb. 25: <http://www.weltderphysik.de/de/3724.php?i=1198>, eingesehen am 05.12.2010

Abb. 26: http://www-zeuthen.desy.de/exps/physik_begreifen/frederiq/Kosmische_Strahlung/Teilchenschauer.jpg, eingesehen am 08.12.2010

Abb. 27, 28, 29: http://www.weltmaschine.de/sites/site_weltmaschine/content/e92/e189/e78814/column-objekt79044/lbox/infoboxContent79045/atlas_TT_brochure-2006-004-ger.pdf, S. 2, 3, 4, eingesehen am 08.12.2010

Abb. 30: http://mediaarchive.cern.ch/MediaArchive/Photo/Public/1999/9906046/9906046_13/9906046_13-A5-at-72-dpi.jpg, eingesehen am 05.12.2010

Abb. 31: http://www.weltmaschine.de/e92/e83255/e90618/Factsheet_ATLAS.pdf

Abb. 32: http://www.weltmaschine.de/e92/e83255/e90620/Factsheet_CMS.pdf

Abb. 33: http://www.weltmaschine.de/e92/e83255/e90619/Factsheet_Alice.pdf

Abb. 34: http://www.weltmaschine.de/e92/e83255/e90621/Factsheet_LHCb.pdf, alle eingesehen am 08.12.2010

Abb. 35, 36: http://www.weltmaschine.de/sites/site_weltmaschine/content/e92/e189/e78814/column-objekt79036/lbox/infoboxContent79037/LHC_CERN-Brochure-2008-003-Ger.pdf, S. 2, 3, eingesehen am 08.12.2010

Abb. 37: http://www.desy.de/images/content/e81/e83/imageobject256/2010-09-22_Luftfoto_DESY_RS-0003_b_ger.jpg, eingesehen am 05.12.2010

Abb. 38: <http://www.weltderphysik.de/de/3724.php?i=804>, eingesehen am 05.12.2010

Abb. 39, 40: http://pr.desy.de/sites2009/site_pr/content/e113/e48/column-objekt68/lbox/infoboxContent70/HERA_ger.pdf, S. 14, 15, eingesehen am 08.12.2010

Abb. 41, 45, 46, 47: von Verfasserin gemachte Fotos

Abb. 42: Rüdiger Vaas: „Die Erkenntnismaschine - Rekorde über Rekorde“. In: bild der wissenschaft 9/2007, S. 43

Abb. 43: <http://lp09.desy.de/>, eingesehen am 05.12.2010

Abb. 44: http://mediaarchive.cern.ch/MediaArchive/Photo/Public/2010/1003061/1003061_64/1003061_64-A4-at-144-dpi.jpg, eingesehen am 05.12.2010

