



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften  
Fachrichtung Physik  
Institut für Kern- und Teilchenphysik

Masterarbeit im Fach Physik  
Master-Studiengang Höheres Lehramt an Gymnasien

**Entwicklung von Unterrichtsmaterialien zur Auswertung von Daten  
aus Experimenten an modernen Teilchenbeschleunigern**

vorgelegt von

**Philipp Lindenau**

geboren am 07.10.1987 in Erlabrunn

Betreuer: Prof. Dr. Michael Kobel  
Zweitgutachten: Prof. Dr. Gesche Pospiech

Eingereicht am 27.10.2015

# Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	1
2 Zur Bedeutung der Teilchenphysik.....	3
2.1 Eine kurze Geschichte der Teilchenphysik.....	3
2.2 Beweggründe für die Behandlung der Teilchenphysik im Schulunterricht.....	5
2.2.1 Teilchenphysik in Medien und Science-Fiction.....	5
2.2.2 Teilchenphysik und Technologietransfer.....	7
2.3 Die Rolle der Teilchenphysik in den Lehrplänen deutscher Gymnasien.....	7
3 Allgemeine didaktische und fachliche Hinweise.....	9
3.1 Die Wahl geeigneter Bezeichnungen.....	9
3.2 Einheiten in der Teilchenphysik .....	13
3.3 Feynman-Diagramme.....	15
3.4 Die Anti-/Farbladungsvektoren.....	19
3.5 Die Multipletts der Ladungen.....	21
4 Fachliche Hintergrundinformationen für Lehrkräfte.....	27
4.1 Der Large Electron-Positron Collider (LEP).....	27
4.1.1 Aufbau und Funktionsweise des LEP.....	27
4.1.2 Ziele der LEP-Forschung.....	30
4.2 Der OPAL Detektor.....	32
4.2.1 Aufbau des OPAL-Detektors.....	32
4.2.2 Identifikation von Anti-/Teilchen - Das OPAL-Eventdisplay.....	35
4.3 Das Studium der Z-Teilchen am LEP.....	43
4.3.1 Erzeugung und Umwandlung der Z-Teilchen.....	43
4.3.2 Die Umwandlungskanäle des Z-Teilchens.....	46
4.3.3 Ergebnisse der Analyse von Umwandlungen des Z-Teilchens.....	50
5 Vorstellung der Arbeitsmaterialien.....	59
5.1 Grobziele und benötigtes Vorwissen.....	59
5.2 Allgemeine Hinweise.....	62
5.3 Hinweisblätter zu den einzelnen Arbeitsmaterialien.....	64
5.3.1 Der OPAL-Detektor.....	65
5.3.2 Nachweis von Anti-/Teilchen mit Großdetektoren.....	67
5.3.3 Identifikation einzelner Teilchen.....	69
5.3.4 Mysteriöse Einträge.....	71
5.3.5 Einflussfaktoren auf die Spurkrümmung.....	74
5.3.6 Identifikation möglicher Umwandlungskanäle des Z-Teilchens.....	77
5.3.7 Die Entstehung von Jets.....	82

5.3.8 Umwandlungen des Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar.....	83
5.3.9 Komplexe Übung zur Umwandlung von Z-Teilchen.....	85
5.3.10 Abstrahlung von Botenteilchen.....	88
5.3.11 Ergebnisse der LEP-Forschung.....	90
6 Literaturverzeichnis.....	93
7 Abbildungsverzeichnis.....	97
A Anhang.....	I
A.1 Arbeitsmaterialien: Der OPAL-Detektor.....	II
A.2 Arbeitsmaterialien: Nachweis von Anti-/Teilchen mit Großdetektoren.....	VI
A.3 Arbeitsmaterialien: Identifikation einzelner Teilchen.....	XI
A.4 Arbeitsmaterialien: Mysteriöse Einträge.....	XIV
A.5 Arbeitsmaterialien: Einflussfaktoren auf die Spurkrümmung.....	XVII
A.6 Arbeitsmaterialien: Identifikation möglicher Umwandlungskanäle des Z-Teilchens.....	XXII
A.7 Arbeitsmaterialien: Die Entstehung von Jets.....	XXX
A.8 Arbeitsmaterialien: Umwandlungen des Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar....	XXXII
A.9 Arbeitsmaterialien: Komplexe Übung zur Umwandlung von Z-Teilchen .....	XXXVIII
A.10 Arbeitsmaterialien: Abstrahlung von Botenteilchen.....	XLIV
A.11 Arbeitsmaterialien: Ergebnisse der LEP-Forschung.....	XLIX

## 1 Einleitung

Das Ziel bei der Anfertigung der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung von Arbeitsmaterialien, die im Schulunterricht im Zusammenhang mit der Behandlung des Standardmodells der Teilchenphysik und moderner teilchenphysikalischer Forschungsmethoden eingesetzt werden können. Bei der Materialentwicklung wurden Originaldaten aus dem OPAL-Experiment am Large Electron-Positron Collider (LEP) verwendet. Diese wurden in Form von Arbeitsblättern didaktisch aufbereitet.

Die Verwendung von Originaldaten im Schulunterricht ermöglicht eine authentische Auseinandersetzung mit den experimentellen Methoden sowie mit Methoden der Datenauswertung bei Kollisionsexperimenten an Teilchenbeschleunigern, die in anderer Form nicht realisiert werden könnte, da im Unterricht keine Möglichkeit zur Durchführung derartiger Experimente besteht.

Die entwickelten Arbeitsmaterialien können als Grundlage eines Unterrichtskonzeptes dienen, in dem die Schüler lernen, wie Anti-/Teilchen anhand ihrer Signaturen im OPAL-Detektor und dem OPAL-Eventdisplay identifiziert werden können, wobei sie entsprechende Identifikationen selbst durchführen. Der Schwerpunkt der Auseinandersetzungen liegt in der Analyse von Umwandlungen des Z-Teilchens, welches eines der im OPAL-Experiment am ausführlichsten untersuchten Objekte darstellt. Dabei erhalten die Schüler einen Einblick in die Erkenntnisse, die bei diesen Untersuchungen gewonnen werden konnten sowie in die dabei eingesetzten Auswertungsmethoden.

Im Folgenden wird ein Überblick über die Inhalte der vorliegenden Arbeit gegeben.

In Kapitel 2 wird die Rolle der Teilchenphysik und des Standardmodells im gesamtphysikalischen Kontext umrissen. Anschließend wird dargelegt, welche Rolle das Standardmodell aktuell im Schulunterricht der deutschen Bundesländer spielt. Außerdem wird begründet, weshalb eine Auseinandersetzung mit der Teilchenphysik in der Schule sinnvoll und notwendig ist.

Die nachfolgenden Kapitel beinhalten die physikalischen und fachdidaktischen Informationen, die den Lehrkräften zusammen mit den Arbeitsmaterialien zur Verfügung gestellt werden müssen. Diese Kapitel sind so aufgebaut und formuliert, dass sie als Handreichung für die Lehrkräfte verwendet werden können. Es werden dabei Kenntnisse zum Standardmodell sowie zu Teilchenbeschleunigern und -detektoren vorausgesetzt. Die benötigten Informationen finden die Lehrkräfte zum Beispiel in den Materialien von Netzwerk Teilchenwelt (2013, 2015).

Kapitel 3 beinhaltet allgemeine didaktische und fachliche Hinweise, die bei der Behandlung der Teilchenphysik im Schulunterricht und speziell bei der Verwendung der entwickelten Unterrichts-

materialien zu beachten sind. In diesem Zusammenhang wird dargelegt, welche aus didaktischer Sicht ungünstigen Bezeichnungen und Formulierungen vermieden werden sollten und es werden entsprechende Alternativen vorgestellt. Das Kapitel enthält darüber hinaus Informationen zu den in den Informations- und Unterrichtsmaterialien verwendeten Einheiten für Masse, Energie und Impuls sowie zu Feynman-Diagrammen und deren Verwendung im Unterricht. Anschließend werden die Farbladungsvektoren der starken Ladung diskutiert und es wird auf die Ordnung der elementaren Anti-/Materieteilchen in Multipletts eingegangen.

Fachliche Hintergrundinformationen zum Large Electron-Positron Collider, dem OPAL-Detektor sowie dem im OPAL-Experiment verwendeten Eventdisplay werden in Kapitel 4 bereitgestellt. Außerdem werden dort die für den Einsatz der Unterrichtsmaterialien relevanten Informationen zum Z-Teilchen und dessen Umwandlungskanälen gegeben.

In Kapitel 5 werden schließlich die Arbeitsmaterialien explizit vorgestellt und diskutiert. Zuerst erfolgt ein allgemeiner Überblick über die Materialien und die mit ihrer Hilfe erreichbaren Lernziele. Anschließend wird auf die einzelnen Arbeitsblätter detailliert eingegangen, wobei das jeweils benötigte Vorwissen sowie die angestrebten Lernziele dargelegt und methodische sowie didaktische Hinweise zum Einsatz der entsprechenden Materialien gegeben werden.

## 2 Zur Bedeutung der Teilchenphysik

In diesem Kapitel wird die Rolle der Teilchenphysik und des Standardmodells der Teilchenphysik im gesamtphysikalischen Kontext reflektiert. Anschließend werden einige Gründe dargelegt, die für die Behandlung der Teilchenphysik im Schulunterricht sprechen, bevor schließlich darauf eingegangen wird, in welchem Maße eine Auseinandersetzung mit dem Standardmodell an deutschen Gymnasien vorgesehen ist.

### 2.1 Eine kurze Geschichte der Teilchenphysik

Die Frage danach, „was die Welt im Innersten zusammenhält“ (Goethe, „Faust“) und woraus wir und die uns umgebende Natur bestehen, ist eine der ältesten wissenschaftlichen und philosophischen Fragestellungen. Dass Materie aus einer Vielzahl unteilbarer Teilchen aufgebaut ist, wurde bereits von großen Denkern der griechischen Antike postuliert. Demokrit (4./5. Jhd. v.u.Z) prägte dabei erstmals den Atombegriff. Für ihn waren Atome die unteilbaren Bausteine aller Dinge. Die Grundlagen für unser heutiges Verständnis der elementaren Anti-/Teilchen und deren Wechselwirkungen, wurden gegen Ende des 19. Jahrhunderts gelegt. Im Jahr 1898 entdeckte Joseph John Thomson das erste Teilchen, welches zu den heute bekannten Elementarteilchen<sup>1</sup> gehört – das Elektron. Die ersten Streuexperimente mit Teilchen wurden 1911 von Ernest Rutherford durchgeführt. Derartige Versuche stellen bis heute die bedeutendste experimentelle Methode in der Teilchenphysik dar (vgl. Schieck, 2015). Im Laufe des 20. Jahrhunderts entwickelte sich eine komplexe Vorstellung vom Aufbau der Materie und dem Verhalten subatomarer Anti-/Teilchen. Diese Entwicklung gipfelte in der Formulierung des sogenannten *Standardmodells der Teilchenphysik* (im Folgenden auch kurz: Standardmodell).

Beim Standardmodell handelt es sich um eine Quantenfeldtheorie. Es ist bis heute das mächtigste Werkzeug, welches uns zur Beschreibung der Vorgänge in unserem Universum zur Verfügung steht. Das Standardmodell wurde in den Jahren von 1961 bis 1973 auf Grundlage der in den 1950er Jahren formulierten Eichtheorien entwickelt und seit dem Anfang der 1970er Jahre immer wieder experimentell überprüft und bestätigt (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015). Im Jahr 2012 wurde durch die Analyse der am Large Hadron Collider (LHC) gesammelten experimentellen Daten die Existenz des Higgs-Teilchens bestätigt, womit das letzte vom Standardmodell vorausgesagte Teilchen gefunden wurde.

---

<sup>1</sup> Ein Anti-/Teilchen wird als elementar bezeichnet, wenn es keinerlei Substruktur besitzt.

Ziel der physikalischen Forschung ist allerdings nicht nur, die Prozesse im Universum verstehen und beschreiben zu können, sondern diese auf möglichst wenige fundamentale Prinzipien zurückzuführen. Das erklärte Ziel ist dabei die Auffindung einer sogenannten *Weltformel*, also einer Gleichung, mit deren Hilfe sämtliche ablaufenden Prozesse beschrieben werden können. In der Vergangenheit ist es immer wieder gelungen, zuerst als unterschiedlich angenommene Phänomene in einer gemeinsamen Theorie zusammenzuführen. Der zeitliche Verlauf dieser Vereinheitlichungen ist in Abbildung 1 dargestellt. Den aktuell größten Grad der Vereinheitlichung stellt dabei das Standardmodell der Teilchenphysik dar. Die Beschreibung der Gravitation konnte bisher allerdings nicht in dieses Modell integriert werden. Auch im Bereich der Teilchenphysik lässt das Standardmodell einige wesentliche Fragen unbeantwortet.

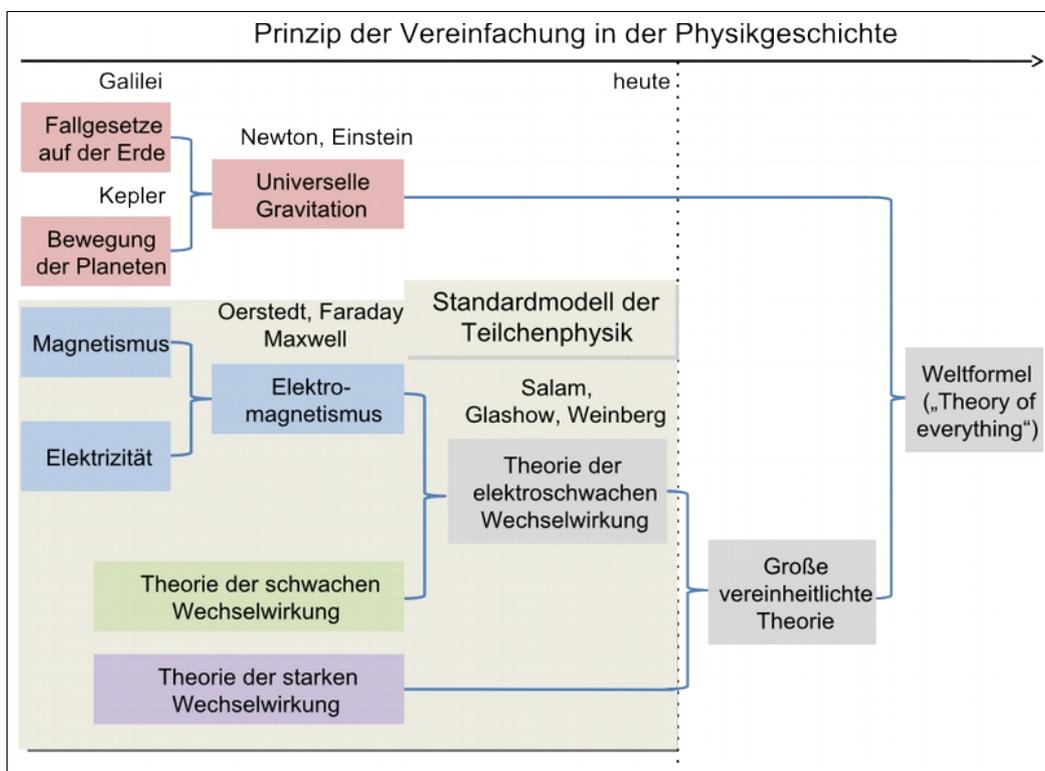


Abbildung 1: Übersicht über die Vereinheitlichung physikalischer Theorien

Dazu gehört zum Beispiel die Frage, woraus die sogenannte dunkle Materie besteht und worum genau es sich bei dunkler Energie handelt. Diese wurden bisher nur indirekt über ihren Einfluss auf die Expansionsgeschwindigkeit des Universums nachgewiesen.

Außerdem bestehen die im Universum existierenden Objekte ausschließlich aus Materie und nicht aus Anti-Materie, obwohl beide während des Urknalls in gleichem Maße entstanden sein sollten. Dies kann nicht mit dem Standardmodell erklärt werden und gehört zu einer der bedeutendsten aktuellen Forschungsfragen.

Das Standardmodell erklärt ebenfalls nicht, wieso es genau die beobachtete Anzahl an unterschiedlichen Materie- und Anti-Materie-Teilchen gibt. Weiterhin beinhaltet es eine Vielzahl freier Parameter, deren Werte nicht aus der Theorie selbst hervorgehen, sondern experimentell bestimmt werden müssen. Das bedeutet, dass es sich bei dem Standardmodell nicht um eine finale Beschreibung der Natur handeln kann, sondern dieses lediglich ein Zwischenschritt zu einer übergeordneten und aussagefähigeren Theorie ist.

## **2.2 Beweggründe für die Behandlung der Teilchenphysik im Schulunterricht**

Jugendliche haben häufig ein großes Interesse an den elementaren Prozessen in unserem Universum (vgl. Schieck, 2015). Neben der intrinsischen Motivation zur Auseinandersetzung mit teilchenphysikalischen Fragestellungen sprechen weitere Gründe dafür, dass die Behandlung der Teilchenphysik im Schulunterricht ihren Platz haben sollte. Einige dieser Gründe werden im Folgenden dargelegt.

### **2.2.1 Teilchenphysik in Medien und Science-Fiction**

Die Ergebnisse und Fortschritte in der teilchenphysikalischen Forschung sowie die eingesetzten Forschungsmethoden werden nicht nur in wissenschaftlichen Fachkreisen diskutiert. In den vergangenen Jahren wurden diese Themen regelmäßig auch in öffentlichen Medien aufgegriffen, wodurch eine breite Masse der Bevölkerung erreicht wurde. Dies geschah zum Beispiel im Zusammenhang mit der Bekanntgabe der Entdeckung des Higgs-Teilchens im Jahr 2012 und der daraus resultierenden Verleihung des Nobelpreises für Physik an François Englert und Peter Higgs im Jahr 2013. Auch im Jahr 2015 wurde der Nobelpreis für Physik für Forschungsergebnisse im Bereich der Teilchenphysik vergeben. Takaaki Kajita und Arthur McDonald wurde für die Entdeckung von Neutrinooszillationen<sup>2</sup> und dem damit zusammenhängenden Beweis ausgezeichnet, dass Anti-/Neutrinos massebehaftete elementare Anti-/Teilchen sind. In den Jahren 2004 und 2008 wurden die Nobelpreise für Physik ebenfalls für Forschungsergebnisse im Bereich der Elementarteilchenphysik vergeben.

Neben der medialen Berichterstattung über die aktuelle Forschung werden Schüler auch in anderen Zusammenhängen mit teilchenphysikalischen Themen konfrontiert. In Science-Fiction-

---

<sup>2</sup> Aufgrund quantenmechanischer Prozesse, auf die hier nicht weiter eingegangen werden kann, kann sich ein Anti-/Neutrinos eines bestimmten Typs in ein Anti-/Neutrino eines anderen Typs umwandeln. Diese Umwandlungen finden ohne Emission oder Absorption eines Botenteilchens statt und werden als Neutrinooszillationen bezeichnet.

Literatur und -Filmen spielt die Teilchenphysik häufig eine wichtige Rolle. Dabei sind die dargestellten Zusammenhänge tatsächlich oft mehr Fiktion als wissenschaftliche Realität. Das prominenteste Beispiel in diesem Zusammenhang ist wohl der Bestseller „Illuminati“ (engl. Angels & Demons) von Dan Brown (2003) sowie die 2009 erschienene Filmadaption. Darin wird aus dem Forschungszentrum CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) Anti-Materie gestohlen und zu einer Anti-Materie-Bombe umfunktioniert. Dass am CERN Forschung zu Anti-Materie stattfindet entspricht zwar der Wahrheit, allerdings wird diese dort in so geringen Mengen produziert, dass die Möglichkeit zur Herstellung einer Bombe keinesfalls gegeben ist. Eine kritische Reflexion des in Buch und Film gezeichneten Bildes der Forschung am CERN findet man unter anderem im Internet<sup>3</sup>.

Auch die mögliche Gefahr durch die Erzeugung schwarzer Löcher bei den Experimenten am CERN ist regelmäßig Diskussionsthema (vgl. Schieck, 2015) und bietet reichlich Stoff für Weltuntergangsszenarien. Weshalb es sich bei den skizzierten Gefahren um pure Fiktion handelt, kann ebenfalls online<sup>4</sup> nachgelesen werden. Eine ausführliche Diskussion häufig genannter Sicherheitsrisiken bei Kollisionsexperimenten findet in einer Veröffentlichung der LHC Safety Assessment Group (2008) statt.

Da die Begegnungen der Jugendlichen mit der Teilchenphysik häufig populärwissenschaftlicher Natur sind, oder gar in den Bereich Science-Fiction gehören, erscheint es notwendig, dass sich die Jugendlichen in der Schule mit den wissenschaftlichen Grundlagen der Teilchenphysik beschäftigen. Nur so kann erreicht werden, dass sie mediale Berichterstattungen einordnen und an Diskussionen darüber teilnehmen sowie wissenschaftliche Fakten von purer Fiktion unterscheiden können. Diese Ziele spiegeln sich auch in der Formulierung der Bildungsstandards für Physik wieder.

Gemäß den Bildungsstandards soll naturwissenschaftliche Bildung „eine aktive Teilhabe an gesellschaftlicher Kommunikation und Meinungsbildung über technische Entwicklungen und naturwissenschaftliche Forschung“ (KMK, 2005, S. 6) ermöglichen. Im Kompetenzbereich *Bewerten* lautet zudem einer der Regelstandards wie folgt: „Die Schülerinnen und Schüler nutzen physikalisches Wissen zum Bewerten von Risiken und Sicherheitsmaßnahmen bei Experimenten, im Alltag und bei modernen Technologien“ (KMK, 2005, S. 12). Um diese Standards erfüllen zu können, ist eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Teilchenphysik im Schulunterricht unabdingbar.

---

3 <http://www.weltdrphysik.de/thema/physik-im-spielfilm/illuminati/wahr-oder-falsch>.

4 [http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=schwarze\\_loecher](http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=schwarze_loecher).

## 2.2.2 Teilchenphysik und Technologietransfer

Die Erkenntnisse aus dem Standardmodell und der teilchenphysikalischen Grundlagenforschung haben die Entwicklung einer Vielzahl technischer Anwendungen ermöglicht. Durch deren Behandlung im Schulunterricht kann das Interesse an der Teilchenphysik gesteigert werden. Unter anderem im medizinischen Bereich spielen die in der Grundlagenforschung gewonnenen Erkenntnisse eine wesentliche Rolle bei der Entwicklung von Diagnose- und Therapieverfahren (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2013.). Ein Beispiel dafür ist die Positron-Emissions-Tomographie (PET), die eines der effektivsten bildgebenden Verfahren der diagnostischen Medizin darstellt. Weiterhin ermöglichen teilchenphysikalische Erkenntnisse die Entwicklung und Verbesserung von Verfahren zur Tumorbekämpfung mittels Strahlentherapie.

Durch Behandlung physikalischer Themen in einem anwendungsbezogenen Kontext kann das Interesse der Jugendlichen an diesen Themen gesteigert werden. Durch die Einbettung in einen medizinischen Kontext kann insbesondere das Interesse der Mädchen gesteigert werden, die in der Regel ein geringeres Interesse an Physik haben als Jungen (vgl. Häußler & Hoffmann, 1995).

## 2.3 Die Rolle der Teilchenphysik in den Lehrplänen deutscher Gymnasien

Im Folgenden wird umrissen, welche Rolle die Elementarteilchenphysik in Lehrplänen der deutschen Bundesländer spielt. Angaben zum zeitlichen Umfang der Auseinandersetzungen werden dabei nicht gemacht. Diese können bei Bedarf den entsprechenden Lehrplänen entnommen werden.

Von den 16 deutschen Bundesländern ist nur in Bayern und Nordrhein-Westfalen die Behandlung des Standardmodells mit den elementaren Anti-/Teilchen und fundamentalen Wechselwirkungen verbindlich im Lehrplan der gymnasialen Oberstufen verankert (vgl. BSUK, 2004; MSW, 2014). Eine verbindliche Auseinandersetzung mit Teilaspekten des Standardmodells findet gemäß den Lehrplänen in Baden-Württemberg (Quarks, Leptonen, Hadronen), Mecklenburg-Vorpommern (Quarks), Hamburg („Struktur der Materie“) und Bremen (Teilchen, Anti-Teilchen, Quarks) statt, wobei in Bremen die Beschäftigung mit den Botenteilchen der fundamentalen Wechselwirkungen als Vertiefungsmöglichkeit vorgeschlagen wird (vgl. BSB, 2009; MBWK-MV, 2006; MKJS, 2004; SBW, 2008). Die Möglichkeit der Behandlung des Standardmodells im Rahmen von Wahlpflichtbereichen kann von Lehrkräften zudem in Schleswig-Holstein und Rheinland-Pfalz wahrgenommen werden, wobei in Rheinland-Pfalz sogar die Verwendung von Feynman-Diagrammen explizit vorgesehen ist (vgl. MBWFK, 2002; MBWW, o.J.). In Thürin-

gen, Niedersachsen und Sachsen hingegen findet gemäß den Lehrplänen überhaupt keine Auseinandersetzung mit dem Standardmodell statt (vgl. MBWK-TH, 2012; NKM, 2009; SMK, 2011).

Trotz seiner enormen Relevanz für die physikalische Grundlagenforschung und der in Kapitel 2.2 diskutierten Gründe, die für eine Behandlung der Teilchenphysik im Schulunterricht sprechen, ist das Standardmodell bis heute in nahezu keinem der deutschen Bundesländer ein fester Bestandteil des Lehrplans. Dort, wo eine entsprechende Auseinandersetzung stattfindet, werden oft massive Vereinfachungen vorgenommen bzw. das Standardmodell wird auf die Betrachtung der fundamentalen Bausteine der Materie reduziert, obwohl es sich im Wesentlichen um eine Theorie der Ladungen und Wechselwirkungen handelt (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015). Durch die Reduktion auf Anti-/Materieteilchen wird ein Erfassen der eigentlichen Bedeutung sowie von wesentlichen Erkenntnissen erschwert oder sogar unmöglich gemacht. Vielmehr sollten die elementaren Anti-/Teilchen im Dreiklang mit den Ladungen und fundamentalen Wechselwirkungen betrachtet werden. Wie dies geschehen kann, wird bei Netzwerk Teilchenwelt (2015) ausführlich vorgestellt. Die in der vorliegenden Arbeit enthaltenen Unterrichtsmaterialien bieten die Möglichkeit, eine entsprechende Auseinandersetzung im Unterricht durch die Behandlung von Kollisionsexperimenten an Teilchenbeschleunigern und den dabei eingesetzten Auswertungsmethoden zu bereichern.

### 3 Allgemeine didaktische und fachliche Hinweise

In diesem Abschnitt werden einige grundlegende Hinweise zur Didaktik der Elementarteilchenphysik gegeben. Dabei wird sowohl auf die Wahl geeigneter Begriffe als auch auf in der Teilchenphysik gebräuchliche Einheiten für Energie, Masse und Impuls eingegangen. Weiterhin werden Regeln für die Verwendung von Feynman-Diagrammen und das Konzept des starken Farbladungsvektors vorgestellt. Abschließend wird dargelegt, wie sich Anti-/Teilchen in Multipletts bezüglich der schwachen Ladung ordnen lassen.

Für das Verständnis der nachfolgenden Ausführungen werden fundierte Kenntnisse zum Standardmodell und zu teilchenphysikalischen Forschungsmethoden, insbesondere zu Kollisionsexperimenten, vorausgesetzt. Die entsprechenden Informationen sind unter anderem in den Materialien von Netzwerk Teilchenwelt (2013, 2015) zu finden. Hier werden nur teilchenphysikalische Themen wiederholt bzw. ausführlich diskutiert, die in den Unterrichtsmaterialien aufgegriffen werden.

#### 3.1 Die Wahl geeigneter Bezeichnungen

Wenn in den folgenden Ausführungen der Begriff *Anti-/Teilchen*<sup>5</sup> verwendet wird, dann stellt dies eine begriffliche Vereinfachung dar. Es handelt sich nicht um Teilchen im Sinne der klassischen Physik, sondern es sind stets Quantenobjekte gemeint, die den Gesetzen der Quantenphysik unterliegen, für die also insbesondere der Begriff der *Anti-/Teilchenbahn* nicht definiert ist (In keinem Fall sollte die *Spur*, die Anti-/Teilchen in Spurkammern hinterlassen, als Bahn der Anti-/Teilchen bezeichnet werden<sup>6</sup>). Dies sollte stets im Hinterkopf behalten und im Unterricht ebenfalls thematisiert werden, sofern das nötige Vorwissen (Grundlagen der Quantentheorie) dafür vorausgesetzt werden kann<sup>7</sup>. Die Bezeichnung *Anti-/Teilchen* ist jedoch in der wissen-

---

5 Hier wird die ausführliche Schreibweise *Anti-/Teilchen* verwendet. Dies soll verdeutlichen, dass im Standardmodell klar zwischen Teilchen und Anti-/Teilchen unterschieden wird. Die verwendete Bezeichnung umfasst sowohl Teilchen als auch Anti-Teilchen. Lediglich bei etablierten Bezeichnungen wie z.B. *Teilchenphysik*, *Teilchenbeschleuniger* oder *Teilchendetektor* wird auf diese Schreibweise verzichtet. Bei Hadronen und Mesonen, welche aus elementaren Anti-/Teilchen zusammengesetzt sind, ist eine Unterteilung in Teilchen und Anti-/Teilchen nicht üblich. Daher werden alle Hadronen und Mesonen im Folgenden allgemein als Teilchen bezeichnet.

6 In einer Spurkammer kann nur aufgrund der Wechselwirkung der Anti-/Teilchen mit dem Kammergas eine „grobe“ Lokalisation der Anti-/Teilchen stattfinden.

7 Konzepte und didaktische Hinweise zur Behandlung der Quantenphysik im Schulunterricht findet man unter anderem bei Müller, Berger und Wiesner (1998), Müller und Wiesner (2000), Küblbeck und Müller (2002), Pospiech (2004), Pospiech & Schoene (2012), Küblbeck (2015) und Schorn (o.J.). Eine ausführliche Diskussion über Schülervorstellungen zur Quantenphysik ist bei Müller (2003) zu finden.

schaftlichen Fachsprache so etabliert (das zeigt schon die Bezeichnung *Standardmodell der Teilchenphysik*), dass hier an diesem Begriff festgehalten wird.

Ähnliches gilt für den Begriff der *Anti-/Teilchenkollision*. Aber auch hier muss darauf hingewiesen werden, dass darunter nicht etwa ein klassischer Stoßprozess zu verstehen ist, bei dem sich die Teilchen tatsächlich „berühren“. Die quantenmechanische Natur der betrachteten Objekte schließt eine solche Wechselwirkung aus. Vielmehr findet eine Wechselwirkung ohne eine solche direkte Berührung statt. Dabei können völlig neue *Anti-/Teilchen* entstehen. Eine ausführliche Beschreibung quantenmechanischer Stoßprozesse findet man unter anderem bei Bleck-Neuhaus (2013).

Wie die beiden obigen Beispiele zeigen, werden in der wissenschaftlichen Fachsprache häufig Termini verwendet, die aus didaktischer Sicht ungünstig gewählt sind. Sofern diese Begriffe unreflektiert verwendet werden, können unter Umständen Fehlvorstellungen bzw. falsche Assoziationen bei den Lernenden hervorgerufen werden. Im Folgenden wird auf einige teilchenphysikalische Begriffe eingegangen, für die es günstigere Alternativen gibt (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015).

Der *Kraftbegriff* spielt im Physikunterricht eine wichtige Rolle. Bezeichnungen wie zum Beispiel *Reibungskraft*, *Gewichtskraft* und *elektromagnetische Kraft* sind im Unterricht berechtigterweise etabliert. Im Kontext der Teilchenphysik und auch in fachdidaktischen Auseinandersetzungen mit der Thematik (z.B bei Schieck (2015)) wird häufig die Bezeichnung *fundamentale Kräfte* als Zusammenfassung der Gravitation, der elektromagnetischen, der schwachen sowie der starken Wechselwirkung verwendet, wobei die Gravitation nicht durch das Standardmodell beschrieben wird<sup>8</sup>. Es empfiehlt sich daher dringend, stattdessen den Terminus *fundamentale Wechselwirkungen* zu verwenden.

Das Konzept der Wechselwirkung stellt in den Bildungsstandards für Physik (vgl. KMK, 2005) eines der vier Basiskonzepte im Bereich Fachwissen dar, wobei auch hier Kraftwirkungen als Beispiele für Wechselwirkungen genannt werden. Im Standardmodell werden die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung durch Botenteilchen vermittelt. Diese Botenteilchen können eine Kraftwirkung hervorrufen, also abstoßende bzw. anziehende Kräfte zwischen Teilchen, welche den gleichen Ladungstyp (elektrische, schwache bzw. starke Ladung) besitzen. Der Begriff *Wechselwirkung* umfasst allerdings weitere Phänomene wie zum Beispiel die Emission bzw. die Absorption eines Botenteilchens durch ein *Anti-/Materieteilchen* oder die Umwandlung eines Botenteilchens in ein Teilchen-Anti-Teilchen-Paar (vgl. Netzwerk Teilchen-

---

<sup>8</sup> Die Gravitation wird durch die allgemeine Relativitätstheorie beschrieben. Im Rahmen der heute in teilchenphysikalischen Experimenten erreichbaren Energien ist die Gravitation aufgrund ihrer gegenüber den anderen drei Wechselwirkungen extrem geringen Stärke völlig vernachlässigbar (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015).

welt, 2015). Daher sollte im Allgemeinen der Begriff *Wechselwirkung* anstelle des Begriffs der *Kraft* verwendet werden. Ist tatsächlich eine Kraftwirkung gemeint, so bietet sich eine Formulierung der folgenden Form an: „Die durch das Botenteilchen vermittelte Wechselwirkung äußert sich in einer Kraftwirkung“.

In den obigen Ausführungen wurde der Begriff *Botenteilchen* für die Bosonen der fundamentalen Wechselwirkungen verwendet. Häufig findet man auch die Bezeichnungen *Austauschteilchen* bzw. *Austauschbosonen* oder *Eichbosonen*. Die Verwendung des Begriffs *Austauschteilchen* sollte dringend vermieden werden, denn diese Bezeichnung suggeriert, dass eines der an einer Wechselwirkung teilnehmenden Anti-/Teilchen das Botenteilchen „besitzt“ und dieses während der Wechselwirkung an das andere Anti-/Teilchen „übergibt“. Diese Vorstellung ist falsch, denn eines der wechselwirkenden Teilchen erzeugt<sup>9</sup> das Botenteilchen und dieses wird anschließend von dem anderen an der Wechselwirkung beteiligten Anti-/Teilchen absorbiert (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015).

Auf die Bezeichnung *Boson* wird im Folgenden verzichtet, da die Verwendung dieses Begriffes im Schulunterricht Kenntnisse zum Spin von Anti-/Teilchen voraussetzen würde. Bei der Behandlung der Teilchenphysik werden die Schüler mit einer Vielzahl neuer Begriffe konfrontiert. Es ist nicht zweckmäßig deren Anzahl unnötig zu erhöhen. Daher wird zum Beispiel anstelle der Bezeichnung *Z-Boson* die Bezeichnung *Z-Teilchen* verwendet.

Die fundamentalen Wechselwirkungen des Standardmodells beruhen auf Ladungssymmetrien<sup>10</sup> (aus diesen Symmetrien geht die Notwendigkeit und Existenz der Botenteilchen hervor), die jeweils nur einen freien Parameter besitzen (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015). Diese sogenannten *Kopplungsparameter* ( $\alpha_{em}$ ,  $\alpha_W$  und  $\alpha_s$ ) der fundamentalen Wechselwirkungen charakterisieren indirekt deren „Stärke“<sup>11</sup>. Sie beeinflussen unter anderem den Betrag der Kraft, die zwischen zwei wechselwirkenden Anti-/Teilchen wirkt. Weiterhin beeinflussen sie die Wahrscheinlichkeiten bestimmter Anti-/Teilchenumwandlungen. Die Kopplungsparameter werden sehr häufig auch als *Kopplungskonstanten* bezeichnet. Diese Bezeichnung ist unbedingt zu vermeiden, denn es handelt sich bei zum Beispiel bei dem *starken Kopplungsparameter*  $\alpha_s$  keineswegs um eine Konstante. Vielmehr ist dessen Wert stark abhängig von den Energien der an der Wechselwirkung beteiligten Anti-/Teilchen.

Außerdem ist in der Fachsprache der Begriff des *Teilchenzerfalls* etabliert. In diesem Zusammenhang werden unter anderem auch Begriffe wie *Zerfallskanal* oder *Zerfallsprodukte*

---

<sup>9</sup> Man sagt auch: ein Anti-/Teilchen strahlt ein Botenteilchen ab.

<sup>10</sup> sogenannte *lokale Eichsymmetrien*, Genauerer dazu findet man zum Beispiel in Netzwerk Teilchenwelt (2015).

<sup>11</sup> Das eigentliche Maß für die „Stärke“ der Wechselwirkungen sind die jeweiligen Kopplungsstärken  $g$ , welche über die Gleichung  $g = \sqrt{4\pi\alpha}$  mit den Kopplungsparametern verknüpft sind (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015).

verwendet. Diese Bezeichnung suggeriert allerdings, dass ein Anti-/Teilchen sich in andere Anti-/Teilchen umwandelt, die schon Bestandteil des ursprünglichen Anti-/Teilchens waren. Tatsächlich entstehen bei den sogenannten „Zerfällen“ vollkommen neue Anti-/Teilchen. Daher sollte besser der Begriff *Anti-/Teilchenumwandlung* verwendet werden. Dies trifft unter anderem auch auf die weit verbreitete Bezeichnung *Beta-Zerfall* zu, die durch *Beta-Umwandlung* ersetzt werden sollte. Der Zerfallsbegriff bietet sich lediglich in den Spezialfällen an, bei denen tatsächlich das Aufspalten von Anti-/Teilchen in Teilkomponenten gemeint ist. Ein Beispiel dafür wäre die Aussage, dass stabile Hadronen aufgrund der anziehenden Kraftwirkung der starken Wechselwirkung nicht in einzelne Anti-/Quarks zerfallen.

Für instabile Anti-/Teilchen lässt sich eine *mittlere Lebensdauer* ( $\tau$ ) angeben. Diese wird oft einfach als *Lebensdauer* abgekürzt. Diese Abkürzung ist allerdings missverständlich. Die *Lebensdauer* eines einzelnen instabilen Anti-/Teilchens kann nicht exakt vorhergesagt werden, da es sich bei Umwandlungen um stochastische Prozesse handelt (Stichwort Quantenobjekte). Es kann lediglich die *mittlere Lebensdauer* einer bestimmten Anti-/Teilchenart angegeben werden, welche der Zeit entspricht, nach der sich die Anzahl dieser Anti-/Teilchen aufgrund von Umwandlungen so verringert hat, dass sie nur noch einem Bruchteil  $\frac{1}{e}$  der ursprünglichen Anti-/Teilchenanzahl entspricht<sup>12</sup>. Diese *mittlere Lebensdauer* hängt unter anderem von der Anzahl der verschiedenen Umwandlungsmöglichkeiten des Anti-/Teilchens sowie von dessen Masse ab. Je massereicher ein instabiles Anti-/Teilchen ist, umso kürzer ist im Allgemeinen dessen *mittlere Lebensdauer* (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2013).

Weiterhin sollte die Formulierung „das Anti-/Teilchen trägt eine Ladung“ nicht benutzt werden. Diese Formulierung suggeriert die Vorstellung, dass sich die Ladung „auf dem Anti-/Teilchen befindet“ und unabhängig von diesem betrachtet, also insbesondere ohne weiteres „abgelegt“ werden könnte. Tatsächlich handelt sich aber bei den (den fundamentalen Wechselwirkungen zugeordneten) Ladungen um intrinsische und quantisierte Eigenschaften der Anti-/Teilchen. Zusammen mit der Masse<sup>13</sup> charakterisieren diese Eigenschaften ein Anti-/Teilchen eindeutig. Sie sind daher nicht veränderbar, ohne dass sich das Anti-/Teilchen unter Absorption bzw. Emission eines Botenteilchens in ein anderes Anti-/Teilchen umwandelt, wobei stets die Ladungserhaltung gilt (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015).

---

12 Dabei ist  $e$  die Eulersche Zahl.

13 Mit der Bezeichnung Masse ist im Folgenden immer die Ruhemasse eines Anti-/Teilchens gemeint.

Die möglichen Zustände<sup>14</sup> der starken Ladung werden durch die *Anti-/Farbladungsvektoren* (siehe Kapitel 3.4) charakterisiert. Quarks vom gleichen Typ aber mit unterschiedlichen Anti-/Farbladungsvektoren sind demnach als unterschiedliche Anti-/Teilchen aufzufassen.

Im Vergleich zur schwachen und starken Ladung spielt die *elektrische Ladung* im Physikunterricht schon früh eine Rolle, wobei häufig die Spezifikation „elektrisch“ weggelassen wird. Auch Physiker verwenden oft lediglich die Bezeichnung *Ladung*, wenn sie von der *elektrischen Ladung* sprechen und spezifizieren oft nur dann, wenn es um die schwache oder starke Ladung geht. Es ist allerdings dringend ratsam, stets und insbesondere auch schon während den ersten Auseinandersetzungen mit dem Elektromagnetismus, die *elektrische Ladung* klar als solche zu benennen. Dies dient zum einem dem Bestreben nach der Verwendung wissenschaftlich exakter Fachsprache und zum anderen wird dadurch die Einführung anderer Ladungsarten nicht zusätzlich erschwert. Verwechslungen und Fehlvorstellungen, etwa, dass schwache und starke Ladungen besondere Formen der elektrischen Ladung sind, können auf diese Weise vorgebeugt werden.

Aus denselben Gründen sollte die Bezeichnung „geladenes (bzw. neutrales) Anti-/Teilchen“ stets durch Hinzunahmen des gemeinten Ladungstyps spezifiziert werden (z.B. „elektrisch geladenes Anti-/Teilchen“). Leider wird selbst in den deutschen Lehrplänen eine entsprechende Bezeichnung nicht konsequent verwendet. In den Lehrplänen der Bundesländer Bayern, Hessen, Niedersachsen, Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern wird sogar vollständig auf die Bezeichnung „elektrische Ladung“ verzichtet (vgl. BSUK, 2004; HKM, 2010; MBSJ, 2011; MBWK-MV, 2006; NKM, 2009). In den meisten anderen Lehrplänen ist die Bezeichnung inkonsistent (vgl. KMSA, 2003; MBFFK, 2008; MBWFK, 2002; MBWK-TH, 2012; MBWW, o.J; MSW, 2014; SBW, 2008; SMK, 2011).

### 3.2 Einheiten in der Teilchenphysik

In der Teilchenphysik ist es üblich, Energien nicht in der Einheit Joule (J) sondern in Elektronenvolt (eV) anzugeben<sup>15</sup>. Die Einführung dieser Einheit bietet sich im Zusammenhang mit Betrachtungen zu bewegten elektrischen Ladungen in Feldern an, ist jedoch nur in Sachsen und im Saarland explizit im Lehrplan vorgesehen (vgl. MBFFK, 2008; SMK, 2001).

---

<sup>14</sup> Hier muss von Zustand anstatt von Wert gesprochen werden, da die starke Ladung vektoriellen Charakter besitzt.

<sup>15</sup>  $1\text{eV} \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Ein Elektronenvolt entspricht dabei der Zunahme der kinetischen Energie eines Elektrons, welches eine Beschleunigungsspannung von einem Volt durchläuft. Ausgehend von dieser Einheit der Energie ergeben sich die in der Teilchenphysik verwendeten Einheiten der Masse und des Impulses. Aus der Beziehung  $E = \gamma \cdot m \cdot c^2$  ergibt sich für die Masse die Einheit  $\frac{eV}{c^2}$ . Dabei ist  $\gamma$  der Lorentzfaktor<sup>16</sup> und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit.

Der Impuls eines Anti-/Teilchens berechnet sich aus  $p = \gamma \cdot m \cdot v$ . Daraus ergibt sich die teilchenphysikalische Einheit des Impulses zu  $\frac{eV}{c}$ . Meist verwendet man sogenannte *natürliche Einheiten*. Dabei wird  $\hbar = c = 1$  gesetzt<sup>17</sup>, wobei  $\hbar$  das reduzierte Plancksche Wirkungsquantum ist. Dadurch besitzen die Energie, die Masse und der Impuls die gleiche Einheit (eV), was unter anderem Berechnungen vereinfacht.

In den folgenden Ausführungen werden keine natürlichen Einheiten verwendet und dementsprechend die Lichtgeschwindigkeit in den Einheiten der Masse und des Impulses mitgeführt. Dafür gibt es verschiedene Gründe. Zum einen erscheint die Nutzung natürlicher Einheiten als willkürlich und es müsste mit den Schülern ausführlich diskutiert werden, warum dies in der Teilchenphysik sinnvoll ist. Zum anderen ist durch das Mitführen der Lichtgeschwindigkeit in den Einheiten sofort eindeutig erkennbar, um welche physikalische Größe es sich handelt.

Wenn Berechnungen durchgeführt werden, können diese so außerdem anhand von Dimensionsbetrachtungen einfacher kontrolliert werden. Bei der Behandlung der Teilchenphysik in der Schule spricht also vieles dafür, auf die Verwendung natürlicher Einheiten zu verzichten. Dennoch sollte darauf hingewiesen werden, dass deren Verwendung gängige Praxis ist. So kann Verständnisproblemen bei der selbstständigen Auseinandersetzung mit Fachtexten vorgebeugt werden.

---

16 Der Lorentzfaktor beschreibt die relativistische Änderung der Anti-/Teilchenmasse in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Anti-/Teilchens und berechnet sich durch:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

17 Außerdem wird die Boltzman-Konstante  $k_B = 1$  gesetzt. Diese spielt allerdings in den nachfolgenden Betrachtungen keine Rolle. Die in der Teilchenphysik verwendeten natürlichen Einheiten unterscheiden sich von den Planck-Einheiten also nur darin, dass die Gravitationskonstante  $G$  ihren Wert beibehält und nicht gleich Eins gesetzt wird. Grund dafür ist, dass die Gravitation in der Teilchenphysik keine Rolle spielt.

### 3.3 Feynman-Diagramme

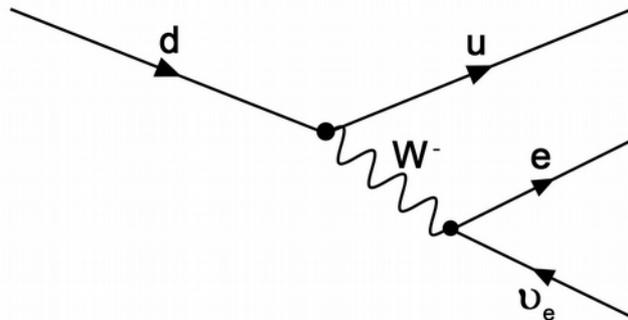


Abbildung 2: Feynman-Diagramm einer Beta-Umwandlung

In der Teilchenphysik dienen Feynman-Diagramme<sup>18</sup> zur Veranschaulichung von Wechselwirkungen zwischen Anti-/Teilchen in Form eines Ort-Zeit-Diagramms. Ein Beispiel für ein solches Feynman-Diagramm ist die Darstellung einer Beta-Umwandlung (ohne Berücksichtigung der unbeteiligten Quarks des Neutrons bzw. Protons) in Abbildung 2.

Feynman-Diagramme haben allerdings nicht nur visualisierenden Charakter, sondern können ebenfalls als gezeichnete Rechenregeln angesehen werden. Um diesem Sachverhalt gerecht werden zu können, müssen bei deren Verwendung klare Regeln befolgt werden. Dies kann zum Beispiel mit den Regeln verglichen werden, die eingehalten werden müssen, wenn Kräfte durch Vektoren dargestellt und addiert werden<sup>19</sup> (vgl. Dunne, 2001). Leider werden wichtige Regeln bei der Verwendung von Feynman-Diagrammen selbst in physikalischer Fachliteratur nicht ausreichend beachtet. Stattdessen werden diese Diagramme oft nur als informative Visualisierung teilchenphysikalischer Prozesse anstatt als formale Werkzeuge angesehen (vgl. Dunne, 2001). Insgesamt ist die Verwendung dieser Darstellungsform wenig konsistent. Aus diesem Grund werden im Folgenden wesentliche Aspekte diskutiert, die bei der Einführung und Verwendung von Feynman-Diagrammen beachtet werden sollten (vgl. Dunne, 2001; Netzwerk Teilchenwelt, 2015), selbst wenn die Feynman-Diagramme nicht als Grundlage für Berechnungen eingesetzt werden.

Vor der Behandlung der eigentlichen Feynman-Diagramme bietet es sich an, zuerst die Darstellung von Wechselwirkungen in Ort-Ort-Diagrammen einzuführen. Dadurch kann die Anschluss-

18 Feynman-Diagramme wurden von Richard Feynman im Zusammenhang mit der Entwicklung der Quantenelektrodynamik in den späten vierziger und frühen fünfziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts eingeführt und werden seitdem verwendet (vgl. Dunne, 2001).

19 Dabei charakterisiert zum Beispiel die Länge der Vektoren den Betrag der zugeordneten Kraft und ein geschlossener Polygonzug aus Vektoren symbolisiert ein Kräftegleichgewicht.

fähigkeit an den bisherigen Physikunterricht erhöht werden. Wie eine solche Annäherung an die eigentlichen Feynman-Diagrammen stattfinden kann, wird in Netzwerk Teilchenwelt (2015) vorgestellt.

In den hier verwendeten Feynman-Diagrammen befindet sich die Zeitachse stets in horizontaler Richtung. Bei der Verwendung solcher Diagramme ist darauf zu achten, dass eine einheitliche Orientierung der Zeitachse beibehalten wird.

Unterschiedliche Anti-/Teilchentypen werden durch verschiedene Arten von Linien dargestellt<sup>20</sup> (siehe Abb. 3). Die Linien von Anti-/Materieteilchen werden mit kleinen Pfeilen versehen, welche veranschaulichen, ob es sich um ein Teilchen oder ein Anti-Teil-

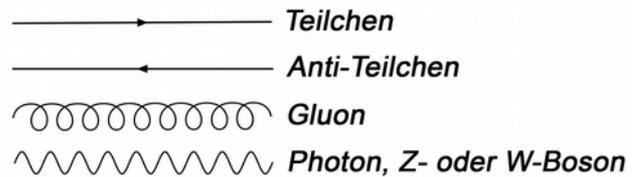


Abbildung 3: Linientypen in Feynman-Diagrammen

chen handelt. Bei Teilchen zeigen die Pfeile in positive Zeitrichtung, bei Anti-Teilchen in negative Zeitrichtung. Da die Pfeilrichtung charakterisiert, ob es sich um ein Teilchen oder ein Anti-Teilchen handelt, werden die Linien in Feynman-Diagrammen stets mit den Symbolen der Teilchen beschriftet, auch wenn es sich um ein Anti-Teilchen handelt. Im Unterricht ist dringend darauf hinzuweisen, dass die Pfeile keine Aussage über die Bewegungsrichtung der Anti-/Teilchen treffen.

Es sollte zudem darauf geachtet werden, dass die Linien der einlaufenden bzw. auslaufenden Anti-/Teilchen jeweils zum gleichen Zeitpunkt beginnen bzw. enden. Dies ist bei vielen in der Fachliteratur verwendeten Feynman-Diagrammen nicht der Fall, was schnell zu Fehlinterpretationen führen kann. Zum Beispiel zu der Annahme, dass ein auslaufendes Anti-/Teilchen plötzlich auf mysteriöse Weise verschwindet, wenn dessen Linie in Zeitrichtung gesehen eher endet als die eines anderen auslaufenden Anti-/Teilchens.

Da es sich bei Feynman-Diagrammen um zweidimensionale Ort-Zeit-Diagramme handelt, kann lediglich die Bewegung der Anti-/Teilchen in einer Ortsdimension dargestellt werden. Die Linien repräsentieren dementsprechend auch nicht die Bahnkurven der Anti-/Teilchen<sup>21</sup>. Die räumlich eindimensionale Projektion des betrachteten Wechselwirkungsprozesses lässt daher auch nur Rückschlüsse auf eine Komponente des Geschwindigkeitsvektors der dargestellten Anti-/Teilchen zu (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015).

<sup>20</sup> Teilweise werden Photonen sowie Z- und W-Teilchen auch durch gestrichelte Linien symbolisiert.

<sup>21</sup> Da es sich bei den Anti-/Teilchen um Quantenobjekte handelt, kann ohnehin nicht von der Bahnkurve eines Anti-/Teilchens gesprochen werden.

Die Punkte in Feynman-Diagrammen, an welchen sich die Linien von Anti-/Teilchen treffen, werden als Vertices (Singular: Vertex) bezeichnet. Sie markieren eine Wechselwirkung der Anti-/Teilchen, deren Linien am Vertex zusammenlaufen. Prinzipiell lassen sich sämtliche hier betrachteten Feynman-Diagramme durch die Verkettung von vier fundamentalen Vertices konstruieren<sup>22</sup> (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015). Dabei handelt es sich um die Vertices der Erzeugung eines Teilchen-Anti-Teilchen-Paares durch die Umwandlung eines Botenteilchens (Paarerzeugung), der Annihilation eines Teilchen-Anti-Teilchen-Paares unter Erzeugung eines Botenteilchens (Paarvernichtung) sowie der Emission und der Absorption eines Botenteilchens durch ein Anti-/Materieteilchen. Diese fundamentalen Vertices sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Linien sind hier nicht beschriftet, da es sich um allgemeine Darstellungen der fundamentalen Vertices handelt.

Bei dem Botenteilchen kann es sich um ein beliebiges Botenteilchen, also insbesondere auch um ein Gluon, handeln (in diesem Fall müsste allerdings der Linientyp eines Gluons verwendet werden). Entscheidend ist lediglich, dass das bzw. die beteiligten Anti-/Materie-Teilchen eine Ladung besitzen, an die das beteiligte Botenteilchen koppelt. Im Falle eines beteiligten Gluons muss es sich demnach um Quarks bzw. Anti-Quarks handeln. Ebenso können sowohl Teilchen als auch Anti-Teilchen Botenteilchen emittieren bzw. absorbieren. Bei der Emission und Absorption eines Botenteilchens ist zudem zu beachten, dass sich der Impuls des emittierenden bzw. absorbierenden Anti-/Teilchens ändert, weshalb es sich nach der Wechselwirkung nicht in die gleiche Richtung fortbewegt wie davor (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015).

Die fundamentalen Vertices können durch Rotation der Anti-/Teilchenlinien um den Vertex ineinander überführt werden (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015). Unterzieht man den fundamentalen Vertex eines realisierbaren Prozesses<sup>23</sup> (z.B. der Emission eines bestimmten Botenteilchens durch ein bestimmtes Anti-/Materieteilchen) einer solchen Rotation, erhält man den Vertex eines anderen Prozesses. Dieser ist in jedem Fall ebenfalls realisierbar. Dabei ist zu beachten, dass sich die am Prozess beteiligten Anti-/Teilchen durch die Rotation ändern können. Wenn aus einer einlaufenden Linie eine auslaufende Linie wird (oder umgekehrt), ändert sich die Pfeilrichtung. Das bedeutet, dass aus einem Anti-Materieteilchen ein Materieteilchen wird bzw. umgekehrt. Durch Kenntnis eines realisierbaren Prozesses können also durch Rotation drei weitere realisierbare Prozesse hergeleitet werden. Diese Möglichkeit wird in Kapitel 3.5 zur Vor-

---

22 Da Gluonen und W-Teilchen selbst die Ladung der Wechselwirkung besitzen, die sie vermitteln, können sie jeweils untereinander koppeln. Es können also mehrere Gluonen bzw. W-Teilchen einen gemeinsamen Vertex besitzen, wodurch sich weitere mögliche Vertices ergeben (unter anderem auch Vertices mit mehr als drei Linien). Diese werden hier allerdings nicht betrachtet.

23 Damit ist ein Prozess gemeint, der in der Natur tatsächlich vorkommt.

hersage möglicher Umwandlungsprodukte bei der Paarerzeugung aus einem Z-Teilchen verwendet.

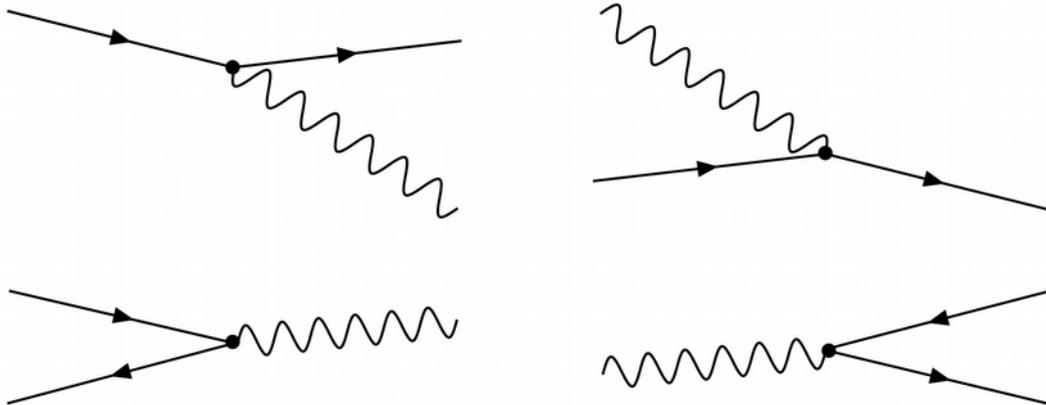


Abbildung 4: Die vier fundamentalen Vertices zur Konstruktion von Feynman-Diagrammen.  
o. l.: Emission eines Botenteilchens, o. r.: Absorption eines Botenteilchens,  
u. l.: Paarvernichtung, u. r.: Paarerzeugung

An jedem Vertex und somit auch für das gesamte zusammengesetzte Feynman-Diagramm gelten sowohl Energie- als auch Impuls-Erhaltung sowie die Erhaltung der elektrischen, schwachen und starken Ladung.

Wechselwirkende Anti-/Teilchen müssen nicht zwangsläufig einen gemeinsamen Vertex besitzen, da der Begriff Wechselwirkung, wie in Kapitel 3.1 beschrieben wurde, auch andere Prozesse umfasst als jene, die durch die fundamentalen Vertices beschrieben werden. Ein Beispiel dafür ist die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen zwei Elektronen (Elektron-Elektron-Streuung), die in Abbildung 5 in Form eines Feynman-Diagramms dargestellt ist. Das vermittelnde Botenteilchen ist ein Photon. Wechselwirkungen zwischen zwei Anti-/Materieteilchen können also in Feynman-Diagrammen dadurch dargestellt werden, dass beide an der Wechselwirkung teilnehmenden Anti-/Teilchen jeweils einen Vertex mit demselben Botenteilchen besitzen, welches die Wechselwirkung vermittelt.

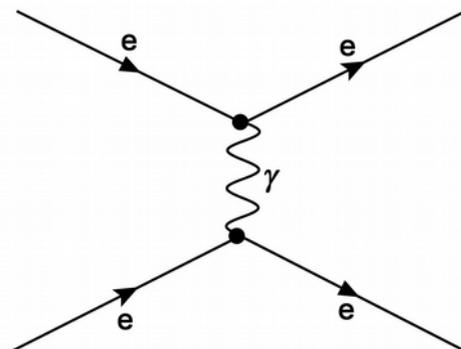


Abbildung 5: Feynman-Diagramm der Elektron-Elektron-Streuung

Mit Hilfe von Rechenregeln lassen sich die Wahrscheinlichkeiten für die Realisierung bestimmter Prozesse berechnen. Auf diese Rechenregeln kann an dieser Stelle nicht ausführlich eingegangen werden. Sie werden in Netzwerk Teilchenwelt (2015) thematisiert. Tiefer gehende

Auseinandersetzungen mit dem sogenannten Feynman-Kalkül findet man unter anderem online<sup>24</sup> oder bei Schmüser (1995).

Allgemein kann gesagt werden, dass ein Prozess umso unwahrscheinlicher wird, je mehr Vertices das zugehörige Feynman-Diagramm besitzt. Wenn Berechnungen zur Wahrscheinlichkeit für beobachtbare Prozesse angestellt werden sollen, müssen stets alle Feynman-Diagramme berücksichtigt werden, die denselben End- und Anfangszustand besitzen. Je komplizierter diese Diagramme sind, umso unwahrscheinlicher wird allerdings deren Realisierung, da die Anzahl der Vertices steigt. Im Folgenden werden nur Feynman-Diagramme niedrigster Ordnung betrachtet. Dies sind jene mit der minimalen Anzahl an Vertices, welche den zu beschreibenden Prozess veranschaulichen.

Für die Betrachtungen in Kapitel 4.3.3 ist es notwendig, den Zusammenhang zwischen der Anzahl der Vertices im Feynman-Diagramm und der Wahrscheinlichkeit des dargestellten Prozesses zu quantifizieren. Für jeden Vertex kommt ein Faktor in der Berechnung der Wahrscheinlichkeit hinzu, welcher direkt proportional zum Kopplungsparameter derjenigen Wechselwirkung ist, deren Botenteilchen am Vertex vertreten ist. Handelt es sich also zum Beispiel um einen Vertex, der die Emission eines Gluons durch ein Anti-/Quark darstellt, so ist der in die Berechnung der Wahrscheinlichkeit eingehende Faktor proportional zum starken Kopplungsparameter  $\alpha_s$ .

### 3.4 Die Anti-/Farbladungsvektoren

Wie bereits angesprochen wurde, wird der Wert der starken Ladung von Anti-/Teilchen nicht mit Hilfe einer Ladungszahl angegeben, wie es bei der elektromagnetischen und der schwachen Ladung der Fall ist. Stattdessen übernehmen diese Rolle zweidimensionale Anti-/Farbladungsvektoren. Die starke Ladung besitzt also einen Vektorcharakter<sup>25</sup>. Die Farb- und Anti-Farbladungsvektoren können auf einem zweidimensionalen Gitter dargestellt werden, welches auch als Farbgitter bezeichnet wird (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015). Die Achsen des zugehörigen Koordinatensystems schließen jeweils einen Winkel von  $120^\circ$  ein. Das Farbgitter mit Koordinatensystem ist in Abbildung 6 dargestellt. Die möglichen Farbladungsvektoren der Quarks entsprechen den Einheitsvektoren auf dem Farbgitter. Diese werden mit „rot“, „blau“ und

---

24 [http://erlangen.physicsmasterclasses.org/msm\\_feyn/msm\\_feyn\\_00.html](http://erlangen.physicsmasterclasses.org/msm_feyn/msm_feyn_00.html).

25 Genau genommen besitzt auch die schwache Ladung Vektorcharakter. Allerdings spielt nur eine Komponente des dreidimensionalen Vektors in den hier betrachteten Fällen eine Rolle. Die Anti-/Farbladungsvektoren besitzen eigentlich sogar acht Komponenten. Davon sind allerdings nur zwei für die hier angestellten Betrachtungen relevant (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015).

„grün“ bezeichnet<sup>26</sup> und sind in Abbildung 7 zu sehen. Anti-Quarks besitzen entsprechende Anti-Farbladungsvektoren. Diese werden mit „anti-rot“, „anti-blau“ und „anti-grün“ bezeichnet. Man erhält sie jeweils durch Multiplikation der zugeordneten Farbladungsvektoren mit dem Faktor -1. Die Anti-Farbladungsvektoren der Anti-Quarks sind in Abbildung 8 dargestellt.

Gluonen, die Botenteilchen der starken Wechselwirkung, besitzen jeweils einen Farb- und einen Anti-Farbladungsvektor. Durch Emission bzw. Absorption eines Gluons ändert sich der Anti-/Farbladungsvektor eines Anti-/Quarks. Um die Anti-/Farbladungsvektoren von Anti-/Quarks zu kennzeichnen, bietet es sich an, den Symbolen der Anti-/Quarks die Anti-/Farbladungsvektoren als hochgestellte Indizes hinzuzufügen (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015). Ein Up-Quark mit einem roten, blauen bzw. grünen Farbladungsvektor wird also wie folgt symbolisiert:



Für ein Anti-Up-Quark mit anti-rot, anti-blauem bzw. anti-grünem Farbladungsvektor werden entsprechend die folgenden Symbole verwendet:



Bei den anderen Anti-/Quark-Arten erfolgt die Indizierung analog.

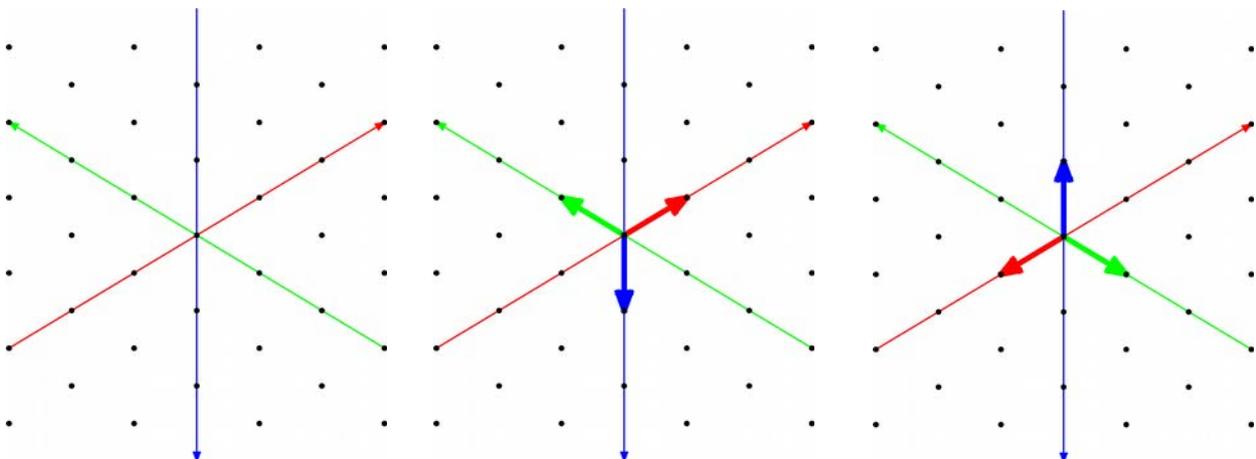


Abbildung 6: Das zweidimensionale Farbgitter

Abbildung 7: Die drei Farbladungsvektoren der Quarks

Abbildung 8: Die drei Anti-Farbladungsvektoren der Anti-Quarks

Weitere Informationen zu den starken Farbladungsvektoren können unter anderem Netzwerk Teilchenwelt (2015) entnommen werden. An dieser Stelle soll lediglich ein weiterer didaktischer Aspekt diskutiert werden, welcher bei der Auseinandersetzung mit den Anti-/Farbladungsvektoren zu berücksichtigen wäre.

<sup>26</sup> In Analogie zur additiven Farbmischung ergibt die Summe der drei unterschiedlichen Farbladungsvektoren den Nullvektor, was einer Farbneutralität bezüglich der starken Wechselwirkung entspricht.

Den Lernenden muss deutlich gemacht werden, dass es sich bei der Bezeichnung *Farbladungsvektor* nicht um eine Farbe im optischen Sinne handelt, wie sie makroskopischen Körpern zugeordnet werden kann. Die Schüler sollten zum Zeitpunkt der Auseinandersetzung mit der Elementarteilchenphysik zwar bereits hinreichend mit der Verwendung von Modellen in der Physik vertraut sein, jedoch gilt es trotzdem, möglichen Fehlinterpretationen vorzubeugen. Eine häufige Fehlvorstellung bei Schülern ist die Annahme, dass sich Eigenschaften von makroskopischen Körpern (wie z.B. die Farbe) auf ihre elementaren Bestandteile übertragen (vgl. Duit, 2004; Fischler & Leichtfeld, 2004). Bereits ab den ersten Auseinandersetzungen mit Teilchenmodellen im Physikunterricht sollte dieser Tatsache Rechnung getragen und versucht werden, die Entstehung bzw. Verfestigung solcher Vorstellungen zu vermeiden. Um dieses Bestreben auch bei der Behandlung der Teilchenphysik fortzuführen, sollte daher stets die Bezeichnung *Farbladungsvektor* oder zumindest *Farbladung* verwendet und unbedingt auf die Abkürzung *Farbe* verzichtet werden.

### 3.5 Die Multipletts der Ladungen

In diesem Abschnitt wird vorgestellt, wie Anti-/Teilchen bezüglich der elektrischen, schwachen und starken Ladung in Multipletts geordnet werden können (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015). Diese Ordnung gibt Auskunft darüber, welche Anti-/Teilchenumwandlungen möglich sind und welche Umwandlungsprodukte bei Paarerzeugungen aus Botenteilchen entstehen können. Hierbei wird vor allem die Ordnung der Anti-/Teilchen in Multipletts bezüglich der schwachen Ladung betrachtet, da aus diesen die Umwandlungskanäle des Z-Teilchens bestimmt werden können.

Die elektrische, die schwache und die starke Ladung sind unveränderliche Eigenschaften der Anti-/Teilchen des Standardmodells. Bei allen Anti-/Teilchenumwandlungen gilt streng die Erhaltung dieser drei Ladungen. Die Umwandlung eines Anti-/Materieteilchens geschieht über die Emission oder Absorption eines Botenteilchens. Im Falle der schwachen Wechselwirkung also über die Emission bzw. Absorption eines  $W^+$ - oder  $W^-$ -Teilchens<sup>27</sup>.

Die teilchenphysikalischen Experimente der Vergangenheit haben gezeigt, dass nicht alle Anti-/Teilchenumwandlungen realisiert werden, die die Forderung der Ladungserhaltung erfüllen. Anti-/Teilchen lassen sich in Multipletts bezüglich der Ladungen ordnen.

---

<sup>27</sup> Bei der Emission bzw. der Absorption eines Z-Teilchens findet keine Umwandlung des abstrahlenden bzw. absorbierenden Anti-/Teilchens statt.

Anti-/Teilchenumwandlungen geschehen stets nur innerhalb eines solchen Multipletts. Die Anzahl der Multipletts und der darin enthaltenen Anti-/Teilchen geht genau wie die Anzahl der existierenden Anti-/Materieteilchen nicht aus dem Standardmodell hervor, sondern ist eine rein experimentelle Erkenntnis.

Bezüglich der schwachen Ladung bilden die Anti-/Teilchen Dupletts aus jeweils zwei Anti-/Teilchen. Innerhalb eines Dupletts unterscheiden sich die elektrische Ladungszahl ( $q$ ) und die schwache Ladungszahl ( $I$ ) stets um den Betrag eins. Ein Duplett bezüglich der schwachen Ladung bilden zum Beispiel Elektron-Neutrino und Elektron. Ein anderes Top- und Bottom-Quark. Ein Anti-Teilchen-Duplett bilden zum Beispiel Anti-Down-Quark und Anti-Up-Quark.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \quad I = \frac{1}{2}, q = 0 \\ I = -\frac{1}{2}, q = -1$$

$$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad I = \frac{1}{2}, q = \frac{2}{3} \\ I = -\frac{1}{2}, q = -\frac{1}{3}$$

$$\begin{pmatrix} \bar{d} \\ \bar{u} \end{pmatrix} \quad I = \frac{1}{2}, q = \frac{1}{3} \\ I = -\frac{1}{2}, q = -\frac{2}{3}$$

Die Anordnung der Anti-/Teilchen in den Dupletts wurde so festgelegt, dass das Anti-/Teilchen mit der schwachen Ladungszahl  $I = \frac{1}{2}$  im Duplett oben steht. Bezüglich der schwachen Wechselwirkung bilden die Leptonen genau die folgenden drei Dupletts:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

Analog bilden die Anti-Leptonen ebenfalls drei Dupletts. Man erhält diese durch Austausch der Teilchen durch ihre Anti-Teilchen und anschließende Vertauschung der Position im Duplett. Die Erhaltungssätze bezüglich der Ladungen würden eine Vielzahl weiterer Dupletts erlauben. Weshalb nur genau diese Anti-/Leptonen-Dupletts bezüglich der schwachen Ladung existieren, ist eine ungeklärte Frage der Teilchenphysik.

Anhand der gefundenen Dupletts lassen sich Anti-/Teilchen in Generationen (auch Familien genannt) ordnen. Elektron und Elektron-Neutrino bilden die erste Leptonengeneration. Myon und Myon-Neutrino entsprechend die zweite und Tauon und Tauon-Neutrino die dritte. Analog existieren drei Generationen von Anti-Leptonen. Bei den Anti-/Teilchen der zweiten und dritten Generation handelt es sich jeweils um „schwerere Kopien“ der Anti-/Teilchen der ersten Generation. Dies bedeutet, dass sich die entsprechenden Anti-/Teilchen lediglich in ihren Massen

unterscheiden. Die Generationen der elementaren Materieteilchen sind in Abbildung 9 angegeben. Dort sind die Farbladungsvektoren der Quarks durch farbige Dreiecke visualisiert.

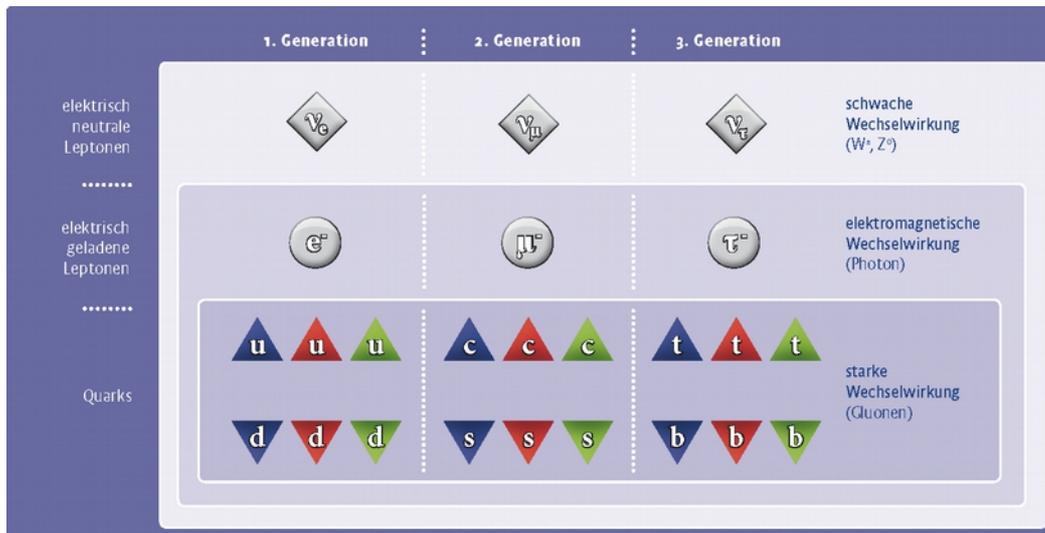


Abbildung 9: Die drei Generationen der elementaren Materieteilchen

Multipletts existieren auch bezüglich der starken und der elektrischen Ladung. Bezüglich der starken Ladung bilden Anti-/Quarks Farbtripletts. Alle anderen Anti-/Materieteilchen besitzen keine starke Ladung und nehmen daher nicht an der starken Wechselwirkung teil. Sie können sich also insbesondere auch nicht über diese umwandeln. In der Multiplett-Interpretation bedeutet dies, dass diese Anti-/Teilchen Singulettts bezüglich der starken Ladung (Farbsingulettts) bilden. Über die elektrische Wechselwirkung finden überhaupt keine Anti-/Teilchenumwandlungen statt. Daher bilden bezüglich der elektrischen Ladung alle Anti-/Teilchen Singulettts.

Die existierenden Dupletts bezüglich der schwachen Wechselwirkung geben Auskunft darüber, welche Anti-/Teilchenumwandlungen über die Emission bzw. die Absorption von Botenteilchen stattfinden können. In Kapitel 3.3 wurde dargelegt, dass der fundamentale Vertex der Emission eines Botenteilchens durch Rotation in den fundamentalen Vertex der Paarerzeugung aus einem Botenteilchen überführt werden kann. Die möglichen Kombinationen aus Anti-/Teilchen, die bei einer Paarerzeugung entstehen können, sind also ebenfalls durch die Dupletts vorgegeben. Für die weiteren Betrachtungen ist vor allem von Interesse, welche Anti-/Teilchen bei der Umwandlung eines Z-Teilchens durch Paarerzeugung entstehen können.

Da sich die elektrische und die schwache Ladungszahl der Anti-/Teilchen innerhalb eines Dupletts immer um den Betrag eins unterscheiden, kann aufgrund der Erhaltung der Ladungen bei der Emission eines Z-Teilchens keine Anti-/Teilchenumwandlung stattfinden<sup>28</sup>. Daraus folgt,

<sup>28</sup> Das Z-Teilchen besitzt weder eine elektrische noch eine schwache oder starke Ladung.

dass bei der Paarerzeugung aus einem Z-Teilchen stets nur ein Teilchen und sein zugehöriges Anti-Teilchen entstehen können.

Überführt man zum Beispiel den Vertex der Emission eines Z-Teilchens durch ein Elektron durch Rotation in den fundamentalen Vertex der Paarerzeugung, so ergibt sich automatisch die Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Elektron-Positron-Paar (siehe Abb. 10).

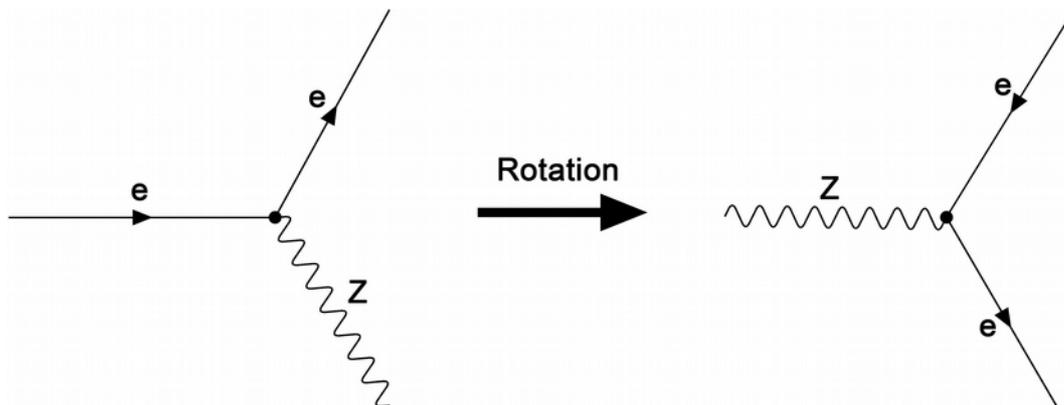


Abbildung 10: Überführung des Vertex der Emission eines Z-Teilchens durch ein Elektron in den Vertex der Paarerzeugung eines Elektron-Positron-Paares aus einem Z-Teilchen durch Rotation

Analog erhält man sämtliche möglichen Kombinationen für Umwandlungsprodukte, die bei der Paarerzeugung aus einem Z-Teilchen entstehen können. Die Umwandlungskanäle des Z-Teilchens werden in Kapitel 4.3.2 ausführlich diskutiert.

Der vorgestellte Zusammenhang zwischen den fundamentalen Vertices lässt sich letztendlich vollständig auf die Prinzipien der Ladungserhaltung zurückführen. Anstatt durch Rotation des Vertex eines Prozesses kann der Zusammenhang auch arithmetisch betrachtet werden. Unter diesem Gesichtspunkt kann die Emission eines Z-Teilchens durch ein Elektron als Gleichung wie folgt formuliert werden:

$$e^- = e^- + Z$$

Durch Umstellen der Gleichung nach Z erhält man die zum Prozess der Paarerzeugung aus einem Z-Teilchen gehörige Gleichung:

$$Z = (e^- - e^-)$$

Die Umkehrung des Vorzeichens des Elektrons bedeutet hier die Umkehrung aller Ladungen des Elektrons, also genau die Überführung in sein Anti-Teilchen, das Positron. Die Gleichung kann also geschrieben werden als:

$$Z = (e^- + e^+)$$

Dieser Zusammenhang kann auch in vektorieller Schreibweise formuliert werden. Dabei kann man die elektrische Ladungszahl ( $q$ ), die schwache Ladungszahl ( $I$ ) und den starken Farbladungsvektor ( $\vec{L}$ ) eines Anti-/Teilchens in einem Spaltenvektor wie folgt zusammenfassen:

$$\begin{pmatrix} q \\ I \\ \vec{L} \end{pmatrix}_Z$$

Die Indizierung gibt an, um welches Anti-Teilchen es sich handelt. In dem obigen Beispiel soll es sich um den Vektor der Ladungen des Z-Teilchens handeln.

In dieser Formulierung gilt bei der Emission eines Z-Teilchens durch ein Elektron:

$$\begin{pmatrix} -1 \\ -\frac{1}{2} \\ \vec{0} \end{pmatrix}_{e^-} = \begin{pmatrix} -1 \\ -\frac{1}{2} \\ \vec{0} \end{pmatrix}_{e^-} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vec{0} \end{pmatrix}_Z$$

Durch Umformung in die Vektorgleichung für die Paarerzeugung ergibt sich:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vec{0} \end{pmatrix}_Z = \begin{pmatrix} -1 \\ -\frac{1}{2} \\ \vec{0} \end{pmatrix}_{e^-} - \begin{pmatrix} -1 \\ -\frac{1}{2} \\ \vec{0} \end{pmatrix}_{e^-}$$

Gemäß den Regeln der Vektorrechnung lässt sich diese Gleichung auch wie folgt schreiben:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vec{0} \end{pmatrix}_Z = \begin{pmatrix} -1 \\ -\frac{1}{2} \\ \vec{0} \end{pmatrix}_{e^-} + \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{2} \\ \vec{0} \end{pmatrix}_{e^+}$$

Der zweite Summand auf der rechten Seite entspricht gerade dem Vektor der Ladungen des Positrons. Dieses besitzt als Anti-Teilchen des Elektrons eben genau die entgegengesetzten Ladungen. Das Z-Teilchen wandelt sich also in ein Elektron-Positron-Paar um.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass neben der Erhaltung der Ladungen eine weitere Einschränkung für Anti-/Teilchenumwandlungen gilt: Über die fundamentalen Wechselwirkungen können sich nur Anti-/Teilchen ineinander umwandeln, die sich in einem gemeinsamen Multiplett bezüglich der Ladung der entsprechenden Wechselwirkung befinden. Die Existenz sowie die Anzahl dieser Multipletts wird nicht vom Standardmodell vorhergesagt. Dasselbe gilt für die Anordnung und Anzahl der Anti-/Teilchen in den Multipletts. Die genannten Aspekte sind allesamt experimentelle Erkenntnisse.

Ist ein realisierbarer Prozess mit dem zugehörigen fundamentalen Vertex bekannt, so lassen sich auf die zwei oben beschriebenen Arten weitere realisierbare Prozesse herleiten. Der Ansatz für beide Varianten ist letztendlich die Erhaltung der Ladungen.

Beide Varianten können prinzipiell im Unterricht diskutiert werden. Durch die Betrachtung der Rotationen der fundamentalen Vertices kann die Bestimmung weiterer realisierbarer Prozesse auf ikonischer Ebene geschehen, während die vektorielle Formulierung auf symbolischer Ebene stattfindet.

Die Verwendung der symbolischen Formulierung birgt eine Schwierigkeit. Zwar handelt es sich um nichts anderes als um die Formulierung eines Gleichungssystems in vektorieller Schreibweise, allerdings ist die dritte Komponente des Vektors selbst ein Vektor. Diese Schreibweise fordert von den Schülern ein hohes Maß an Abstraktionsvermögen und entsprechend gefestigte Kenntnisse der Vektorrechnung.

## **4 Fachliche Hintergrundinformationen für Lehrkräfte**

Im Folgenden wird auf die Funktionsweise sowie den Aufbau des Large Electron-Positron Colliders (LEP) sowie des OPAL-Detektors eingegangen, wobei nicht alle Aspekte diskutiert werden können. Insbesondere die fachlichen Grundlagen zu Teilchenbeschleunigern und Kollisionsexperimenten müssen als bekannt vorausgesetzt werden. Die entsprechenden Informationen können unter anderem den Materialien von Netzwerk Teilchenwelt (2013, 2015) entnommen werden.

Weiterhin wird das OPAL-Eventdisplay vorgestellt, welches es ermöglichte die vom OPAL-Detektor gesammelten Daten zu visualisieren. In diesem Zusammenhang wird darauf eingegangen, wie sich die verschiedenen Anti-/Teilchen des Standardmodells anhand ihrer Signaturen im OPAL-Detektor bzw. im Eventdisplay unterscheiden lassen.

Anschließend werden die unterschiedlichen Umwandlungskanäle des Z-Teilchens diskutiert und einige Forschungsergebnisse vorgestellt, die durch Beobachtung von Z-Umwandlungen am LEP und der Auswertung der dabei gesammelten Daten gewonnen werden konnten.

### **4.1 Der Large Electron-Positron Collider (LEP)**

Im diesem Kapitel werden Informationen zum Aufbau und zur Funktionsweise des LEP gegeben (vgl. Aßmann, Lamont & Meyers; 2002 Schopper, 2009; <http://home.web.cern.ch/about/accelerators/large-electron-positron-collider>). Anschließend werden einige Forschungsziele beschrieben, die bei den Experimenten an diesem Teilchenbeschleuniger erreicht werden sollten.

#### **4.1.1 Aufbau und Funktionsweise des LEP**

Bis heute ist der Large Electron-Positron Collider (LEP) der größte jemals gebaute Elektron-Positron-Beschleuniger. Bei LEP handelte es sich um einen Beschleunigerring, welcher von 1989 bis 2000 von der Europäischen Organisation für Kernforschung (CERN) betrieben wurde. Die ersten Elektron-Positron-Kollisionen fanden am 13. August 1989 statt. LEP befand sich im selben nahe Genf angelegten Tunnel, in welchem heute der Large Hadron Collider (LHC) betrieben wird. Dieser Tunnel ist etwa 27 Kilometer lang und besitzt einen Durchmesser von ca. 3,8 Metern.

Im Gegensatz zur Erzeugung der notwendigen Elektronen durch Glühemission war die Gewinnung der Positronen aufwändiger. Dafür wurden Elektronen mit einem Linearbeschleuniger auf eine Energie von 200 MeV beschleunigt und anschließend auf Metall gelenkt. Die dadurch entstandene Bremsstrahlung erzeugte durch Paarbildung im Metall Elektronen-Positronen-Paare, die durch ein magnetisches Feld getrennt wurden. Bevor die Anti-/Teilchen in den LEP eingespeist wurden, durchliefen sie eine Reihe von Vorbeschleunigern. Diese sind in Abbildung 11 dargestellt.

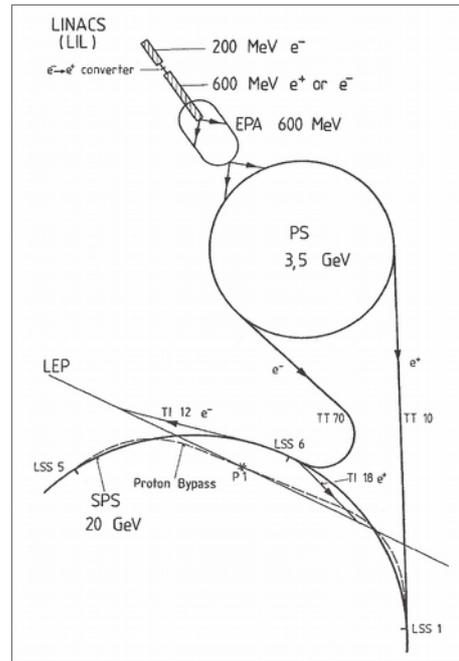


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Vorbeschleuniger-Netzes des LEP

Nach der Erzeugung der Elektronen und Positronen wurden diese in einem weiteren Linearbeschleuniger, dem LEP Injector Linac (LIL) auf 600 MeV beschleunigt und anschließend im Electron-Positron Accumulator (EPA) gesammelt. Anschließend wurden die Anti-/Teilchen in einen ehemaligen

Protonenbeschleuniger, das Proton Synchrotron (PS) eingespeist und dort auf 3,5 GeV beschleunigt. Schließlich wurden sie in das Super Proton Synchrotron (SPS) transferiert, wo sie in jeweils vier Paketen gesammelt und nochmals beschleunigt wurden, bevor sie mit einer Energie von 20 GeV in den LEP eingespeist wurden. Abbildung 12 zeigt ein Foto des LEP-Tunnels.

Um die Elektronen und Positronen auf einer Kreisbahn zu halten, waren am LEP etwa 3400 C-förmige Dipolmagnete als Ablenkmagnete installiert. Die Fokussierung der Anti-/Teilchenstrahlen wurde mit Hilfe von etwa 800 Quadrupol- und 500 Sextupolmagneten gewährleistet. Um die Elektronen und Positronen zu beschleunigen, waren in den geraden Abschnitten des LEP insgesamt 128 Beschleunigerelemente aus Kupfer installiert. 1995 wurde ein Upgrade durchgeführt, bei welchem 288 supraleitende Beschleunigerelemente hinzugefügt und dadurch die Kollisionsenergie etwa verdoppelt werden konnte.



Abbildung 12: Foto des LEP-Tunnels

Damit die Daten und Ergebnisse, die aus Beschleunigerexperimenten gewonnen werden können, möglichst kleine Fehler

aufweisen, müssen eine Vielzahl von Anforderungen erfüllt sein. Es ist essentiell, dass die Kollisionsenergie genau kalibriert wird und dementsprechend Schwankungen in der Strahlenergie vermieden werden. Der Zustand eines Anti-/Teilchenstrahls mit konstanter Energie lässt sich aus verschiedenen Gründen, von denen einige im Folgenden noch dargelegt werden, nicht beliebig genau erzeugen.

Ein wesentlicher Faktor, welcher die möglichen Strahlenergien nach oben begrenzt, ist neben der Leistungsfähigkeit der installierten Magnete wie bei allen Ringbeschleunigern die Entstehung von Synchrotron-Strahlung. Aufgrund der radialen Beschleunigung strahlen die elektrisch geladenen Elektronen und Positronen elektromagnetische Strahlung ab. Die auf diese Weise abgestrahlte Energie ist proportional zur vierten Potenz der Anti-/Teilchenenergie<sup>29</sup>. Weiterhin ist sie indirekt proportional zum Quadrat des Krümmungsradius des Strahlrohres. Dies ist auch einer der Gründe, weshalb Ringbeschleuniger in solch gigantischen Dimensionen konstruiert werden.

Um die Energie des Anti-/Teilchenstrahls also konstant zu halten, muss permanent Energie zugeführt werden. Dies geschah am LEP über das sogenannte radio frequency system. Damit dem Anti-/Teilchenstrahl kontinuierlich genau die Energie zugeführt werden konnte, die benötigt wurde, um die Strahlenergie konstant zu halten, mussten noch weitere Aspekte berücksichtigt werden.

Dazu gehörten die Gezeiten des Genfer Sees sowie dessen Wasserstand, der Fahrplan des elektrisch betriebenen Schnellzuges TGV, welcher zwischen Genf und Paris verkehrte sowie die Gravitationswirkung von Sonne und Mond, welche den Umfang des Beschleunigers im Laufe des Tages periodisch um einige Millimeter änderten. Insgesamt war der Umfang des Beschleunigerrings Schwankungen in der Größenordnung von einem Meter unterworfen. Die dadurch hervorgerufenen Energieschwankungen mussten ausgeglichen werden, um einen möglichst kleinen systematischen Fehler in der Kalibration der Strahlenergie zu erreichen. Dieser Fehler betrug zum Beispiel während des Betriebs bei einer Strahlenergie von 91,2 GeV etwa 1,7 MeV.

Eine weitere negative Auswirkung der Synchrotronstrahlung ist, dass diese Moleküle aus den Wänden der Vakuumröhre löst, wodurch das Vakuum kontaminiert wird. Deshalb waren am LEP über die gesamte Beschleunigerstrecke Vakuumpumpen verteilt, um diese freigesetzten Gase abzupumpen. Dadurch konnte auch im Betrieb ein Druck von nur  $4 \times 10^{-13}$  bar aufrecht erhalten werden.

---

<sup>29</sup> Bei einer Strahlenergie von 104 GeV, welche am Ende des Betriebs von LEP erreicht wurde, betrug der Energieverlust pro Umlauf etwa 3%.

Bei der Kollision von Elektronen und Positronen am LEP entstanden unter anderem Z-Teilchen. Diese Teilchen haben aufgrund ihrer großen Masse eine sehr kurze mittlere Lebensdauer<sup>30</sup> und wandeln sich dementsprechend schnell in andere Anti-/Teilchen um (siehe Kapitel 4.3.2). Diese Umwandlungsprodukte wurden anschließend in den vier Detektoren von LEP (ALEPH, DELPHI, L3 und OPAL) nachgewiesen. Anhand der aufgetretenen Häufigkeiten bestimmter Umwandlungen konnten Rückschlüsse auf die zugrundeliegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten gezogen werden (siehe Kapitel 4.3.3).

Weitere hier nicht diskutierte Kenndaten und Parameter des LEP findet man unter anderem bei LEP Injector Study Group (1983, 1984) sowie Wilson und Henke (1989).

#### 4.1.2 Ziele der LEP-Forschung

Prinzipiell verfolgte man am LEP dieselben grundlegenden Ziele wie bei allen Beschleunigerexperimenten (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015). Dazu gehören die Untersuchung des Aufbaus der Materie auf subatomarer Ebene sowie die Suche nach den elementaren Bausteinen der Natur. Damit einher geht die Suche nach bisher unbekanntem massereichen Anti-/Teilchen. Außerdem versuchen die Forscher bei derartigen Experimenten zu verstehen, welche Prozesse im Universum unmittelbar nach dem Urknall stattgefunden haben (z.B. der Zusammenschluss von Quarks zu Hadronen) und durch welche Gesetzmäßigkeiten diese Prozesse determiniert waren. Diese allgemeinen Zielstellungen lassen sich weiter spezifizieren. Im Folgenden werden einige der bedeutendsten Ziele vorgestellt, welche mit der LEP-Forschung verfolgt wurden (vgl. Abbiendi et al., 2001; Burkhardt & Steinberger, 1991; Schopper, 2009; Treille, 2002).

Eines der Objekte, dessen Eigenschaften am LEP genau untersucht werden sollte, ist das Z-Teilchen. Zu den Eigenschaften, welche die Forscher interessierten, gehörten dessen Masse, totale Zerfallsbreite und die relativen Häufigkeiten bestimmter Umwandlungen des Z-Teilchens sowie die Winkelverteilungen der Umwandlungsprodukte. Von der Bestimmung der Produktionsrate und der Auswertung von Umwandlungen des Z-Teilchens, welches genau wie die beiden anderen Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung ( $W^+$ - und  $W^-$ -Teilchen) erstmals 1982 an einem Proton-Anti-Proton-Beschleuniger, dem Superprotonensynchrotron (SPS) am CERN, mit den Detektoren UA1 und UA2 beobachtet wurde (vgl. Rubbia, 1994), erhoffte man sich vor Inbetriebnahme des LEP unter anderem die folgenden Ergebnisse.

---

<sup>30</sup>  $m_Z \approx 91,2 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ ,  $\tau_Z \approx 3 \cdot 10^{-25} \text{s}$ .

Vor allem sollte die schwache Wechselwirkung bei hohen Energien und mit erhöhter Präzision studiert werden, als es bei vorherigen Teilchenbeschleunigern (z.B. bei Proton-Antiproton-Beschleunigern) möglich war.

Zudem hoffte man, neue Anti-/Teilchen nachweisen zu können. Dazu gehörte speziell das Higgs-Teilchen<sup>31</sup>. Außerdem versprach man sich neue Erkenntnisse zur Quantenchromodynamik, also der Quantenfeldtheorie, welche die starke Wechselwirkung beschreibt. Diese Erkenntnisse sollten aus den hadronischen Umwandlungen der Z-Teilchen gewonnen werden (siehe Kapitel 4.3.3). Nicht zuletzt sollten auch die Eigenschaften von schweren Quarks studiert werden. Dabei ist vor allem das Bottom-Quark zu nennen, da dieses am LEP in größeren Mengen erzeugt werden konnte als bei vorangegangenen Experimenten.

---

31 Das Higgs-Teilchen wurde im Jahr 2012 am CERN nachgewiesen und war bis dahin das einzige vom Standardmodell vorhergesagte und bisher unentdeckte Teilchen. Bei diesem Teilchen handelt es sich um Anregungszustände des allgegenwärtigen Higgs-Feldes und es ist verantwortlich dafür, dass die elementaren Anti-/Teilchen überhaupt Massen besitzen.

## 4.2 Der OPAL Detektor

OPAL (Omni Purpose Apparatus at LEP) war neben ALEPH, DELPHI und L3 einer der Detektoren am LEP. In diesem Kapitel wird der Aufbau und die Funktionsweise des OPAL-Detektors erläutert. Anschließend wird das OPAL-Eventdisplay vorgestellt, in welchem die vom OPAL-Detektor gesammelten Daten visualisiert werden konnten.

### 4.2.1 Aufbau des OPAL-Detektors

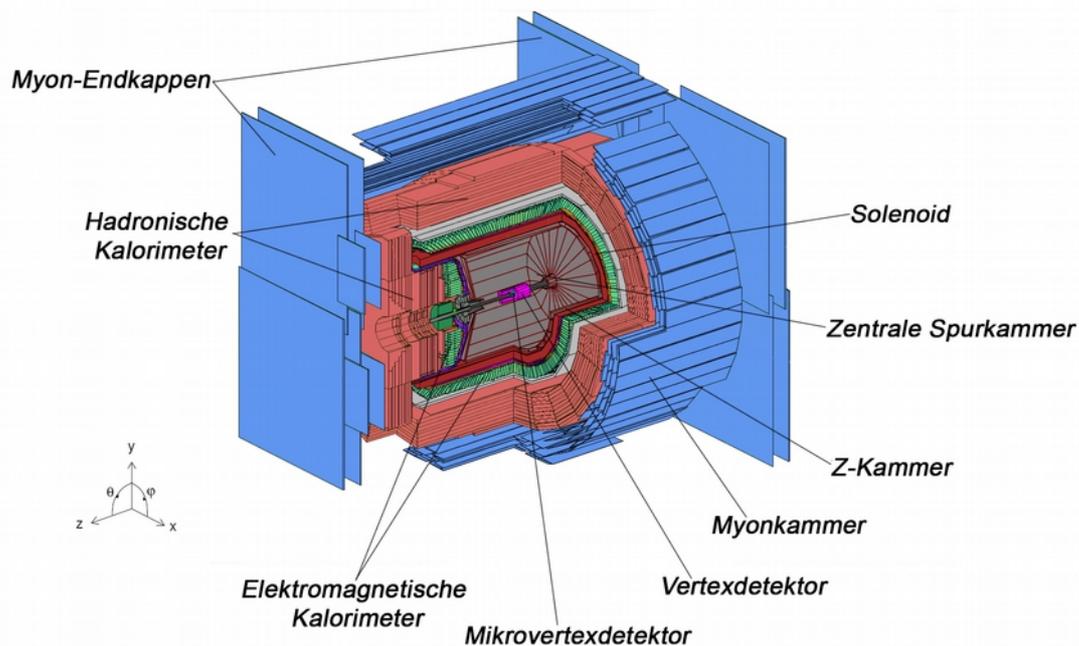


Abbildung 13: Schematische Darstellung des OPAL-Detektors mit Beschriftung wesentlicher Komponenten

Der OPAL-Detektor besaß die Abmessungen eines Würfels mit etwa 12 Metern Kantenlänge (vgl. <http://home.web.cern.ch/about/experiments/opal>). Abbildung 13 zeigt den Detektoraufbau. Es wurden lediglich die für die hier angestellten Betrachtungen wesentlichen Detektorkomponenten beschriftet.

Dem eingefügten Koordinatensystem kann entnommen werden, dass die z-Richtung in Richtung Strahlröhre des LEP gewählt wurde. Der OPAL-Detektor bestand aus verschiedenen Detektorkomponenten, welche zwiebelschalenförmig um den Kollisionspunkt der Elektronen und Positronen angeordnet waren. Im Folgenden wird auf einige dieser Komponenten näher

eingegangen (vgl. Abbiendi et al., 2001; Allison et al., 1991; Biebel et al., 1992; Burkhardt & Steinberger, 1991; Schopper, 2009; Vollmer, 2004; <http://home.web.cern.ch/about/experiments/opal>).

Der Strahlröhre aus Beryllium und somit auch dem Wechselwirkungspunkt am nächsten befand sich ein Silizium-Mikrovertexdetektor, gefolgt von einem Vertexdetektor, der zentralen Spurkammer und den Z-Kammern. Zusammen dienten der Silizium-Mikrovertexdetektor und der Vertexdetektor zur Lokalisierung des Punktes, wo sich die bei den Kollisionen erzeugten kurzlebigen Anti-/Teilchen (z.B. Z-Teilchen) in andere Anti-/Teilchen umwandelten<sup>32</sup> Außerdem halfen die Daten aus dieser Detektorkomponente bei der Bestimmung der Impulse der entstandenen Anti-/Teilchen. Dieses Detektorsystem hatten eine Länge von einem Meter und erstreckte sich in einem radialen Abstand von 9 cm bis 22 cm.



Abbildung 14: Foto der zentralen Spurkammer des OPAL-Detektors nach dessen Abbau im Jahr 2001

Die zentrale Spurkammer (siehe Abb. 14) hatte einen äußeren Durchmesser von 3,7 m und war 4 m lang. Aufgrund der Ionisation des Kammergases<sup>33</sup>, welche elektrisch geladene Anti-/Teilchen in der Spurkammer hervorriefen, war es möglich, die Spur dieser Anti-/Teilchen sichtbar zu machen. Um die Ionisation des Kammergases quantitativ zu erfassen, war die Kammer entlang der Strahlachse in 24 identische Sektoren aufgeteilt, wobei jeder eine Drahtplatte mit 159 Anodendrähten sowie zwei Kathoden Drahtplatten enthielt. Letztere separierten die einzelnen Sektoren voneinander. Die Spurkammer war von einem magnetischen Feld der Feldstärke

---

32 Dieser Punkt wird auch als Wechselwirkungsverteck oder kurz Vertex bezeichnet.

33 Das Kammergas war eine Mischung aus 88,2% Argon, 9,8% Methan und 2,0% Isobutan. Der Druck in der Kammer betrug 4 bar. (vgl. Biebel et al., 1992)

0.435 T<sup>34</sup> durchsetzt, welches von einem außerhalb der Spurkammer befindlichen Solenoid erzeugt wurde und in z-Richtung orientiert war.

Die Krümmung der Spuren elektrisch geladener Anti-/Teilchen, welche durch das Magnetfeld verursacht wurde, ließ Rückschlüsse auf die Anti-/Teilchenart (z.B. Vorzeichen der elektrischen Ladung) und den Impuls der Anti-/Teilchen zu. Es konnte zudem der spezifische Energieverlust der Anti-/Teilchen beim Durchqueren der Kammer ermittelt werden. In der zentralen Spurkammer konnten allerdings nur die zwei Koordinaten der Anti-/Teilchenspur in der Ebene senkrecht zur Strahlachse bestimmt werden. Zur Bestimmung der z-Komponente der Anti-/Teilchenspuren zum Zeitpunkt des Austritts aus der Spurkammer waren an deren äußerem Rand die sogenannten Z-Kammern installiert.

Dem Solenoid folgte das Kalorimetersystem des OPAL-Detektors. Am nächsten zur Strahlachse befand sich das aus insgesamt 9440 Bleiglasblöcken zusammengesetzte elektromagnetische Kalorimeter (siehe Abb. 15), welches zur Bestimmung der Energien von Elektronen, Positronen und Photonen diente. Zur exakten Bestimmung der Entstehungspunkte der Anti-/Teilchenschauer im elektromagnetischen Kalorimeter sowie zur Bestimmung des Energieverlustes der Anti-/Teilchen beim Durchgang durch den Solenoid, waren direkt vor dem elektromagnetischen Kalorimeter sogenannte Presampler eingebaut.

Weiter außen in radialer Richtung folgte das hadronische Kalorimeter. Gemeinsam mit dem elektromagnetischen Kalorimeter diente dieses zum Nachweis und zur Bestimmung der Energie von Hadronen. Es beinhaltete acht 10 cm dicken Eisenplatten, welche als Absorptionsschichten dienten. Zwischen diesen Platten waren jeweils Drahtkammern als Detektorschichten angeordnet.

Den äußeren Rand des OPAL-Detektors bildeten 4 Schichten 10 m langer Myonendetektoren. Diese wurden im Normalfall von Myonen ab einer Energie von 3 GeV erreicht.

Damit auch Anti-/Teilchen detektiert werden konnten, die sich nur unter einem kleinem Winkel zur Strahlachse durch den Detektor bewegten, waren in Richtung Strahlröhre Vorwärtskalorimeter sowie die Myon-Endkappen installiert worden.

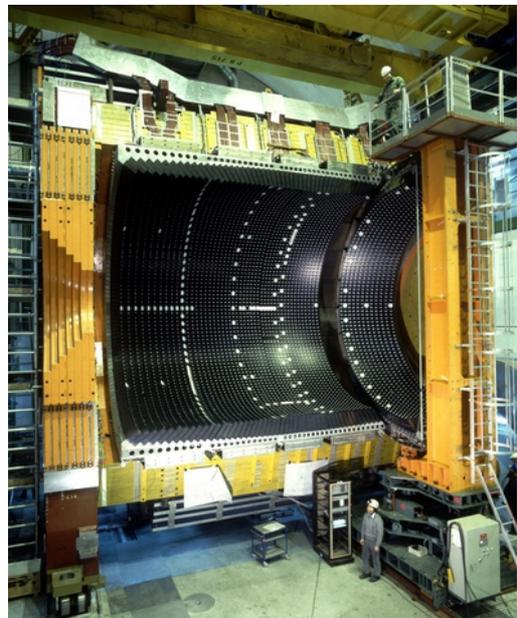


Abbildung 15: Foto einer Hälfte des elektromagnetischen Kalorimeters des OPAL-Detektors

34 Das Magnetfeld war in der gesamten Kammer annähernd konstant, wobei sich die Abweichungen in einem Bereich von +/- 0,5% bewegten. (vgl. Biebel et al., 1992)

## 4.2.2 Identifikation von Anti-/Teilchen - Das OPAL-Eventdisplay

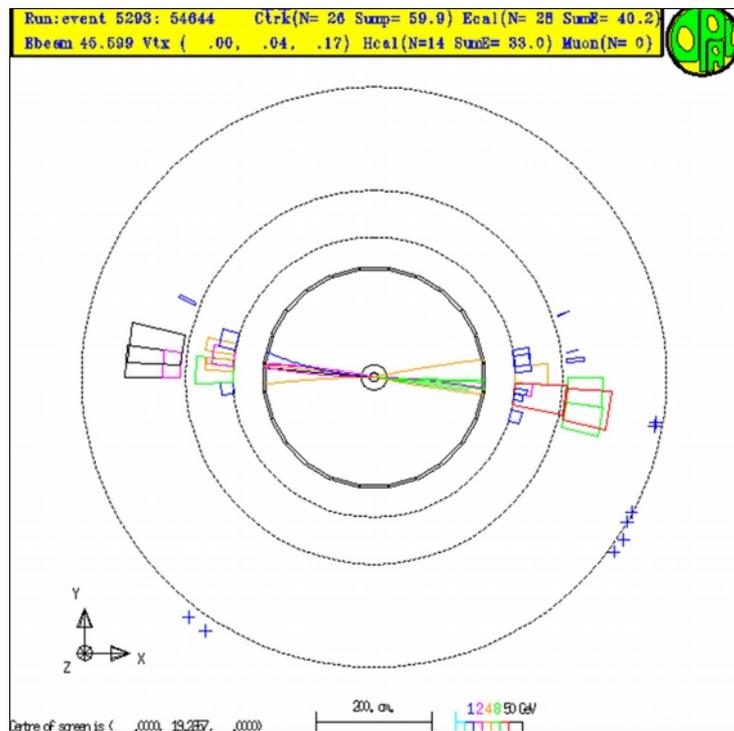


Abbildung 16: Darstellung eines Ereignisses im OPAL-Eventdisplay

Das Eventdisplay des OPAL-Detektors ermöglicht die Visualisierung einzelner Ereignisse. Sofern nichts anderes gesagt wird, ist im Folgenden unter einem Ereignis die Umwandlung eines Z-Teilchens (siehe Kapitel 4.3.2) zu verstehen. Abbildung 16 zeigt solches Ereignis im OPAL-Eventdisplay.

Zunächst wird der Aufbau des Eventdisplays erläutert. Anschließend wird kurz dargelegt, wie sich die verschiedenen Anti-/Teilchen anhand ihrer Signaturen<sup>35</sup> im OPAL-Detektor und deren Visualisierung im Eventdisplay unterscheiden lassen (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015; <http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/home.html>).

Alle verwendeten Abbildungen des OPAL-Eventdisplays sind der Website [www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/home.html](http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/home.html) entnommen. Dabei handelt es sich in jedem Fall um Originaldaten des OPAL-Experiments, welche jedoch teilweise zur besseren Veranschaulichung bestimmter Zusammenhänge verändert wurden. Diese Veränderungen beinhalten das Herausfiltern von Signaturen sowie das Entfernen irrelevanter Daten in den Darstellungen, welche in den Arbeitsmaterialien verwendet werden (siehe Kapitel 5). Außerdem wurde die

<sup>35</sup> Unter der Signatur eines Anti-/Teilchens wird im Folgenden die Zusammenfassung aller Spuren bzw. Energieeinträge im OPAL-Detektor bzw. im OPAL-Eventdisplay verstanden.

Farbgebung der Darstellungen verändert, um den Farbverbrauch beim Druck der Arbeitsmaterialien zu verringern und somit den Einsatz der Unterrichtsmaterialien praktikabler zu gestalten.

In den hier verwendeten Darstellungen des Eventdisplays ist ein Schnitt durch den OPAL-Detektor in der x-y-Ebene, also orthogonal zur Strahlachse dargestellt. Prinzipiell lässt sich jedes Ereignis in einer beliebigen Projektion betrachten. In Abbildung 17 sind die folgenden Bereiche des OPAL-Detektors im Eventdisplay gekennzeichnet:

- 1 zentrale Spurkammer
- 2 elektromagnetisches Kalorimeter
- 3 hadronisches Kalorimeter
- 4 Myonenkammer

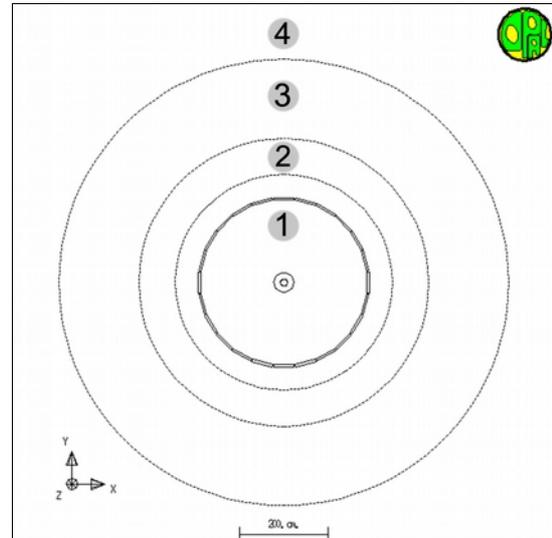


Abbildung 17: Vereinfachte Darstellung des OPAL-Eventdisplays mit Kennzeichnung der wesentlichen Detektorbereiche

Zwischen der zentralen Spurkammer und dem elektromagnetischen Kalorimeter ist der Bereich abgegrenzt, in dem sich der Solenoid befindet.

< 0.5 GeV
0.5 - 1.0 GeV
1.0 - 2.0 GeV
2.0 - 4.0 GeV
4.0 - 8.0 GeV
8.0 - 16.0 GeV
> 16 GeV

Abbildung 18: Farbcode der Energiebereiche im OPAL-Eventdisplay

Im Eventdisplay sind die Signaturen aller Anti-/Teilchen farblich dargestellt, welche bei dem entsprechenden Ereignis entstanden sind und detektiert werden konnten. Die Farbe einer Anti-/Teilchenspur in der Spurkammer charakterisiert den Betrag des Impulses des zugehörigen elektrisch geladenen Anti-/Teilchens. Die Energieeinträge in den Kalorimetern werden als farbige Vierecke dargestellt. Die Farbe sowie die Größe dieser Vierecke visualisieren die im Kalorimeter deponierte Energie. Mitunter erstrecken sich große Energieeinträge im elektromagnetischen Kalorimeter bis ins hadronische Kalorimeter.

Relevant für die Zuordnung ist allerdings ausschließlich, wo die entsprechenden Vierecke beginnen. Eine Legende zu den verwendeten Farben ist am unteren Rand des Eventdisplays zu finden. Eine genaue Aufschlüsselung des Farbcodes ist zudem in Abbildung 18 dargestellt.

Mittig am unteren Rand des Eventdisplays befindet sich ein Maßstab und links davon können die Koordinaten des Mittelpunkts im Eventdisplay abgelesen werden. Direkt darüber ist ein Koordinatensystem dargestellt, welches die Projektionsebene charakterisiert.

Am oberen Rand des Event-Displays befindet sich ein Informationskasten, der Kenndaten der jeweils dargestellten Ereignisse enthält. Im Folgenden wird auf die Bedeutung dieser Daten eingegangen (vgl. <http://www-static.etp.physik.uni-muenchen.de/fp-versuch/node11.html>). Anschließend wird dargelegt, welche Schwierigkeiten bei der Interpretation der Daten auftreten, um zu begründen, weshalb der Informationskasten aus den Eventdisplay-Darstellungen in den Arbeitsmaterialien für den Unterricht entfernt wurde.

Der Informationskasten enthält bei jedem Ereignis die folgenden Daten:

- *Run: event*: einzigartige Identifikationsnummer des dargestellten Ereignisses
- *Ctrk*: Daten der zentralen Spurkammer (*N*: Anzahl der Anti-/Teilchenspuren, *SumP*: Betrag der Summe aller Impulse der beobachteten elektrisch geladenen Anti-/Teilchen)
- *Ecal*: Daten des elektromagnetischen Kalorimeters (*N*: Anzahl der Einträge im elektromagnetischen Kalorimeter, *SumE*: von Elektronen, Positronen, Photonen und Hadronen deponierte Gesamtenergie)
- *Ebeam*: Energien der kollidierenden Elektronen und Positronen (entspricht der halben Schwerpunkts-Kollisionsenergie)
- *Vtx*: Koordinaten des Punktes (Vertex) der Elektron-Positron-Kollision
- *Hcal*: Daten des hadronischen Kalorimeters (*N*: Anzahl der detektierten Anti-/Teilchen, *SumE*: von Hadronen deponierte Gesamtenergie)
- *Muon*: Daten der Myonenkammern (*N*: Anzahl der bei dem Ereignis detektierten Anti-/Myonen)

Die in den Kenndaten angegebenen Energien stimmen häufig nicht exakt mit denen überein, die von der Farbigkeit der Einträge in den Detektorkomponenten suggeriert werden. Dafür gibt es verschiedene Gründe.

Prinzipiell sind die in den Kenndaten angegebenen Energiewerte bereits durch komplexe Rechnungen und Filter korrigiert wurden. In den Daten zum hadronischen Kalorimeter ist zum Beispiel nur die tatsächlich von Hadronen abgegebene Energie enthalten, nicht jedoch die von Anti-/Myonen deponierte Energie. Dass dort trotz der Abwesenheit von Hadronen Werte ungleich Null zu finden sind, hängt damit zusammen, dass von der deponierten Gesamtenergie der Erwartungswert der Energiedeposition der Anti-/Myonen (abhängig von deren Energie) subtrahiert wird. Da es sich bei der Energieabgabe der Anti-/Myonen im hadronischen Kalorimeter (wie bei allen teilchenphysikalischen Prozessen) um stochastische Prozesse handelt, kann die in den Kenndaten genannte Energie vom tatsächlichen Wert abweichen. Auch im elektromagne-

tischen Kalorimeter werden die erwarteten Energiebeiträge von vorhandenen Anti-/Myonen abgezogen. Beiträge von Hadronen werden allerdings berücksichtigt.

Diese Abweichungen der Daten von der Farbgebung der Anti-/Teilchenspuren und Energieeinträgen ist ohne eine tiefgehende Auseinandersetzung mit den Analysealgorithmen im OPAL-Experiment nicht nachvollziehbar, weshalb in den Unterrichtsmaterialien auf die Angabe dieser Daten verzichtet wird.

In Abbildung 19 ist schematisch dargestellt, von welchen Anti-/Teilchen Einträge in den verschiedenen Komponenten des OPAL-Detektors hinterlassen wurden.

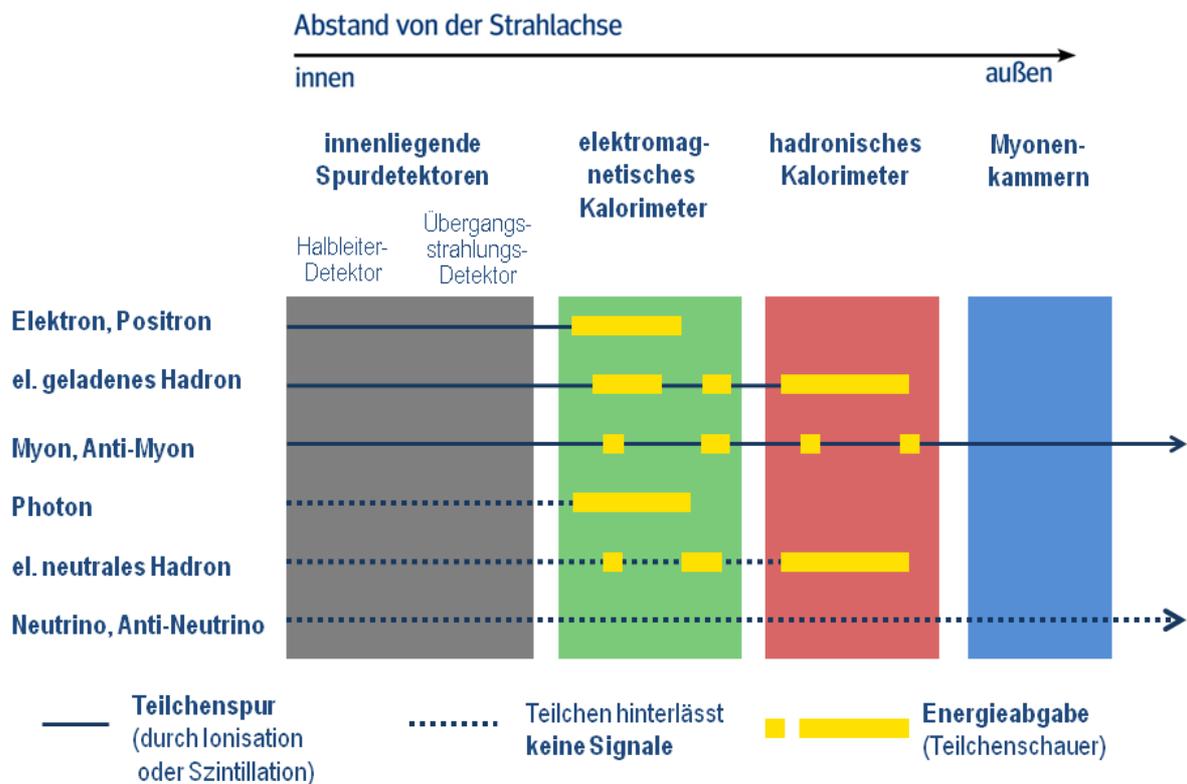


Abbildung 19: Übersicht über Einträge verschiedener Anti-/Teilchen in den einzelnen Komponenten des OPAL-Detektors.

In der Spurkammer sind lediglich die Spuren von **elektrisch geladenen Anti-/Teilchen** dargestellt. Dazu gehören Elektronen, Positronen, Anti-/Myonen sowie elektrisch geladene Hadronen. Aufgrund des anliegenden Magnetfeldes, welches in positive z-Richtung (aus der Abbildungsebene heraus) orientiert war, und der deshalb auf diese Anti-/Teilchen wirkenden Lorentzkraft, sind deren Spuren in der Spurkammer gekrümmt. Die Richtung der Krümmung ist abhängig vom Vorzeichen der elektrischen Ladung. Elektrisch negativ geladene Anti/Teilchen beschreiben eine Linkskurve, während die Spuren elektrisch positiv geladener Anti/Teilchen nach rechts gekrümmt sind (siehe Abb. 20). Der Krümmungsradius der Bahn wird vom Betrag der elektrischen

Ladung sowie dem Impuls der Anti-/Teilchen bestimmt<sup>36</sup>. Je geringer der Impuls eines Anti-/Teilchens mit einer bestimmten elektrischen Ladung ist, umso kleiner ist der Krümmungsradius der erzeugten Spur. Bei Anti-/Teilchen mit großem Impuls ist die Spurkrümmung im Eventdisplay meist nicht erkennbar.

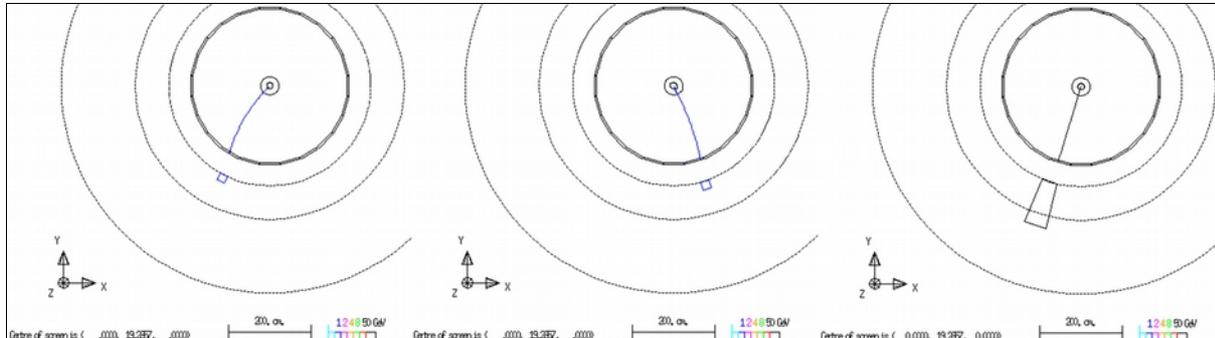


Abbildung 20: Spurkrümmung von elektrisch geladenen Anti-/Teilchen, links: elektrisch negativ geladenes Teilchen (Elektron), mittig: elektrisch positiv geladenes Anti-/Teilchen (Positron), rechts: aufgrund des großen Impulses des Anti-/Teilchens ist keine Spurkrümmung erkennbar

**Elektronen**, **Positronen** und **Photonen** können dadurch identifiziert werden, dass sie ihre komplette Energie im elektromagnetischen Kalorimeter in Form eines elektromagnetischen Schauers deponiert haben (siehe Abb. 20). Die Farbe der Spur, welche von **Elektronen** und **Positronen** in der Spurkammer erzeugt wurde, entspricht demnach der Farbe des Energieeintrags im elektromagnetischen Kalorimeter. Es existieren jeweils keine Einträge im hadronischen Kalorimeter und in der Myonenkammer.

**Protonen** und andere **Hadronen** verlieren nur einen Teil ihrer Energie im elektromagnetischen Kalorimeter. Die Farbe des Energieeintrags im elektromagnetischen Kalorimeter entspricht also nicht der Farbe der Spuren in der Spurkammer. In der Regel, allerdings nicht immer<sup>37</sup>, hinterlassen diese Teilchen eine Energiedeposition im hadronischen Kalorimeter, die durch die Wechselwirkung der Hadronen mit den Atomkernen des Detektormaterials und dem dadurch entstehenden hadronischen Schauer hervorgerufen wird. (siehe Abb. 21). Die Unterscheidung zwischen den verschiedenen Arten elektrisch positiv bzw. negativ geladener Hadronen ist im Eventdisplay nicht ohne Weiteres möglich. Dazu müssten weitere Daten aus der Spurkammer herangezogen werden (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015). Aus den Daten zum Impuls und dem

36 Setzt man an, dass die Lorentzkraft im homogenen Magnetfeld als Zentripetalkraft wirkt, erhält man zwischen Impuls ( $p$ ), elektrischer Ladung ( $Q$ ), Krümmungsradius  $r$  und magnetischer Feldstärke ( $B$ ) den Zusammenhang  $p=Q \cdot r \cdot B$

37 Bei den Wechselwirkungen von Teilchen mit den Kalorimetermaterialien handelt es sich um stochastische Prozesse. Die Dicke des elektromagnetischen Kalorimeters ist so gewählt, dass alle Elektronen, Positronen und Photonen dort (mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit) ihre gesamte Energie verlieren. Durch die dafür nötige Ausdehnung des elektromagnetischen Kalorimeters besteht allerdings eine geringe Wahrscheinlichkeit, dass auch Hadronen dort vollständig absorbiert werden. Diese Wahrscheinlichkeit ist deutlich größer als die für das Vordringen von Elektronen, Positronen oder Photonen in das hadronische Kalorimeter. Deren vollständige Absorption im elektromagnetischen Kalorimeter besitzt Priorität.

Grad der Ionisation des Kammergases, welche von der Geschwindigkeit der Anti-/Teilchen beeinflusst wird, kann die Masse der Anti-/Teilchen geschlussfolgert werden, was eine genaue Identifikation möglich macht.

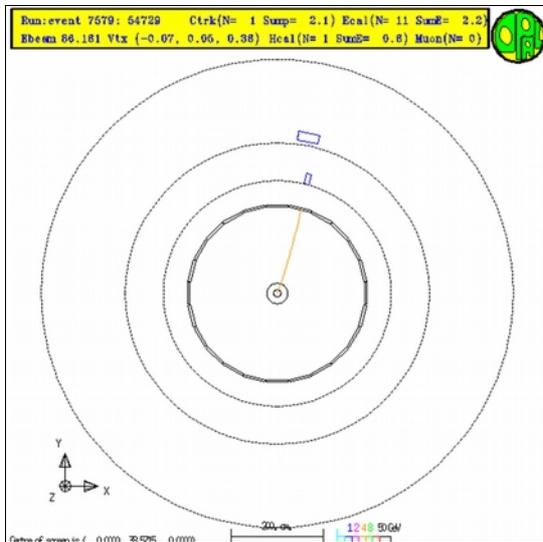


Abbildung 21: Signatur eines elektrisch (negativ) geladenen Hadrons im OPAL-Eventdisplay

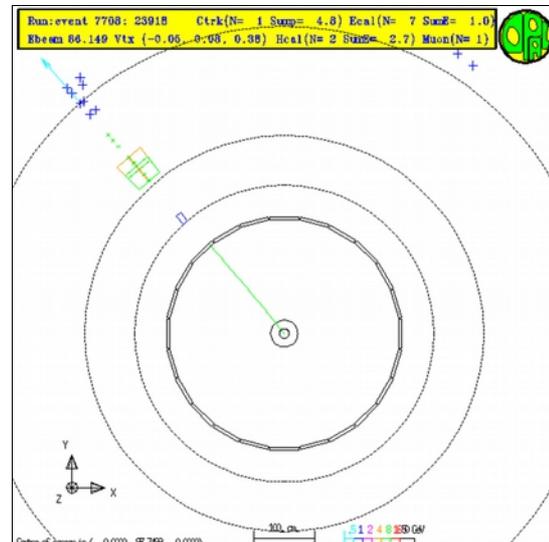


Abbildung 22: Signatur eines Anti-/Myons im OPAL-Eventdisplay

**Anti-/Myonen** sind die einzigen Anti-/Teilchen, die mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit durch beide Kalorimeter gelangen konnten und anschließend eine Signatur in der Myonenkammer hinterlassen haben<sup>38</sup>. Daher sind sie sehr einfach zu identifizieren. Zudem hinterließen sie Spuren bzw. Einträge in allen anderen Detektorkomponenten (siehe Abb. 22). Die Anti-/Myonen werden in der Myonenkammer durch cyanfarbene Pfeile symbolisiert. Zusätzlich zu den Pfeilen sind oft Einträge in Form von blauen Kreuzen zu erkennen, die sich mitunter in einigem Abstand zu den Anti-/Myonpfeilen befinden. Dabei handelt es sich um Einträge von Elektronen<sup>39</sup>, die bei der Ionisation des Kammergases durch die Anti-/Myonen aus den Gasatomen gelöst wurden.

**Anti-/Tauonen** waren im OPAL-Detektor nicht direkt nachweisbar, da sie nicht stabil sind und sich sofort<sup>40</sup> in andere Anti-/Teilchen umwandeln (siehe Kapitel 4.3.2).

Elektrisch neutrale Teilchen hinterließen keine Spuren in der Spurkammer. **Neutronen** und andere **elektrisch neutrale Hadronen** erzeugten demnach Einträge im elektromagnetischen und hadronischen Kalorimeter, denen keine Spur in der Spurkammer zugeordnet werden kann. Dies unterscheidet sie von den elektrisch geladenen Hadronen, die in jedem Fall in der Spurkammer detektiert werden.

38 Das liegt daran, dass Anti-/Myonen mit etwa  $2\mu\text{s}$  nach den Anti-/Neutrinos die zweitlängste mittlere Lebensdauer aller instabilen elementaren Anti-/Teilchen besitzen (vgl. Povh, Rith, Scholz & Zetsche, 2009).

39 Sogenannte *Delta-Elektronen*.

40 Die mittlere Lebensdauer eines Anti-/Tauons beträgt etwa  $2,9 \cdot 10^{-13}$  Sekunden.

**Anti-/Neutrinos** sind die einzigen (bekannten) Anti-/Teilchen, die den OPAL-Detektor passieren konnten, ohne dabei direkt nachgewiesen werden zu können. Der Grund dafür ist, dass Anti-/Neutrinos ausschließlich der schwachen Wechselwirkung unterliegen und daher nur sehr selten mit Materie wechselwirken<sup>41</sup>. Allerdings konnte die Entstehung von energiereichen Anti-/Neutrinos indirekt darüber nachgewiesen werden, dass deutlich weniger Energie als die Kollisionsenergie in den Kalorimetern deponiert wurde und sich die Impulskomponenten senkrecht zum Strahlrohr aller beobachteten Anti-/Teilchen nicht zu Null addierten (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015). Damit diese scheinbare Verletzung von Erhaltungssätzen tatsächlich überprüft werden konnte, war es wesentlich, dass alle detektierbaren Anti-/Teilchen auch tatsächlich registriert wurden. Aus diesem Grund musste der Detektor den Wechselwirkungspunkt vollständig umschließen und es wurden die bereits angesprochenen Vorwärtskalorimeter und Myon-Endkappen installiert.

**Anti-/Quarks** konnten mit dem Detektor ebenfalls nicht direkt beobachtet werden. Diese elementaren Anti-/Teilchen wandeln sich sehr schnell in eine Vielzahl anderer Anti-/Teilchen um, wobei es sich um Leptonen und Hadronen handeln kann. Aufgrund des *Confinements* können Anti-/Quarks nicht isoliert existieren, da diese nicht farbneutral bezüglich der starken Ladung sind. Die von der starken Wechselwirkung hervorgerufene Kraftwirkung zwischen Anti-/Quarks bleibt ab einem Abstand von etwa 1 fm annähernd konstant. Dies hat zur Folge, dass die potentielle Energie der Anti-/Quarks stark anwächst, wenn sich diese voneinander entfernen, wie es nach deren Erzeugung am Large Electron-Positron Collider (LEP) der Fall war. Diese potentielle Energie reicht spätestens ab einem Abstand von 2 fm aus, um ein neues Anti-/Quark zu erzeugen (vgl. Netzwerk Teilchenwelt, 2015). Dieser Prozess (siehe Abb. 23) wiederholt sich mehrfach. Die dabei entstehenden Anti-/Quarks binden sich schließlich zu Hadronen. Dieser Prozess wird als *Hadronisierung* bezeichnet. Alle bei der Umwandlung entstandenen Anti-/Teilchen bewegen sich gebündelt als Jet in der ursprünglichen Bewegungsrichtung des Anti-/Quarks weiter (siehe Abb. 24). Es ist ebenfalls möglich, dass Anti-/Quarks vor der Umwandlung ein Gluon, das Botenteilchen der starken Wechselwirkung, abstrahlen (siehe Kapitel 4.3.3). **Gluonen** wandeln sich genau wie die Anti-/Quarks augenblicklich in viele andere Anti-/Teilchen um, welche einen Jet bilden. Sie waren mit dem OPAL-Detektor also ebenfalls nicht direkt nachweisbar.

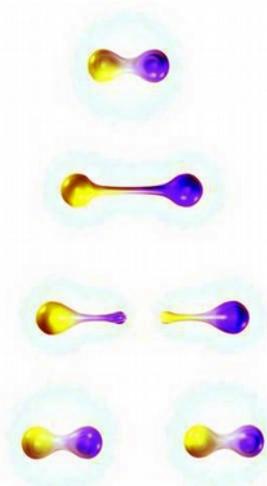


Abbildung 23: Bildung neuer Anti-/Quarks als Folge des Confinements

41 Die mittlere freie Weglänge eines Neutrinos mit einer Energie von 1 MeV (dies ist ein typischer Wert für solare Neutrinos) beträgt in Blei  $10^{17}$  m. Dies entspricht etwa 17 Lichtjahren (vgl. Bleck-Neuhaus, 2013)

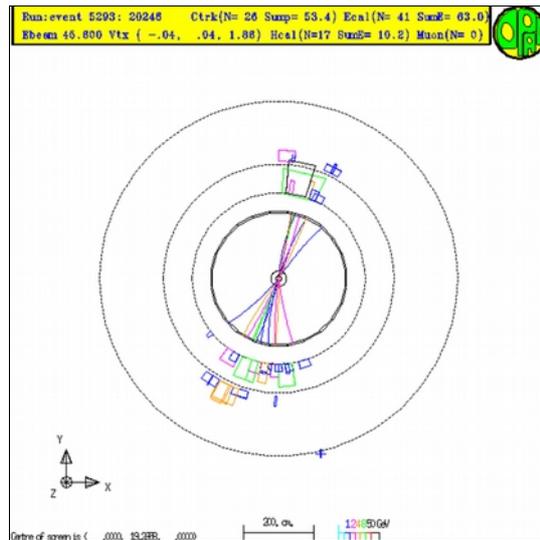


Abbildung 24: Signaturen zweier Jets im OPAL-Eventdisplay, welche durch Hadronisierung aus einem Quark-Anti-Quark-Paar entstanden sind

### 4.3 Das Studium der Z-Teilchen am LEP

Die Z-Teilchen waren eines der Objekte, die am LEP ausführlich studiert wurden. Im Folgenden wird beschrieben, welche Umwandlungen des Z-Teilchens nach dessen Erzeugung bei einer Elektron-Positron-Kollision am LEP möglich waren. Anschließend werden drei wichtige Erkenntnisse diskutiert, die durch die Auswertung der bei den Umwandlungen gesammelten Daten gewonnen werden konnten.

#### 4.3.1 Erzeugung und Umwandlung der Z-Teilchen

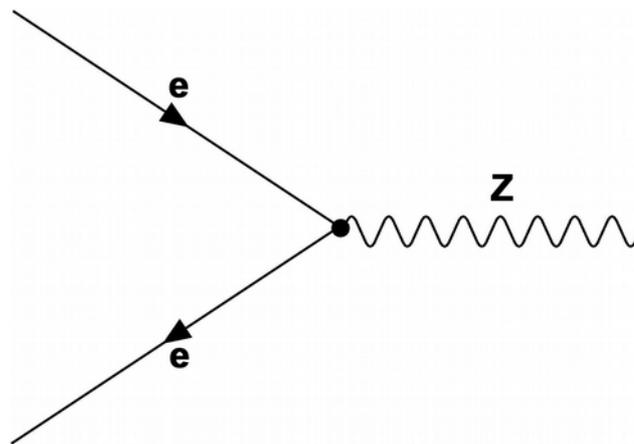


Abbildung 25: Feynman-Diagramm für die Erzeugung eines Z-Teilchens bei einer Elektron-Positron-Kollision

Während der ersten Betriebsphase von LEP („LEP1“, 1989-1995) wurden Elektronen und Positronen bei einer Kollisionsenergie im Bereich der Masse des Z-Teilchens (etwa  $91 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ ) zur Kollision gebracht. Dies führte dazu, dass bei einem Großteil der Elektron-Positron-Annihilationen Z-Teilchen erzeugt wurden (vgl. <http://opal.web.cern.ch/Opal/events/opalpics.html>). Das Feynman-Diagramm für diesen Prozess ist in Abbildung 25 dargestellt. Je näher die Kollisionsenergie an der Masse des Z-Teilchens liegt, umso wahrscheinlicher ist dessen Entstehung<sup>42</sup>. Bis 1995 wurden so insgesamt über 20 Millionen Z-Teilchen erzeugt<sup>43</sup> (vgl. Arduini et al., 1996). Diese Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung besitzen aufgrund ihrer großen Masse eine

<sup>42</sup> Es konnten prinzipiell alle möglichen elektromagnetisch und/oder schwach wechselwirkenden Anti-/Teilchen erzeugt werden, sofern die Kollisionsenergie dafür ausreichte (vgl. Povh et al., 2009).

<sup>43</sup> LEP wurde deshalb auch als *Z-Fabrik* bezeichnet. (vgl. [http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/ATLAS/de/zpath\\_neutrino.htm](http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/ATLAS/de/zpath_neutrino.htm))

sehr kurze mittlere Lebensdauer<sup>44</sup> bzw. mittlere Reichweite. Sie wandeln sich daher annähernd instantan in andere Anti-/Teilchen um. Bei allen Umwandlungen müssen die folgenden Kriterien erfüllt sein :

1. Die Summe der Massen der Umwandlungsprodukte darf nicht größer sein als die Masse des Z-Teilchens.
2. Elektrische, schwache und starke Ladung müssen bei der Umwandlung erhalten bleiben. Die Summe der entsprechenden Ladungszahlen bzw. -vektoren der Umwandlungsprodukte muss also denen des Z-Teilchens entsprechen, wobei das Z-Teilchen weder eine schwache noch eine elektrische Ladung besitzt und farbneutral bezüglich der starken Ladung ist. Das bedeutet, die schwachen und die elektrischen Ladungen der Umwandlungsprodukte müssen sich jeweils zu Null addieren und die Summe der Farbladungsvektoren der Umwandlungsprodukte muss den Nullvektor ergeben.
3. Alle Umwandlungsprodukte müssen eine elektrische und/oder eine schwache Ladung besitzen, da das Z-Teilchen andernfalls nicht an diese Anti-/Teilchen koppeln und sich nicht in diese umwandeln kann<sup>45</sup>.
4. Bei der Umwandlung eines Z-Teilchens entstehen immer genau zwei Umwandlungsprodukte.
5. Die Umwandlungsprodukte dürfen nicht im Widerspruch zu den Dupletts der schwachen Ladung stehen (siehe Kapitel 3.5).

Aus diesen Kriterien ergibt sich, dass nur Umwandlungen in ein Lepton-Anti-Lepton-Paar ( $Z \rightarrow l + l^+$ ) oder ein Quark-Anti-Quark-Paar ( $Z \rightarrow q + \bar{q}$ ) möglich sind<sup>46</sup>. Dass jeweils nur genau ein Teilchen-Anti-Teilchen-Paar entstehen kann, folgt aus den Symmetrien des Standardmodells. Zwischen Botenteilchen und Anti-/Materieteilchen sind nur die in Kapitel 3.3 genannten fundamentalen Vertices mit drei beteiligten Anti-/Teilchen erlaubt.

---

44  $\tau_Z \approx 10^{-25}\text{s}$

45 Dass das Z-Teilchen neben der schwachen auch an die elektrische Ladung koppelt, ist eine Folge der Vereinheitlichung beider Wechselwirkungen innerhalb der elektroschwachen Theorie, wie sie durch das Glashow-Weinberg-Salam-Modell beschrieben wird. Weitere Informationen dazu findet man zum Beispiel Online unter [http://erlangen.physicsmasterclasses.org/msm\\_verei/msm\\_verei\\_00a.html](http://erlangen.physicsmasterclasses.org/msm_verei/msm_verei_00a.html)

46 Bei elektrisch geladenen Leptonen ist es üblich, die elektrische Ladung zu kennzeichnen und so zwischen Teilchen (elektrisch negativ, z.B. Elektron  $e^-$ ) und Anti-Teilchen (elektrisch positiv, z.B. Positron  $e^+$ ) zu unterscheiden. In allen anderen Fällen kennzeichnet man Anti-Teilchen mit einem Querstrich (z.B. Anti-Up-Quark  $\bar{u}$ )

Umwandlungen in andere Botenteilchen der fundamentalen Wechselwirkungen sind nicht möglich, da ausgenommen der  $W^+$ - und  $W^-$ -Teilchen keines eine schwache Ladung besitzt.  $W^-$ -Teilchen können nicht entstehen, da diese aufgrund der Ladungserhaltungen als  $W^+W^-$ -Paare entstehen müssten, wofür die Energie des  $Z$ -Teilchens allerdings nicht ausreicht.

Zum Studium der Umwandlungskanäle entsprach die Kollisionsenergie (abgesehen von sehr geringen Schwankungen aufgrund der in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Effekte) der Masse des  $Z$ -Teilchens. Dies hatte zur Folge, dass die  $Z$ -Teilchen annähernd in Ruhe erzeugt wurden. Da bei den Umwandlungen des  $Z$ -Teilchens wie bei allen Anti-/Teilchenumwandlungen die Energie und der Impuls erhalten bleiben und immer genau zwei Anti-/Teilchen entstehen, bewegen sich die Umwandlungsprodukte stets in genau entgegengesetzter Richtung (man sagt auch „back-to-back“) auseinander.

Mitunter sind aber die Spuren der Anti-/Teilchen in der Spurkammer nicht in genau entgegengesetzter Richtung orientiert. Grund dafür ist allerdings keinesfalls eine Verletzung der Impulserhaltung. Verantwortlich dafür sind Prozesse, die nach der Umwandlung des  $Z$ -Teilchens stattgefunden haben. Dazu gehört zum Beispiel die Abstrahlung eines Photons durch ein entstandenes Anti-/Teilchen. Durch den Impulsübertrag auf das Photon ändert sich die Bewegungsrichtung des Anti-/Teilchens. Bei der Entstehung von energiereichen Photonen ist dies im OPAL-Eventdisplay erkennbar. Solche Ereignisse können allerdings durch das Vorhandensein eines durch das Photon hervorgerufenen Energieeintrages im elektromagnetischen Kalorimeter identifiziert werden.

### 4.3.2 Die Umwandlungskanäle des Z-Teilchens

Das Z-Teilchen kann sich sowohl leptonisch als auch hadronisch umwandeln, wobei stets genau ein Teilchen-Anti-Teilchen-Paar entsteht. Bei den leptonischen Umwandlungen können sowohl Teilchen-Anti-Teilchen-Paare mit elektrisch geladenen als auch mit elektrisch neutralen Leptonen entstehen können.

Aus den relativen Häufigkeiten, mit denen ein bestimmter Umwandlungskanal realisiert wird, können wichtige Schlussfolgerungen über die Eigenschaften der beteiligten Anti-/Teilchen sowie über die zugrundeliegende Wechselwirkung gezogen werden (siehe Kapitel 4.3.3). Für die drei Kategorien möglicher Z-Umwandlungen haben diese Häufigkeiten<sup>47</sup> die folgenden Werte (vgl. Nakamura et al., 2011):

- $Z \rightarrow l^- + l^+$  (el. geladene Leptonen): **10%**
- $Z \rightarrow \nu + \bar{\nu}$  (el. neutrale Leptonen): **20%**
- $Z \rightarrow q + \bar{q}$  (hadronisch) **70%**

Im Folgenden werden zuerst die möglichen Umwandlungskanäle des Z-Teilchens diskutiert, bei denen ein Lepton-Anti-Lepton-Paar entsteht. Anschließend erfolgt eine Diskussion der hadronischen Umwandlungskanäle.

#### Die leptonischen Umwandlungskanäle des Z-Teilchens

Aufgrund der Erhaltung der elektrischen Ladung können entweder zwei elektrisch neutrale Leptonen oder zwei elektrisch geladene Leptonen entstehen, wobei es sich um ein Teilchen-Anti-Teilchen-Paar aus der gleichen Generation handeln muss. Dies folgt aus den Dupletts der schwachen Ladung (siehe Kapitel 3.5).

Ereignisse mit einem elektrisch geladenen und einem elektrisch neutralen Lepton sind nicht möglich. Es ergeben sich also die folgenden drei Möglichkeiten für die Umwandlung in elektrisch geladene Leptonen:

---

<sup>47</sup> Hier werden gerundete Werte angegeben, weshalb auf die Angabe der Fehler verzichtet wird.

- $Z \rightarrow e^- + e^+$
- $Z \rightarrow \mu^- + \mu^+$
- $Z \rightarrow \tau^- + \tau^+$

Tauonen und Anti-Tauonen sind nicht stabil und wandeln sich sehr schnell in andere Anti-/Teilchen um, weshalb sie mit dem OPAL-Detektor nicht direkt beobachtet werden konnten. Im Fall  $Z \rightarrow \tau^- + \tau^+$  können also weitere Ereignistypen unterschieden werden. In der nachfolgenden Tabelle sind die wahrscheinlichsten Kombinationen von Anti-/Teilchen angegeben, die nach der Umwandlung eines Anti-/Tauons auftreten können<sup>48</sup> (vgl. <http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/tautau.html>). Mitunter entstehen bei der Umwandlung eines Anti-/Tauons sehr kurzlebige instabile Hadronen<sup>49</sup>, die sich sofort wieder umwandeln. In der Tabelle sind lediglich die finalen Umwandlungsprodukte angegeben, deren Signaturen schließlich im OPAL-Eventdisplay sichtbar waren<sup>50</sup>.

- |   |     |   |
|---|-----|---|
| • $\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$         | 18% | • $\tau^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\tau$               |
| • $\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$     | 18% | • $\tau^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu + \bar{\nu}_\tau$           |
| • $\tau^- \rightarrow h^- + \nu_\tau + x\gamma$             | 49% | • $\tau^+ \rightarrow h^+ + \bar{\nu}_\tau + x\gamma$             |
| • $\tau^- \rightarrow h^- + h^+ + h^- + \nu_\tau + x\gamma$ | 15% | • $\tau^+ \rightarrow h^+ + h^- + h^+ + \bar{\nu}_\tau + x\gamma$ |

$h^-$  und  $h^+$  bezeichnen hier elektrisch negativ bzw. positiv geladene Hadronen<sup>51</sup> und  $x\gamma$  repräsentiert eine beliebige Anzahl an Photonen. Die Umwandlungen des Tauons und des Anti-Tauons, welche aus einem Z-Teilchen entstanden sind, sind dabei unabhängig voneinander. Die Beobachtung von Umwandlungen der Anti-/Tauonen lieferte aufgrund der entstehenden Hadronen wichtige Erkenntnisse zur starken Wechselwirkung (Schopper 2009, S.127).

48 Mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit können auch fünf geladene Hadronen entstehen. Umwandlungen eines Anti-/Tauons in mehr als fünf geladene Hadronen wurden bisher nicht beobachtet (vgl. Olive et al., 2015).

49 z.B.  $\pi^0$ -Mesonen.

50 Die Umwandlungskanäle des Anti-Tauons erhält man durch Austausch von Teilchen und Anti-Teilchen in den für das Tauon aufgeführten Umwandlungskanälen.

51 Dabei handelt es sich um Pionen oder Kaonen.

Mitunter sehen Ereignisse vom Typ  $Z \rightarrow \tau^- + \tau^+$  im Eventdisplay anderen Umwandlungskanälen sehr ähnlich. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn sich Tauon und Anti-Tauon in ein Myon und ein Anti-Myon (und vier zusätzliche Anti-/ Neutrinos) umwandeln (siehe Abb. 26). Die entstandenen Anti-/Neutrinos konnten mit dem OPAL-Detektor nicht nachgewiesen werden, weshalb sich dieses Ereignis von der direkten Erzeugung eines Myon-Anti-Myon-Paares auf den ersten Blick schwer unterscheiden lässt. Allerdings tragen die vier undetektierten Anti-/Neutrinos Energie davon, die dem Myon-Anti-Myon-Paar fehlt. Dies ist an den Energiedaten im Eventdisplay erkennbar. Teilweise kann man auch aus den Farben der Spuren in der Spurkammer darauf schließen, dass Anti-/Neutrinos entstanden sein müssen. Das ist allerdings nur der Fall, wenn der Impuls des Anti-/Myons klein genug war<sup>52</sup>. Dies trifft auf eines der Anti-/Teilchen in Abbildung 26 zu. Gleiches gilt, wenn sich das Tauon-Anti-Tauon-Paar in ein Elektron-Positron-Paar umwandelt.

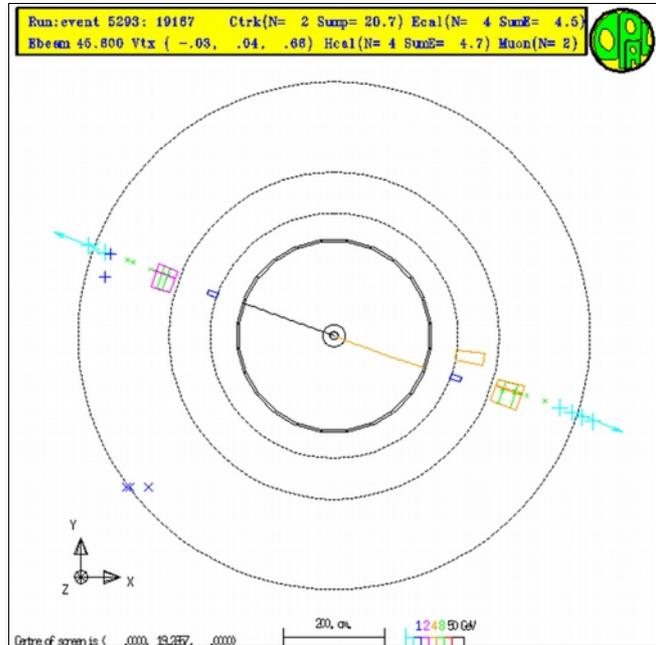


Abbildung 26: Signatur eines Myon-Anti-Myon-Paares im OPAL-Eventdisplay, welches durch Umwandlung eines Tauon-Anti-Tauon-Paares entstanden ist.

Bei den Umwandlungen des Z-Teilchens in elektrisch neutrale Leptonen muss ebenfalls ein Teilchen-Anti-Teilchen-Paar entstehen, da andernfalls die schwache Ladung nicht erhalten bliebe. Dabei handelt es sich genau wie bei den elektrisch geladenen Anti-/Leptonen um Anti-/Teilchen der gleichen Generation. Somit sind lediglich die folgenden drei Umwandlungen in elektrisch neutrale Leptonen möglich:

- $Z \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e$
- $Z \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$
- $Z \rightarrow \nu_\tau + \bar{\nu}_\tau$

<sup>52</sup> Die Grenzimpuls für die Änderung der Spurfarbe beträgt  $16 \frac{\text{GeV}}{c}$ .

## Die hadronischen Umwandlungskanäle des Z-Teilchens

Wie bereits dargelegt wurde, kann sich ein Z-Teilchen ebenfalls in ein Quark-Anti-Quark-Paar umwandeln, wobei die Quarks selbst nicht im Eventdisplay sichtbar sind, sondern sofort hadronisieren. Sichtbar sind also nur die zwei Jets der Umwandlungsprodukte (siehe Abb. 27). Allerdings kann sich das Z-Teilchen aufgrund der in Kapitel 4.3.1 genannten Bedingungen nicht in beliebige Quark-Anti-Quark-Paare umwandeln.

Die Entstehung eines Top- bzw. Anti-Top-Quarks ist ausgeschlossen, da deren Masse<sup>53</sup> die des Z-Teilchens übersteigt. Zudem muss aufgrund der Erhaltung der starken Ladung das Anti-Quark den zum Farbladungsvektor des Quarks zugeordneten Anti-Farbladungsvektor besitzen. Ist der Farbladungsvektor des Quarks zum Beispiel rot, so besitzt das Anti-Quark einen anti-roten Anti-Farbladungsvektor. Außerdem erlauben die Dupletts der schwachen Wechselwirkung nur Umwandlungen, bei denen Quark und Anti-Quark derselben Generation angehören.

Z-Umwandlungen sind bei Elektron-Positron-Collidern der effektivste Prozess zur Erzeugung von Bottom- und Anti-Bottom-Quarks sowie von Hadronen, die solche Anti-/Quarks enthalten (vgl. Burkhardt & Steinberger, 1991; Treille, 2002). Daher konnten diese Quarks sowie Hadronen, die Bottom- oder Anti-Bottom-Quarks enthalten, bei den LEP-Experimenten besonders intensiv studiert werden. Wesentliche Ergebnisse dieser Untersuchungen sind unter anderem bei Barker (2010), Haag (2002) und Marinelli (2002) zu finden.

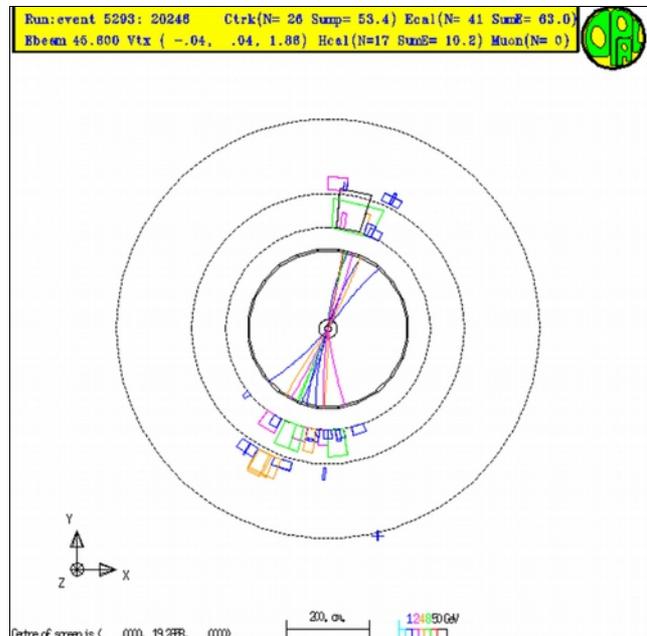


Abbildung 27: Signaturen zweier Jets im OPAL-Eventdisplay, die nach der Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Quark-Anti-Quark-Paar entstanden sind

<sup>53</sup>  $m_t = m_{\bar{t}} \approx 173 \frac{\text{GeV}}{c^2}$

### 4.3.3 Ergebnisse der Analyse von Umwandlungen des Z-Teilchens

Im Folgenden werden drei der wichtigsten Schlussfolgerungen vorgestellt, welche aus den am LEP beobachteten Häufigkeiten bestimmter Umwandlungskanäle des Z-Teilchens gezogen werden konnten.

#### Die Leptonenuniversalität

Bereits vor der Inbetriebnahme von LEP gab es deutliche Hinweise darauf, dass die elektrisch geladenen Leptonen die gleichen elektrischen, schwachen und starken Ladungen<sup>54</sup> besitzen. Bei den LEP-Messungen hoffte man diese Annahme bestätigen zu können.

Die Auswertung der experimentellen Daten hat ergeben, dass die drei Umwandlungskanäle  $Z \rightarrow e^- + e^+$ ,  $Z \rightarrow \mu^- + \mu^+$  und  $Z \rightarrow \tau^- + \tau^+$  mit gleicher Wahrscheinlichkeit realisiert werden. Jeder der drei Umwandlungskanäle wurde in etwa in 3,4 Prozent der insgesamt beobachteten Z-Umwandlungen realisiert. Das bedeutet, dass das Z-Teilchen an die unterschiedlichen geladenen Leptonen mit gleicher Stärke koppelt. Dies lässt den Schluss zu, dass die elektrischen und schwachen Ladungen dieser Teilchen (und entsprechend auch die der zugehörigen Anti-Teilchen) dieselben Werte besitzen, da das Z-Teilchen sowohl an die schwache als auch an die elektrische Ladung koppelt. Elektronen, Myonen und Tauonen verhalten sich demnach bei Wechselwirkungen identisch<sup>55</sup>. Gleiches gilt entsprechend für die zugehörigen Anti-Teilchen. Dieser Sachverhalt wird als *Leptonenuniversalität* bezeichnet und wurde bei der Auswertung der LEP-Daten mit verschwindend kleiner Unsicherheit bestätigt. Der einzige Unterschied besteht in den Massen der Anti-/Teilchen und den dadurch hervorgerufenen Unterschieden in deren Wechselwirkungsverhalten. Da diese Massenunterschiede jedoch sehr klein gegenüber der Masse des Z-Teilchens sind, spielte dieser Aspekt bei den Experimenten am LEP keine Rolle<sup>56</sup>.

---

54 Die Farbneutralität bezüglich der starken Ladung war bereits vor den LEP-Messungen experimentell gesichert, da weder eine Umwandlungen der Leptonen in Anti-/Quarks noch eine Gluonabstrahlung beobachtet werden konnte.

55 Gemeint sind elektrische und schwache Wechselwirkung, da die Leptonen als farbneutrale Anti-/Teilchen nicht an der starken Wechselwirkung teilnehmen.

56 Bei geringen Energien (im Bereich der Leptonenmassen) verhalten sich die verschiedenen geladenen Leptonen unterschiedlich.

## Messung des starken Kopplungsparameters $\alpha_s$

Der starke Kopplungsparameter  $\alpha_s$  ist energieabhängig<sup>57</sup>. Diese Abhängigkeit wird vom Standardmodell beschrieben. Die genauen Werte des Parameters bei bestimmten Energien werden allerdings vom Standardmodell nicht vorhergesagt und mussten demnach experimentell bestimmt werden. Theoretisch reicht die Bestimmung des Wertes für eine Energie. Durch die bekannte Energieabhängigkeit können anschließend die Werte für beliebige Energien berechnet werden. Der Wert des starken Kopplungsparameters wurde allerdings bei den LEP-Experimenten und bei anderen Experimenten für unterschiedliche Energien bestimmt. So konnten die

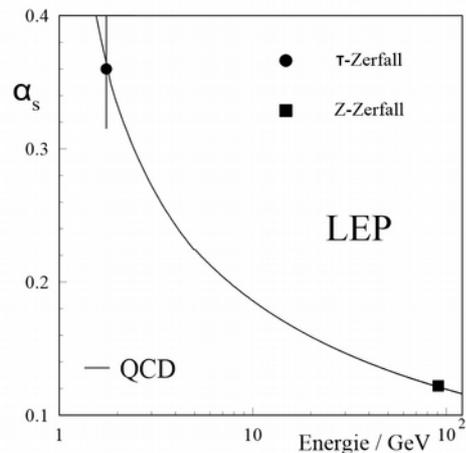


Abbildung 28: Theoretischer Verlauf (QCD-Quantenchromodynamik) der Energieabhängigkeit des starken Kopplungsparameters und Messwerte aus der Analyse von Anti-Tauon- und Z-Umwandlungen

Vorhersagen des Standardmodells überprüft werden. Dafür nutzte man die vom Standardmodell vorhergesagte Energieabhängigkeit und rechnete den bei einer bestimmten Energie gefundenen Wert des Kopplungsparameters auf eine Referenzenergie um. Üblicherweise ist dies die Ruhenergie des Z-Teilchens. So erhält man aus verschiedenen Experimenten Werte für  $\alpha_s(E_Z)$ <sup>58</sup>.

Alle am LEP durchgeführten Messungen waren untereinander konsistent und haben die Vorhersagen des Standardmodells bestätigt (vgl. Ward, 2002). Abbildung 28 zeigt den theoretischen Verlauf der Energieabhängigkeit von  $\alpha_s$  sowie die Messwerte, die sich bei der Untersuchung von Anti-/Tauon-Umwandlungen und Z-Umwandlungen am LEP ergeben haben.

Zur Bestimmung von  $\alpha_s$  existieren viele unterschiedliche und unabhängige Möglichkeiten. In den LEP-Experimenten kamen über ein Dutzend verschiedene Methoden zum Einsatz, wobei sich der Mittelwert  $\alpha_s(E_Z) = 0,122 \pm 0,006$  ergab (vgl. Schmüser, 1995). Eine dieser Methoden wird im Folgenden vorgestellt.

Bei der Umwandlung eines Z-Teilchens entsteht in etwa 70 Prozent der Fälle ein Quark-Anti-Quark-Paar. Das verallgemeinerte Feynman-Diagramm einer solchen Umwandlung ist in Abbildung 29 dargestellt.

57 Das bedeutet,  $\alpha_s$  ist abhängig von der Energie der Anti-/Teilchen, zwischen denen ein Prozess der starken Wechselwirkung stattfindet.

58 Bei der Verwendung natürlicher Einheiten entspricht die Energie des Z-Teilchens dessen Masse. Daher wird in der Fachliteratur die Bezeichnung  $\alpha_s(m_Z)$  verwendet.

Anschließend an eine derartige Umwandlung kann es passieren, dass eines der beiden Anti-/Quarks ein Gluon abstrahlt, wobei es seinen Farbladungsvektor ändert. Abbildung 30 zeigt die beiden Feynman-Diagramme, mit denen dieser Prozess, der auch als *Gluon-Bremsstrahlung* bezeichnet wird, beschrieben werden kann. Das emittierte Gluon hadronisiert genau wie das Quark und das Anti-Quark, wobei sich ein dritter Jet bildet. In Abbildung 31 ist das Bild eines solchen 3-Jet-Ereignisses<sup>59</sup>

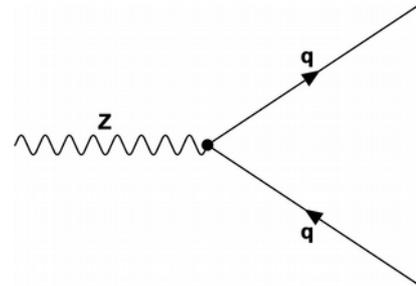


Abbildung 29: Feynman-Diagramm für die Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Quark-Anti-Quark-Paar

im OPAL-Eventdisplay zu sehen. Dort sind mehrere Energieeinträge in der Spurkammer sichtbar. Diese stammen von Anti-/Teilchen, die in den Vorwärtskalorimetern detektiert wurden. Aus Projektionsgründen befinden sich die Einträge an dieser ungewöhnlichen Stelle.

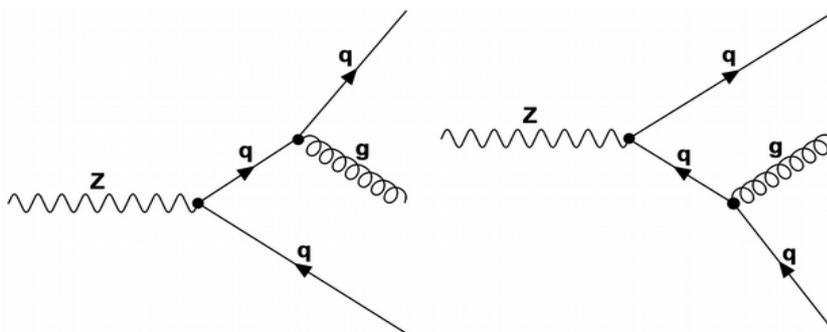


Abbildung 30: Die beiden möglichen Feynman-Diagramme für die Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Quark-Anti-Quark-Paar mit anschließender Emission von Gluon-Bremsstrahlung

Das dargestellte Feynman-Diagramm für die Entstehung eines 3-Jet-Ereignisses unterscheidet sich von dem eines 2-Jet-Ereignisses durch einen zusätzlichen Vertex, an dem die Emission des Gluons stattfindet. Jeder zusätzliche Vertex in einem Feynman-Diagramm beeinflusst die Wahrscheinlichkeit, dass der dargestellte Prozess realisiert wird. Pro Vertex kommt ein Faktor zur Wahrscheinlichkeit hinzu, der direkt proportional zum Kopplungsparameter der am Vertex stattfindenden Wechselwirkung ist<sup>60</sup>. In dem hier betrachteten Fall ist dies der starke Kopplungsparameter  $\alpha_s$ . Zwischen den Wahrchein-

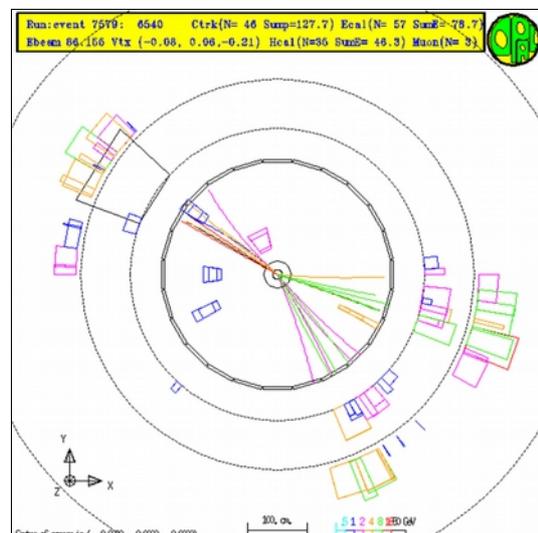


Abbildung 31: Visualisierung eines 3-Jet-Ereignisses im OPAL-Eventdisplay

59 Durch die Beobachtung und Analyse solcher 3-Jet-Ereignisse am PETRA-Beschleuniger (DESY, Hamburg) konnte 1977 die Existenz von Gluonen bestätigt werden. (vgl. Schopper, 2009)

60 Da alle Kopplungsparameter betragsmäßig deutlich kleiner als Eins sind, verringert sich mit steigender Anzahl der Vertices die Wahrscheinlichkeit für die Realisierung des entsprechenden Prozesses.

lichkeiten für die Beobachtung eines 2-Jet- und eines 3-Jet-Ereignisses ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$P(3\text{-Jet}) = k \cdot \alpha_s(E_Z) \cdot P(2\text{-Jet})$$

Dabei ist  $k$  ein Parameter, der unter anderem vom Impulsübertrag zwischen Anti-/Quark und Gluon abhängt. Er beschreibt also die Energieabhängigkeit des starken Kopplungsparameters. Dieser kann aus den Gesamtimpulsen und den Energiedepositionen der zu den jeweiligen Jets gehörenden Anti-/Teilchen berechnet werden. Der energieärmste Jet stammt dabei mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit von dem emittierten Gluon (vgl. Hebbeker, 2005). In den Parameter  $k$  gehen noch weitere Größen ein, die an dieser Stelle nicht diskutiert werden können. Es ist jedoch möglich,  $k$  für ein beobachtetes 3-Jet-Ereignis aus den experimentellen Daten zu berechnen.

Während der LEP-Forschung wurden Millionen von hadronischen Umwandlungen des Z-Teilchens beobachtet. Aufgrund dieser großen Zahl, lässt sich aus den beobachteten absoluten Häufigkeiten ( $H$ ) für 2-Jet und 3-Jet-Ereignisse sehr präzise auf die zugrundeliegenden Wahrscheinlichkeiten schließen.

$$\frac{H(3\text{-Jet})}{H(2\text{-Jet})} = \bar{k} \cdot \alpha_s(E_Z)$$

Das Verhältnis von 3-Jet- zu 2-Jet-Ereignissen ist also direkt proportional zum starken Kopplungsparameter. In den Proportionalitätsfaktor  $\bar{k}$  gehen die einzelnen Parameter  $k$  aus den Wahrscheinlichkeiten für die Realisierung der beobachteten 3-Jet-Ereignisse ein. Es wird also die Energie berücksichtigt, bei der die starke Wechselwirkung stattgefunden hat. Weiterhin sind darin verschiedene andere komplexe Korrekturen enthalten, auf die an dieser Stelle nicht ausführlich eingegangen werden kann. Zum Beispiel wird berücksichtigt, dass die beobachteten Signaturen auch von Ereignissen stammen können, deren Feynman-Diagramme weitere Vertices besitzen und dass schwerere Anti-/Quarks<sup>61</sup> seltener ein Gluon emittieren als leichtere. Die notwendigen Korrekturen aufgrund des letztgenannten Effektes sind allerdings relativ gering, da selbst die Massen der entstandenen schwereren Anti-/Quarks klein gegenüber der Z-Masse sind.

Bei der Anwendung dieses Verfahrens zur Bestimmung des starken Kopplungsparameters treten einige Schwierigkeiten auf, was allerdings auch bei anderen Methoden der Fall ist. Es kommt zum Beispiel häufig vor, dass das Gluon annähernd parallel zur Bewegungsrichtung des abstrahlenden Anti-/Quarks emittiert wird. Dadurch können sich die beiden entstehenden Jets

---

<sup>61</sup> Damit sind Anti-/Bottom- und Anti-/Charm-Quarks gemeint. Anti-/Top-Quarks konnten aufgrund ihrer großen Masse bei einer Z-Umwandlung nicht entstehen.

überlagern. Dies macht es oft schwierig 3-Jet-Ereignisse zu identifizieren bzw. von 2-Jet-Ereignissen zu unterscheiden (vgl. Schmüser, 1995). Diese Unterscheidung war am LEP allerdings deutlich einfacher als bei früheren Experimenten (z.B. am PETRA-Beschleuniger), da die Jets aufgrund der deutlich höheren Energien am LEP sehr viel schmaler waren (vgl. Schopper, 2009).

Zum anderen muss das Gluon nicht direkt von einem der beiden primären Anti-/Quarks aus der Umwandlung des Z-Teilchens abgestrahlt werden. Es ist ebenfalls möglich, dass ein Anti-/Quark, welches erst während des Hadronisierungsprozesses entsteht, ein Gluon emittiert und es somit zur Entstehung eines 3-Jet-Ereignisses kommt. Die durch ein solches Gluon erzeugten Jets weisen allerdings geringere Gesamtimpulse und -energien auf, sodass sie durch die Anwendung geeigneter Datenfilter von den Berechnungen ausgeschlossen werden können. Außerdem werden in den Berechnungen Korrekturen vorgenommen, die unter anderem den Einfluss solcher Ereignisse berücksichtigen, da eine hundertprozentig genaue Selektion nicht möglich ist. Diese Korrekturen sind einer der dominanten Faktoren in der experimentellen Unsicherheit bei der Bestimmung des starken Kopplungsparameters mit der vorgestellten Methode (vgl. Hebbeker, 2005).

Wie bereits erwähnt existieren viele weitere Methoden zur Bestimmung von  $\alpha_s$  (vgl. Schmüser 1995; Schopper, 2009; Ward, 2002). Zum Beispiel kann dies über die Bestimmung des Wirkungsquerschnittes für die Entstehung von Hadronen bei Elektron-Positron-Annihilationen geschehen. Außerdem kann eine präzise Bestimmung bei sehr geringen Energien<sup>62</sup> über das Verhältnis aus hadronischen und leptonischen Umwandlungen von Anti-/Tauonen geschehen. Auch aus Experimenten zur tiefinelastischen Lepton-Nukleon-Streuung kann eine Bestimmung des starken Kopplungsparameters erfolgen (vgl. Hebbeker, 2005).

Ein weiteres Ergebnis der LEP-Forschung zur starken Wechselwirkung war die Identifizierung von 4-Jet-Ereignissen, die ein Beleg für die Selbstkopplung zwischen Gluonen ist (vgl. Schopper, 2009).

---

62 Genauer: bei der Ruheenergie der Anti-/Tauonen ( $\approx 1,78$  GeV).

## Die Anzahl unterschiedlicher Neutrinos

Ein weiteres wichtiges Ergebnis der LEP-Forschung ist die Bestätigung, dass mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit nur die drei bisher bekannten Arten leichter Anti-/Neutrinos existieren.

Vor den Experimenten am LEP wurde die Grenze für die Anzahl  $N_\nu$  der möglichen Generationen leichter Anti-/Neutrinos bei der Auswertung von Daten aus früheren Experimenten (ASP, CELLO, MAC, MARKJ und VENUS) untersucht, welche bei deutlich geringerer Kollisionsenergie durchgeführt wurden. Diese Grenze wurde zu  $N_\nu < 4,8$  auf einem Konfidenzniveau von 95% bestimmt (vgl. Nakamura et al., 2010). In den LEP-Experimenten konnte  $N_\nu$  mit deutlich höherer Präzision bestimmt werden.

Dazu wurde die „unsichtbare“ Partialbreite<sup>63</sup> ( $\Gamma_{inv}$ ) des Z-Teilchens (also der Anteil an der totalen Zerfallsbreite, welcher der Entstehung eines Neutrino-Anti-Neutrino-Paares zuzuordnen ist) bestimmt, indem die gemessene Partialbreite für die Umwandlungen in geladene Leptonen ( $\Gamma_{lep}$ ) sowie die der hadronischen Umwandlungen ( $\Gamma_{had}$ ) von der totalen Zerfallsbreite ( $\Gamma_Z$ ) des Z-Teilchens (diese wurde am LEP sehr genau bestimmt) subtrahiert wurde. Die totale Zerfallsbreite berechnet sich gemäß der folgenden Gleichung:

$$\Gamma_Z = \Gamma_{had} + \Gamma_{lep} + \Gamma_{inv}$$

Bei  $\Gamma_{inv}$  handelt es sich um den Anteil an der totalen Zerfallsbreite, welcher Umwandlungen in Neutrino-Anti-Neutrino-Paare beinhaltet. Prinzipiell könnten auch Umwandlungen in bisher unbekannte Anti-/Teilchen zu dieser Partialbreite beitragen (vgl. Schopper, 2009). Diese dürften dann allerdings genau wie die Anti-/Neutrinos lediglich der schwachen Wechselwirkung unterliegen, da sie sonst im Detektor hätten nachgewiesen werden können.

$\Gamma_{lep}$  ist dabei die gesamte gemessene leptonische Partialbreite. Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Leptonenuniversalität gilt der folgende Zusammenhang:

---

63 Die totale Zerfallsbreite  $\Gamma$  eines Teilchens entspricht allgemein der Summe  $\Gamma = \sum_i \Gamma_i$  über die Partialbreiten  $\Gamma_i$  aller möglichen Umwandlungskanäle. Sie hängt über  $\Gamma = \frac{\hbar}{\tau}$  mit der mittleren Lebensdauer  $\tau$  des Teilchens zusammen. Verwendet man wie in der Teilchenphysik üblich natürliche Einheiten ( $\hbar = c = 1$ ), so entspricht sie dem Inversen der mittleren Lebensdauer. Das Verzweigungsverhältnis für einen Umwandlungskanal berechnet sich durch  $B_i = \frac{\Gamma_i}{\Gamma}$  als Verhältnis aus zugehöriger Partialbreite und totaler Zerfallsbreite. Es gibt also die Wahrscheinlichkeit an, mit welcher dieser Umwandlungskanal realisiert wird.

$$\Gamma_{\text{lep}} = 3 \cdot \Gamma_e = 3 \cdot \Gamma_\mu = 3 \cdot \Gamma_\tau$$

Dabei bezeichnen  $\Gamma_e$ ,  $\Gamma_\mu$  und  $\Gamma_\tau$  die Partialbreiten für Umwandlungen in Elektron-Positron-, Myon-Anti-Myon- bzw. Tauon-Anti-Tauon-Paare.

Innerhalb des Standardmodells lässt sich der Beitrag  $(\Gamma_\nu)_{\text{SM}}$  berechnen, welchen jede Neutrino- generation zur unsichtbaren Zerfallsbreite liefert. Damit könnte nun sofort die Anzahl der möglichen Neutrino- generationen über den folgenden Zusammenhang berechnet werden:

$$N_\nu = \frac{\Gamma_{\text{inv}}}{(\Gamma_\nu)_{\text{SM}}}$$

Um die Abhängigkeit der Berechnung von den Vorhersagen des Standardmodells zu verringern, wurde allerdings anstelle der vom Standardmodell vorhergesagten unsichtbaren Partialbreite die Vorhersage für das Verhältnis aus leptonischer Partialbreite und der Partialbreite pro Neutrino- generation verwendet (vgl. Nakamura et al., 2010). Damit ergibt sich die folgende Formel zur Berechnung der Anzahl der Neutrino- generationen:

$$N_\nu = \frac{\Gamma_{\text{inv}}}{\Gamma_{\text{lep}}} \cdot \left( \frac{\Gamma_{\text{lep}}}{\Gamma_\nu} \right)_{\text{SM}}$$

Dabei ist der erste Faktor das Verhältnis der berechneten unsichtbaren Partialbreite zur gemessenen leptonischen Partialbreite und der zweite Faktor das oben beschriebene Partialbreitenverhältnis gemäß den Vorhersagen des Standardmodells. Die Kombination der Ergebnisse der vier LEP-Experimente ergab  $N_\nu = 3,00 \pm 0,08$  (Nakamura et al. 2010).

Die Ergebnisse sind in voller Übereinstimmung mit den bisher beobachteten drei Generationen leichter Neutrinos. Sie haben allerdings weitreichendere Folgen. Da jeder Neutrino- typ gemeinsam mit einem elektrisch geladenen Lepton eine Leptonengeneration bildet, folgt aus den Beobachtungen, dass keine weiteren als die bisher bekannten drei elektrisch geladenen Leptonen und Anti-Leptonen existieren. Aufgrund von Symmetrien zwischen Leptonen und Quarks lässt sich schließlich folgern, dass lediglich die bisher im Standardmodell enthaltenen elementaren Anti-/Materieteilchen existieren. (vgl. Schopper, 2009). Diese Folgerungen wurden allesamt unter der Annahme gemacht, dass es keine Anti-/Neutrinos gibt, die zu schwer sind, als dass sie bei den Experimenten hätten erzeugt werden können.

Die vorgestellte Methode zur Bestimmung der Anzahl der unterschiedlichen Anti-/Neutrinos kann in der Schule nur dann angewendet werden, wenn die Zerfallsbreite von Anti-/Teilchen im Unterricht behandelt wurde. Es besteht ein Zusammenhang zwischen den Partialbreiten und

den relativen Häufigkeiten der Realisierung bestimmter Umwandlungen. Dieser eignet sich in diesem Fall jedoch nicht zur Beschreibung der Methode, da diese Häufigkeiten im Fall von Umwandlungen des Z-Teilchens in ein Neutrino-Anti-Neutrino-Paar aufgrund der Unmöglichkeit der Detektion der Anti-/Neutrinos nicht experimentell bestimmt werden konnten.

Bei den LEP-Experimenten wurde eine weitere Methode zur Bestimmung der Anzahl der unterschiedlichen Neutrinos eingesetzt, welche auch ohne die genannten Kenntnisse nachvollzogen werden kann. Diese Methode wird im Folgenden vorgestellt. In den Arbeitsmaterialien für den Unterricht (siehe Kapitel 5) wird dieser Ansatz ebenfalls betrachtet.

Obwohl Umwandlungen eines Z-Teilchens in ein Neutrino-Anti-Neutrino-Paar nicht direkt beobachtet werden konnten, war es unter bestimmten Bedingungen dennoch möglich, darauf zu schließen, dass eine solche Umwandlung stattgefunden hat.

Im vorangegangenen Abschnitt zur Bestimmung des starken Kopplungsparameters wurde eine Methode vorgestellt, die auf der Identifikation von Ereignissen beruht, bei denen

von einem der Umwandlungsprodukte eines Z-Teilchens ein Botenteilchen emittiert wurde. Die Emission von Botenteilchen durch Anti-/Materieteilchen kann auch in der Forschung zu Anti-/Neutrinos ausgenutzt werden.

Bereits vor der Entstehung eines Z-Teilchens bei einer Elektron-Positron-Kollision konnte es passieren, dass das Elektron oder das Positron ein Photon abstrahlte<sup>64</sup>. Wenn bei der anschließenden Kollision ein Z-Teilchen erzeugt wurde, welches sich dann in ein Neutrino-Anti-Neutrino-Paar umgewandelt hat, war lediglich die Signatur des abgestrahlten Photons zu erkennen. So war es möglich, diese Ereignisse zu zählen. Das vollständige Feynman-Diagramm des beschriebenen Prozesses ist in Abbildung 32 dargestellt.

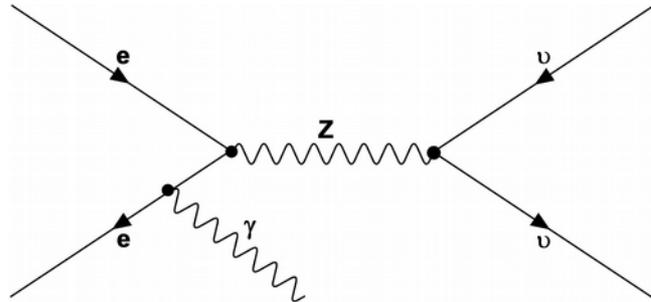


Abbildung 32: Feynman-Diagramm der Erzeugung eines Z-Teilchens und dessen anschließender Umwandlung in ein Neutrino-Anti-Neutrino-Paar mit der Abstrahlung eines Photons vor der Erzeugung des Z-Teilchens

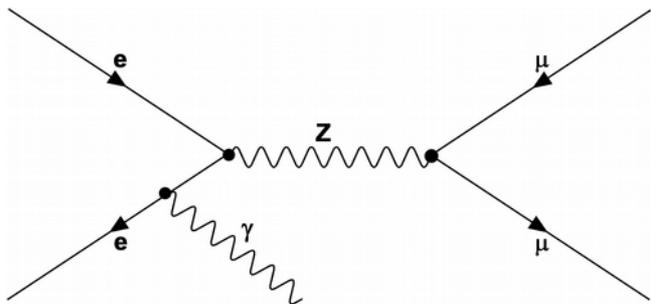


Abbildung 33: Feynman-Diagramm der Erzeugung eines Z-Teilchens und dessen anschließender Umwandlung in ein Myon-Anti-Myon-Paar mit der Abstrahlung eines Photons vor der Erzeugung des Z-Teilchens

<sup>64</sup> Die von den im LEP zirkulierenden Elektronen und Positronen abgestrahlten Botenteilchen werden als *initial state radiation* bezeichnet.

Die Abstrahlung des Photons durch das einlaufende Elektron bzw. Positron ist unabhängig davon, welcher Umwandlungskanal des Z-Teilchens anschließend realisiert wird. Ereignisse, bei denen sich das Z-Teilchen in ein Myon-Anti-Myon-Paar umgewandelt hat und gleichzeitig ein vorher abgestrahltes Photon registriert wurde, konnten ebenfalls gut identifiziert werden. Das Feynman-Diagramm dieses Prozesses ist in Abbildung 33 zu sehen. Das detektierte Photon könnte auch von einem der beiden Anti-/Teilchen des bei der Z-Umwandlung entstandenen Myon-Anti-Myon-Paares emittiert worden sein<sup>65</sup>. Daher musste eine weitere Selektion der Ereignisse durchgeführt werden. Eine Abstrahlung des Photons vor der Elektron-Positron-Kollision hatte zur Folge, dass sich das Photon unter kleinem Winkel zur Strahlachse bewegt hat. Wenn das Photon also in den Vorwärtskalorimetern detektiert wurde, so kann man mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass dieses bereits vor der Erzeugung des Z-Teilchens abgestrahlt wurde.

Die in den Abbildungen 32 und 33 dargestellten Feynman-Diagramme unterscheiden sich lediglich in den nach der Z-Umwandlung auslaufenden Anti-/Teilchen. Die Anzahl der Vertices und die vorhandenen Botenteilchen sind identisch. Der Unterschied liegt demnach lediglich im Vertex, an dem die Z-Umwandlung stattfindet. Aus dem Verhältnis der Häufigkeiten, mit denen die beiden Ereignisse jeweils beobachtet wurden, kann also auf Unterschiede zwischen denjenigen Eigenschaften von Anti-/Neutrinos und Anti-/Myonen<sup>66</sup> geschlossen werden, welche die Stärke der Kopplung dieser Anti-/Teilchen an das Z-Teilchen und somit auch die Wahrscheinlichkeiten der entsprechenden Z-Umwandlungen bestimmen.

Das Standardmodell sagt dieses Verhältnis in Abhängigkeit von der Anzahl der existierenden Neutrino-Generationen voraus. Die beobachteten Häufigkeiten sind konsistent mit den Ergebnissen, die über die Bestimmung der Partialbreiten gewonnen wurden (vgl. Montagna, Moretti, Nicosini & Piccinini, 1998). Auch mit dieser Methode wurde also bestätigt, dass lediglich die drei bisher bekannten Arten leichter Anti-/Neutrinos existieren.

---

<sup>65</sup> In einem solchen Fall spricht man von *final state radiation*.

<sup>66</sup> Prinzipiell könnte man auch Ereignisse betrachten, bei denen sich ein Z-Teilchen in ein Elektron-Positron-Paar oder ein Tauon-Anti-Tauon-Paar umgewandelt hat. Bei Tauon-Anti-Tauon-Paaren besteht allerdings das Problem, dass sich diese Anti-/Tauonen sehr schnell in andere Anti-/Teilchen umwandeln, wobei es zur Entstehung von Photonen kommen kann. Daher ist die Nutzung dieses Umwandlungskanals bei der vorgestellten Methode ungünstig. Anti-/Myonen strahlen im Vergleich zu Elektronen und Positronen aufgrund ihrer deutlich größeren Masse seltener Photonen ab. Deshalb kann die Anzahl der Ereignisse, bei denen das Photon vor der Entstehung des Z-Teilchens emittiert wurde, im Fall der myonischen Umwandlungen des Z-Teilchens genauer bestimmt werden.

## 5 Vorstellung der Arbeitsmaterialien

Im Folgenden werden Arbeitsmaterialien (siehe Anhang) vorgestellt, die zur Behandlung moderner teilchenphysikalischer Forschungsmethoden am Beispiel des OPAL-Experiments eingesetzt werden können. Zuerst werden die Grobziele genannt, die durch den Einsatz der Materialien erreicht werden können sowie das dafür benötigte Vorwissen aufgeführt. Danach werden allgemeine Hinweise zum Einsatz der Materialien und den Inhalten der zugehörigen Hinweisblätter gegeben.

### 5.1 Grobziele und benötigtes Vorwissen

#### Vorwissen:

Damit die vorliegenden Arbeitsmaterialien im Unterricht eingesetzt werden können, müssen die Schüler Vorkenntnisse zu den folgenden teilchenphysikalischen Themen besitzen. Eine Spezifizierung des jeweils benötigten Vorwissens findet in den Hinweisblättern zu den einzelnen Arbeitsmaterialien statt.

- Standardmodell der Teilchenphysik
  - elementare Anti-/Materieteilchen
  - Begriffe Hadron und Lepton
  - fundamentale Wechselwirkungen und ihre Vermittlung durch Botenteilchen
  - elektrische, schwache und starke Ladung
  - Kopplungsparameter der starken Wechselwirkungen
  - Kopplung des Z-Teilchens an die schwache und die elektrische Ladung
- teilchenphysikalische Einheiten für Masse, Energie und Impuls
- Erhaltungsgrößen bei Anti-/Teilchenumwandlungen
- Grundlagen zu Kollisionsexperimenten

- Grundlagen zu Teilchenbeschleunigern
  - Large Electron-Positron Collider
- Teilchendetektoren
  - Spurkammern, elektromagnetische und hadronische Kalorimeter, Myonenkammern
- Feynman-Diagramme

Hinweise und Arbeitsmaterialien, die bei der Erarbeitung des benötigten Vorwissens hilfreich sein können, sind in den Materialien von Netzwerk Teilchenwelt (2013, 2015) zu finden.

#### Lernziele:

Durch den Einsatz der vorliegenden Unterrichtsmaterialien können die folgenden Lernziele erreicht werden:

Die Schüler:

- festigen ihr Wissen zu:
  - Teilchendetektoren und dem Aufbau moderner Großdetektoren am Beispiel des OPAL-Detektors.
  - den elementaren Anti-/Materieteilchen, den Botenteilchen der fundamentalen Wechselwirkungen und den Ladungen des Standardmodells.
  - Anti-/Teilchenumwandlungen und dabei erhaltenen Größen.
  - Feynman-Diagrammen.
- gewinnen durch die Arbeit mit Originaldaten aus dem OPAL-Experiment einen Einblick in moderne teilchenphysikalische Forschungsmethoden.
- kennen mögliche Fehlerquellen bei der Anti-/Teilchendetektion mit Großdetektoren.
- kennen Eventdisplays als Möglichkeit zur Visualisierung von Teilchensignaturen.
- identifizieren Anti-/Teilchen anhand ihrer Signaturen im OPAL-Eventdisplay.

- kennen die möglichen Umwandlungskanäle des Z-Teilchens und identifizieren diese anhand der Signaturen der Umwandlungsprodukte im OPAL-Eventdisplay
- wissen, wie es zur Ausbildung von Anti-/Teilchenjets kommt und kennen die Bezeichnungen Hadronisierung und Confinement.
- kennen einige wichtige Ergebnisse, die bei der LEP-Forschung aus der Analyse von Umwandlungen des Z-Teilchens gewonnen werden konnten sowie dabei eingesetzte Methoden der Datenauswertung.

Zusätzlich zu den genannten fachlichen Zielen können durch die Verwendung der vorliegenden Materialien die sozialen und kommunikativen Kompetenzen der Schüler gefördert werden. Die Bearbeitung bestimmter Aufgabenstellungen in Gruppen- bzw. Partnerarbeit regt Diskussionen unter den Schülern an. Diese fördern bei den Schülern „die Fähigkeit zu adressatengerechter und sachbezogener Kommunikation“ (KMK 2005, S.12). Die Fähigkeit, sich über physikalische Erkenntnisse unter Nutzung der wissenschaftlichen Fachsprache auszutauschen sowie eigene Arbeitsergebnisse zu präsentieren und darüber diskutieren zu können, ist Bestandteil der Regelstandards im Kompetenzbereich Kommunikation der Bildungsstandards im Fach Physik (vgl. KMK, 2005). Das Ziel der Förderung dieser Kompetenzen wird auch in den einheitlichen Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung Physik (vgl. KMK, 2004) deutlich. Auch hier zählt Kommunikation zu den vier übergeordneten Kompetenzbereichen. Die Möglichkeit, diese Kompetenzen bei den Schülern zu fördern, sollte daher an den in den Hinweisen vorgeschlagenen Stellen wahrgenommen werden.

## 5.2 Allgemeine Hinweise

Die vorliegenden Materialien umfassen Arbeitsblätter und Informationstexte, mit denen eine Unterrichtseinheit gestaltet werden kann, in welcher die Schüler selbstständig Originaldaten aus dem OPAL-Experiment am Large Electron-Positron Collider (LEP) auswerten und so einen authentischen Einblick in moderne teilchenphysikalische Forschungsmethoden erhalten. Im Zentrum dieser Datenauswertung steht die Identifikation von Anti-/Teilchen anhand ihrer Signaturen im OPAL-Eventdisplay. Dabei werden Ereignisse betrachtet, bei denen Umwandlungen von Z-Teilchen stattgefunden haben, die bei einer Elektron-Positron-Kollision im Zentrum des OPAL-Detektors erzeugt wurden. Dabei lernen die Schüler, wie die unterschiedlichen Umwandlungskanäle des Z-Teilchens anhand der Signaturen der Umwandlungsprodukte unterschieden werden können. Außerdem können mit den Materialien Forschungsergebnisse thematisiert werden, die im OPAL-Experiment durch derartige Datenauswertungen gewonnen werden konnten.

Die vorliegenden Arbeitsmaterialien sollten in der Reihenfolge eingesetzt werden, in der sie in den Hinweisblättern vorgestellt werden. Die Inhalte der jeweiligen Materialien bauen in der Regel auf denen der vorangegangenen auf. Im Folgenden wird ein Überblick über die wesentlichen Inhalte der Unterrichtsmaterialien gegeben.

Die Arbeitsmaterialien „Der OPAL-Detektor“ dienen zur Wiederholung des Aufbaus moderner Großdetektoren und zur Einführung des OPAL-Eventdisplays als Möglichkeit zur Visualisierung von Anti-/Teilchensignaturen. Mit den Materialien „Nachweis von Anti-/Teilchen mit Großdetektoren“ kann wiederholt werden, in welchen Detektorkomponenten die verschiedenen Anti-/Materieteilchen des Standardmodells Spuren bzw. Einträge hinterlassen haben. Anschließend kann mit dem Arbeitsblatt „Identifikation einzelner Teilchen“ eine erste Übung zur Teilchenidentifikation in Abbildungen des OPAL-Eventdisplays durchgeführt werden. Mit den Unterrichtsmaterialien „Identifikation möglicher Umwandlungskanäle des Z-Teilchens“ beginnt die Auseinandersetzung mit den Umwandlungskanälen des Z-Teilchens. Mit diesen und den Materialien „Die Entstehung von Jets“ und „Umwandlungen des Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar“ kann erreicht werden, dass die Schüler die unterschiedlichen Umwandlungskanäle des Z-Teilchens im OPAL-Eventdisplay identifizieren können. Ob dieses Lernziel erreicht wurde, kann anschließend mit den Materialien „Komplexe Übung zur Umwandlung von Z-Teilchen“ überprüft werden. In den Materialien „Abstrahlung von Botenteilchen“ werden weitere Ereignistypen betrachtet, die besondere Relevanz für die Erkenntnisgewinnung in der LEP-Forschung hatten. Abschließend können die Materialien „Ergebnisse der LEP-Forschung“ eingesetzt werden, um

einige Forschungsergebnisse des OPAL-Experiments im Unterricht zu thematisieren. So wird der Sinn und Zweck der durchgeführten Anti-/Teilchenidentifikationen verdeutlicht.

Für die einzelnen Materialien wird in den zugehörigen Hinweisblättern jeweils das von den Schülern benötigte Vorwissen angegeben. Dort findet man ebenfalls Hinweise dazu, mit welchen Arbeitsblättern dieses gewonnen werden kann.

Das als *weiterhin günstig* deklarierte Vorwissen muss nicht zwangsläufig gegeben sein, damit die entsprechenden Arbeitsmaterialien sinnvoll eingesetzt werden können. Sollte dieses jedoch nicht vorhanden sein, schränkt das unter Umständen die erreichbaren Lernziele ein. Lernziele, die ohne dieses zusätzliche Vorwissen nicht erreicht werden können, sind in den Materialbeschreibungen als *optionale* Lernziele klassifiziert.

Die Unterrichtsmaterialien, deren Einsatz keine direkte Voraussetzung für die Verwendbarkeit nachfolgender Materialien darstellt, sind in den zugehörigen Hinweisen als *fakultativ* gekennzeichnet.

Die Sozialform, in welcher die Auseinandersetzung mit den Materialien stattfindet, ist prinzipiell frei wählbar. In den Hinweisen zu einigen Arbeitsmaterialien findet man diesbezüglich allerdings Vorschläge, sofern sich eine bestimmte Sozialform besonders anbietet.

### **5.3 Hinweisblätter zu den einzelnen Arbeitsmaterialien**

### 5.3.1 Der OPAL-Detektor

#### Benötigtes Vorwissen:

- Detektortypen: Spurkammer, elektromagnetische und hadronische Kalorimeter, Myonenkammern
- Aufbau moderner Großdetektoren

#### Lernziele:

Die Schüler:

- informieren sich über den Aufbau des OPAL-Detektors.
- identifizieren die Spurkammer, die elektromagnetischen Kalorimeter, die hadronischen Kalorimeter sowie die Myonenkammer in einer schematischen Darstellung des OPAL-Detektors.
- kennzeichnen in einer vereinfachten Darstellung des OPAL-Eventdisplays die Bereiche der Spurkammer, des elektromagnetischen Kalorimeters, des hadronischen Kalorimeters sowie der Myonenkammer.

#### Hinweise:

Mit diesem Arbeitsblatt kann der Aufbau moderner Großdetektoren am Beispiel des OPAL-Detektors wiederholt werden. Durch den Einsatz des einleitenden **Textes** kann sichergestellt werden, dass den Schülern wesentliche Informationen zum OPAL-Detektor zur Verfügung stehen. Der Text enthält Informationen zum Aufbau des Detektors, mit deren Hilfe die nachfolgende Aufgabenstellungen bearbeitet werden können. Zudem werden die wesentlichen Aufgaben der einzelnen Detektorkomponenten kurz wiederholt, wobei jedoch nicht auf die genaue Funktionsweise dieser Komponenten eingegangen wird. Derartige Kenntnisse sind für die Bearbeitung der Aufgabenstellungen zwar nicht zwingend erforderlich, dennoch sollten die Schüler auch in Hinblick auf die Bearbeitung der nachfolgenden Arbeitsmaterialien mit den grundlegenden Prozessen vertraut sein, welche bei der Detektion von Anti-/Teilchen innerhalb der Detektorkomponenten stattfinden.

Die **Aufgabe** für die Schüler besteht darin, die im Informationstext angesprochenen Detektor-komponenten in einer schematischen Darstellung des OPAL-Detektors sowie in einer vereinfachten Darstellung des OPAL-Eventdisplays zu identifizieren und zu beschriften.

Die Fähigkeit, die unterschiedlichen Detektorkomponenten im OPAL-Eventdisplay lokalisieren zu können, stellt eine wesentliche **Voraussetzung** dafür dar, dass Anti-/Teilchen in den Aufgabenstellungen der nachfolgenden Arbeitsmaterialien erfolgreich identifiziert werden können. Der Einsatz des Arbeitsblattes ist aus diesem Grund notwendig.

Sofern dieses Arbeitsblatt zur erstmaligen Behandlung des Aufbaus moderner Großdetektoren eingesetzt wird, sollte in Erwägung gezogen werden, die Bearbeitung in Form eines Unterrichtsgesprächs durchzuführen.

**Im Anschluss** an den Einsatz dieser Arbeitsmaterialien muss den Schülern dargelegt werden, welche Bedeutung die im OPAL-Eventdisplay dargestellten Daten, Spuren und Einträge haben (siehe Kapitel 4.2.2). Diese Erläuterungen sollten unter Bezugnahme auf die in den Materialien gegebene Abbildung eines Ereignisses im Eventdisplay erfolgen. Auf die im Fachtext enthaltenen Ereignisdaten am oberen Rand des Eventdisplays muss dabei nicht eingegangen werden, da diese in den Unterrichtsmaterialien entfernt wurden.

Die Schüler müssen für die nachfolgenden Aufgabenstellungen wissen, dass die Linien in der Spurkammer den Anti-/Teilchenspuren entsprechen und dass Rechtecke in den Kalorimetern dortige Energieeinträge symbolisieren. Außerdem ist die Farbgebung der Signaturen zu erläutern. Dabei muss darauf eingegangen werden, dass die Farbgebung in der Spurkammer den Betrag des Anti-/Teilchenimpuls charakterisiert, während die Farbgebung der Einträge in den Kalorimetern auf die deponierte Energie schließen lässt. Dass in der Legende der Energiebereiche lediglich die Einheit der Energie (GeV) angegeben ist, kann damit begründet werden, dass die Anti-/Teilchen sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit bewegt haben und daher der Betrag des Impulses sehr genau dem Betrag der Gesamtenergie des jeweiligen Anti-/Teilchens entspricht. In dem Fall, dass die relativistische Energie-Impuls-Beziehung bekannt ist, kann diese zur Begründung herangezogen werden. Auf die natürlichen Einheiten einzugehen, welche in der Teilchenphysik verwendet werden (siehe Kapitel 3.2), ist an dieser Stelle nicht nötig.

### 5.3.2 Nachweis von Anti-/Teilchen mit Großdetektoren

#### Benötigtes Vorwissen:

- Funktionsweise und Zweck von Spurkammern, elektromagnetischen und hadronischen Kalorimetern sowie Myonkammern
- Zweck und Aufbau moderner Großdetektoren

#### Lernziele:

Die Schüler:

- entscheiden, welche Anti-/Teilchen nach ihrer Entstehung im Zentrum des OPAL-Detektors Spuren bzw. Einträge in der Spurkammer, dem elektromagnetischen Kalorimeter, dem hadronischen Kalorimeter sowie der Myonenkammer hinterlassen.
- ordnen einer schematischen Darstellung von Anti-/Teilchensignaturen in einem modernen Großdetektor diejenigen Anti-/Teilchen zu, welche derartige Signaturen hinterlassen.

#### Hinweise:

Dieses Arbeitsblatt kann zur **Wiederholung** des Teilchennachweises mit modernen Großdetektoren dienen. Die Schüler müssen wissen, wie die Signaturen verschiedener Anti-/Teilchen in derartigen Detektoren aussehen, damit sie diese Anti-/Teilchen in den nachfolgenden Aufgabenstellungen erfolgreich anhand der Darstellungen dieser Signaturen im OPAL-Eventdisplay identifizieren können. Sofern die Behandlung von Großdetektoren direkt vor der Auseinandersetzung mit den vorliegenden LEP-Daten stattfindet, kann dieses Arbeitsblatt auch zur **Erstfestigung** eingesetzt werden.

In **Aufgabe 1** sollen die Schüler kennzeichnen, welche Anti-/Teilchen Spuren bzw. Einträge in den vier wesentlichen Komponenten moderner Großdetektoren (am Beispiel des OPAL-Detektors) hinterlassen. Die Reihenfolge der Detektorkomponenten in dieser Aufgabe entspricht bewusst nicht deren tatsächlicher Anordnung im OPAL-Detektor. So kann überprüft werden, ob die Schüler die sichtbaren Spuren und Einträge verschiedener Anti-/Teilchen mit den Bezeichnungen der Detektorkomponenten in Verbindung bringen können oder ob dieses Wissen nur mit deren Position im Detektor verknüpft ist.

Eine Verknüpfung der Komponentenbezeichnungen, ihrer Anordnung im Detektor und den Signaturen, die von verschiedenen Anti-Teilchen darin hinterlassen werden, findet in **Aufgabe 2** statt. Hier sollen alle möglichen Anti-/Teilchen genannt werden, die vorgegebene schematisch dargestellte Signaturen hinterlassen. Es ist keine Auswahl an Anti-/Teilchen vorgegeben, was die Aufgabenschwierigkeit erhöht. Die Schüler müssen also überlegen, ob ihre Lösungsvorschläge vollständig sind oder ob bestimmte Signaturen von verschiedenen Anti-/Teilchen erzeugt werden können. Für diese Überlegungen können die Ergebnisse der ersten Aufgabe herangezogen werden. Dort ist jedoch nur eine Auswahl an möglichen Anti-/Teilchen gegeben.

Eine **Schwierigkeit** kann darin bestehen, zu schlussfolgern, dass alle elektrisch geladenen (neutralen) Anti-/Teilchen ähnliche Signaturen hinterlassen wie Protonen (Neutronen). Weiterhin ist es möglich, dass die Signaturen der Anti-/Myonen und Anti-/Neutrinos von Schülern lediglich mit den Bezeichnungen der Teilchen und nicht denen der Anti-Teilchen beschriftet werden. Um die Schüler anzuregen, verschiedene Lösungsmöglichkeiten in Betracht zu ziehen, ist in der Aufgabenstellung ein entsprechender **Hinweis** angegeben.

In der schematischen Darstellung der Anti-/Teilchensignaturen sind die Energiedepositionen in den Kalorimetern als gelbe Rechtecke dargestellt. Unter Umständen könnte die **Schülerfrage** auftreten, weshalb die Verteilung und Größe dieser Einträge bei den verschiedenen Anti-/Teilchen unterschiedlich ist.

Große Einträge symbolisieren eine komplette Absorption des entsprechenden Anti-/Teilchens im Kalorimeter, wohingegen kleine Einträge lediglich die Abgabe eines Teils der Energie symbolisieren. Die unregelmäßige Verteilung der kleinen Einträge soll verdeutlichen, dass es sich bei der Energieabgabe in den Kalorimetern um stochastische Prozesse handelt, die nicht im Detail vorhergesagt werden können.

Die **Farben der Detektorkomponenten** in der schematischen Darstellung des Detektors stimmen mit den Farben überein, die im Arbeitsblatt „Der OPAL-Detektor“ verwendet wurden. Bei der Entwicklung von Tafelbildern bzw. ergänzender Unterrichtsmaterialien sollte darauf geachtet werden, dass die verwendete Farbgebung beibehalten wird, um einer Verwechslung der Komponenten vorzubeugen.

### 5.3.3 Identifikation einzelner Teilchen

#### Benötigtes Vorwissen:

- Aufbau des OPAL-Eventdisplays (Arbeitsmaterialien: „Der OPAL-Detektor“)
- Signaturen von Elektronen, Photonen, Myonen, Neutrinos und elektrisch geladenen sowie elektrisch neutralen Hadronen im OPAL-Detektor und deren Darstellung im OPAL-Eventdisplay (Arbeitsmaterialien: „Nachweis von Anti-/Teilchen mit Großdetektoren“)

#### Lernziele:

Die Schüler:

- identifizieren jeweils die Signatur eines Elektrons, Photons, Myons sowie eines elektrisch geladenen Hadrons im OPAL-Eventdisplay.

optional:

- beschreiben das Aussehen der Signaturen von Neutrinos und elektrisch neutralen Hadronen unter Bezugnahme auf die bereits identifizierten Signaturen von Elektron, Photon, Myon und elektrisch geladenem Hadron.

#### Hinweise:

Mit diesem Arbeitsblatt kann eine **erste Übung** zur Identifikation von Teilchen im OPAL-Eventdisplay durchgeführt werden. Die Vorgabe der Antwortmöglichkeiten dient der Verringerung der Aufgabenschwierigkeit. Es stehen allerdings zwei Antwortmöglichkeiten zur Wahl, denen keine Abbildung zugeordnet werden kann. Dadurch sollen die Schüler angeregt werden, den Unterschied zwischen den Signaturen von elektrisch geladenen und elektrisch neutralen Hadronen zu reflektieren sowie zu rekapitulieren, dass Anti-/Neutrinos mit dem OPAL-Detektor nicht direkt nachgewiesen werden konnten.

In der dargestellten Signatur eines Photons erstreckt sich der Energieeintrag bis in den Bereich des hadronischen Kalorimeters, was zu **Schwierigkeiten** führen kann. Es ist möglich, dass diese Signatur von den Schülern als die eines elektrisch neutralen Hadrons identifiziert wird. In diesem Fall muss nochmals darauf hingewiesen werden, dass ein einzelnes Rechteck unabhängig von seiner Größe immer nur einen Energieeintrag in einer einzelnen

Detektorkomponente symbolisiert, wobei es sich um diejenige Komponente handelt, in welcher der Eintrag beginnt.

Es muss damit gerechnet werden, dass die **Schülerfrage** auftaucht, weshalb in der Signatur des Anti-/Myons mehrere Energieeinträge im hadronischen Kalorimeter zu erkennen sind. Hier ist auf den stochastischen Charakter der Entstehung von Anti-/Teilchenschauern in den Kalorimetern einzugehen. Die räumliche Verteilung und Ausbreitung der Schauer kann nicht exakt vorhergesagt werden. Je nachdem wie die Geometrie der Schauer genau aussieht, wird der gesamte Schauer zu einem einzelnen Energieeintrag zusammengefasst oder durch mehrere Energieeinträge visualisiert.

Unter Umständen könnte des weiteren die **Schülerfrage** auftauchen, woran zu erkennen ist, dass es sich um genau die vorgegebenen Teilchen handelt, obwohl die qualitative Verteilung der Spuren und Einträge teilweise auch auf andere Anti-/Teilchen hindeuten könnte. Dies trifft bei den Signaturen des Elektrons und des Myons zu. Ein Positron bzw. ein Anti-Myon hätte ähnliche Signaturen hinterlassen. Eine Unterscheidung wäre lediglich anhand der Richtung der Spurkrümmung in der Spurkammer möglich, die in den vorliegenden Abbildungen nicht erkennbar ist. Falls dieser Aspekt bereits im Zusammenhang mit der Behandlung von Spurkammern diskutiert wurde, kann dahingehend an dieser Stelle eine Wiederholung in Form eines Unterrichtsgesprächs stattfinden. Andernfalls bzw. alternativ dazu bietet es sich an, anschließend die Arbeitsmaterialien zum Thema „Einflussfaktoren auf die Spurkrümmung“ einzusetzen, um auf die Schülerfrage zu reagieren.

Es empfiehlt sich, im Anschluss an den Vergleich der Lösungen die folgende **Aufgabe in mündlicher Form** anzuschließen. Eine Diskussion der Lösungsvorschläge kann im Unterrichtsgespräch erfolgen.

Die Schüler werden aufgefordert zu beschreiben, wie die Signaturen eines elektrisch neutralen Hadrons sowie eines Elektron-Neutrinos (die zwei Auswahlmöglichkeiten in der Aufgabenstellung, denen keine Abbildung zugeordnet werden kann) im OPAL-Eventdisplay aussehen müssten, wobei sie sich auf die gegebenen Darstellungen beziehen sollen.

Die Signatur eines elektrisch neutralen Hadrons unterscheidet sich von der eines elektrisch geladenen Hadrons qualitativ nur darin, dass keine Spur in der Spurkammer sichtbar ist. Elektron-Neutrinos hinterlassen wie alle Anti-/Neutrinos nirgendwo Spuren bzw. Einträge.

### 5.3.4 Mysteriöse Einträge

#### Benötigtes Vorwissen:

- Signaturen von Anti-/Teilchen im OPAL-Detektor und deren Darstellung im OPAL-Eventdisplay (Arbeitsmaterialien: „Nachweis von Anti-/Teilchen mit Großdetektoren“, „Identifikation einzelner Teilchen“)
- Kernumwandlungen

weiterhin günstig:

- kosmische Höhenstrahlung

#### Lernziele:

Die Schüler:

- begründen im Ausschlussverfahren, weshalb einzelne Einträge in der Myonenkammer und im hadronischen Kalorimeter nicht von Anti-/Teilchen stammen können, die bei einer Elektron-Positron-Kollision im Inneren des OPAL-Detektors erzeugt wurden.
- reflektieren mögliche Fehlerquellen beim Anti-/Teilchennachweis und nennen spontane Kernumwandlungen, elektronisches Rauschen sowie Anti-/Teilchen, die von außen in den Detektor gelangt sind, als mögliche Ursachen für zusätzliche Einträge im OPAL-Detektor.

optional:

- nennen die kosmische Höhenstrahlung als mögliche Quelle für Anti-/Teilchen, die von außerhalb in den OPAL-Detektor gelangt sind.

#### Hinweise:

Dieses Arbeitsblatt kann eingesetzt werden, um mögliche Fehlerquellen bei Teilchenexperimenten zu diskutieren. Die hier behandelten Inhalte stellen keine Voraussetzung für die erfolgreiche Bearbeitung der nachfolgenden Arbeitsmaterialien dar. Der Einsatz des Arbeitsblattes ist also **fakultativ**. Es ist allerdings zu erwarten, dass im Zusammenhang mit der Bearbeitung der Aufgabenstellungen der anderen Arbeitsmaterialien die **Schülerfrage** auftaucht, welche Bedeutung

einzelne Kreuze im OPAL-Eventdisplay haben. In diesem Fall kann dieses Arbeitsblatt zur Antwortfindung eingesetzt werden. Alternativ kann eine Diskussion der möglichen Ursachen solcher Einträge auch im Unterrichtsgespräch stattfinden.

Die **Aufgabenstellung** des Arbeitsblattes besteht darin, mögliche Ursachen für die nicht zuordenbaren Einträge in den Abbildungen des OPAL-Eventdisplays zu finden. Dabei sollen die Schüler zuerst begründen, weshalb die Einträge nicht von Anti-/Teilchen stammen können, die im Inneren des OPAL-Detektors entstanden sind. Dafür müssen sie die ihnen bekannten Anti-/Teilchen als mögliche Ursachen ausschließen, wofür Kenntnisse darüber notwendig sind, wie deren Signaturen im OPAL-Eventdisplay aussehen. Mit dieser Aufgabenstellung kann demnach überprüft werden, ob die in den vorangegangenen Arbeitsmaterialien erworbenen Kenntnisse zur Identifikation von Anti-/Teilchen mit dem OPAL-Detektor gefestigt sind. Ergebnis der Überlegungen sollte sein, dass es keine Anti-/Teilchen gibt, die Einträge im hadronischen Kalorimeter oder der Myonenkammer hinterlassen, ohne dabei in einer weiter innen liegenden Komponente des OPAL-Detektors nachgewiesen worden zu sein, sofern sie aus der Detektormitte stammen.

Nachdem die Schüler Anti/Teilchen aus der Detektormitte als mögliche Ursache der Einträge ausgeschlossen haben, sollen sie andere mögliche Ursachen nennen. Gemäß den Schlussfolgerungen aus dem vorangegangenen Aufgabenteil, können die Einträge nur durch Anti-/Teilchen stammen, die von außen in den Detektor gelangt oder in diesem entstanden sind (Radioaktivität). Weiterhin ist es möglich, dass es eine andere Ursache gibt als die Wechselwirkung eines Anti-/Teilchens mit dem Detektor. Es kann sich ebenfalls um eine Fehlmessung handeln (elektronisches Rauschen).

**Kenntnisse zur kosmischen Höhenstrahlung** werden nicht zwangsläufig vorausgesetzt. Es ist als ausreichend anzusehen, wenn die Schüler Anti-/Teilchen von außerhalb als mögliche Ursachen der Einträge identifizieren. Sofern die kosmische Höhenstrahlung im Unterricht noch nicht thematisiert wurde, kann dies im Anschluss an die Bearbeitung dieses Arbeitsblattes geschehen. Materialien und didaktische Hinweise zur Behandlung der kosmischen Höhenstrahlung sind unter anderem in den Materialien von Netzwerk Teilchenwelt (2015) zu finden.

In beiden Teilen der Aufgabenstellung ist zu erwarten, dass die Schüler nicht alle im Erwartungsbild vorgegebenen Antworten bzw. Argumentationen finden. Da die Aufgabenstellung sehr offen formuliert ist und viele unterschiedliche Aspekte berücksichtigt und diskutiert werden müssen, bietet es sich hier an, die Bearbeitung der Aufgabe in **Partnerarbeit** durchführen zu lassen. Indem die Schüler gemeinsam auf Ursachensuche gehen erhöht sich die Wahrchein-

lichkeit, dass die Fragestellung aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet wird und so unterschiedliche Ursachen für nicht zuordenbare Einträge reflektiert werden. Außerdem können so die **kommunikativen und sozialen Kompetenzen** der Jugendlichen gefördert werden. Im Anschluss an die Partnerarbeit sollten die Argumentationen und Vorschläge im **Unterrichtsgespräch** gesammelt und im Klassenverband diskutiert bzw. wenn nötig ergänzt werden.

Je nachdem, zu welchem Zeitpunkt dieses Arbeitsblatt im Unterricht eingesetzt wird, kennen die Schüler die Signaturen bestimmter Anti-/Teilchen im OPAL-Eventdisplay eventuell noch nicht, was **Probleme** bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung verursachen kann. Sofern die Jetbildung und die Umwandlungskanäle des Z-Teilchens noch nicht behandelt wurden, ist es denkbar, dass die Schüler Gluonen, Z-Teilchen oder auch W-Teilchen als mögliche Ursachen für die Einträge vorschlagen. In diesem Fall kann darauf hingewiesen werden, dass sich diese Teilchen direkt nach ihrer Entstehung in Anti-/Teilchen umwandeln, deren Signaturen den Schülern bereits bekannt sind und auf die zukünftige Betrachtung dieser Umwandlungen im Unterricht verwiesen werden.

### 5.3.5 Einflussfaktoren auf die Spurkrümmung

#### Benötigtes Vorwissen:

- Funktionsweise einer Spurkammer
- Lorentzkraft und „Rechte-Hand-Regel“
- Signaturen von Anti-/Teilchen im OPAL-Detektor und deren Darstellung im OPAL-Eventdisplay (Arbeitsmaterialien „Nachweis von Anti-/Teilchen mit Großdetektoren“, „Identifikation einzelner Teilchen“)

weiterhin günstig:

- relativistische Masse

#### Lernziele:

Die Schüler:

- folgern aus dem Vorhandensein von Spuren bzw. Einträgen in der Spurkammer und im elektromagnetischen Kalorimeter, dass es sich jeweils um die Signatur eines Elektrons oder eines Positrons handelt.
- identifizieren den Impuls sowie den Krümmungsradius der Spur in der Spurkammer als Unterschiede zwischen zwei im OPAL-Eventdisplay dargestellten Anti-/Teilchensignaturen.
- beschreiben qualitativ den Zusammenhang zwischen Anti-/Teilchen-Impuls und dem Krümmungsradius der Spur in der Spurkammer.
- leiten den Zusammenhang zwischen dem Krümmungsradius einer Anti-/Teilchenspur und dem Impuls des Anti-/Teilchens bei der Bewegung durch die Spurkammer des OPAL-Detektors mathematisch her.
- unterscheiden die Signatur eines Elektrons und eines Positrons im OPAL-Eventdisplay anhand der Richtung der Spurkrümmung in der Spurkammer.
- kennen die Bestimmung der Richtung der Spurkrümmung als Hilfsmittel bei der Identifikation von Anti-/Teilchen.

optional:

- kennen die Messung des Krümmungsradius einer Anti-/Teilchenspur in der Spurkammer als Möglichkeit zur Bestimmung des Anti-/Teilchenimpulses.

### Hinweise:

Auf dem vorliegenden Arbeitsblatt befindet sich anstelle einer **Überschrift** lediglich eine Leerzeile. Dort kann von den Schülern nach der Bearbeitung der Titel „Einflussfaktoren auf die Spurkrümmung“ eingetragen werden. Auf die Angabe einer Überschrift wurde hier verzichtet, da durch diese bereits ein Teil der Lösung von Aufgabenteil b) suggeriert würde.

Der Einsatz dieses Arbeitsblattes ist keine direkte Voraussetzung für die Verwendung der nachfolgenden Arbeitsmaterialien sondern rein **fakultativ**.

Mit Hilfe dieses Arbeitsblattes kann herausgearbeitet werden, dass zur eindeutigen Identifikation von Anti-/Teilchen mehr Informationen notwendig sind als das Vorhandensein bzw. Fehlen von Signaturen in den verschiedenen Detektorkomponenten. Dies soll am Beispiel der Krümmung von Spuren elektrisch geladener Teilchen in der Spurkammer verdeutlicht werden. Die Aufgabenstellungen dienen demnach sowohl als **Übung** zur Teilchenidentifikation als auch zur **Festigung** der Kenntnisse zur Funktionsweise einer Spurkammer und zur **Wiederholung** der Kraftwirkung auf bewegte elektrisch geladene Anti-/Teilchen in einem Magnetfeld.

**Aufgabenteil a)** dient der Festigung der bereits in den Arbeitsmaterialien „Nachweis von Anti-/Teilchen mit Großdetektoren“ und „Identifikation einzelner Teilchen“ erworbenen Kenntnisse. Durch das alleinige Auswerten der Informationen, wo Anti-/Teilchen Spuren bzw. Energieeinträge hinterlassen haben, lässt sich in der Regel nicht eindeutig schlussfolgern, welches Anti-/Teilchen die Signatur erzeugt hat.

In **Aufgabenteil b)** sollen die Schüler den Impuls und den Krümmungsradius der Spur als Unterschiede zwischen den beiden Teilchensignaturen identifizieren und eine Vermutung aufstellen, welcher Zusammenhang zwischen diesen Größen besteht. Diese Vermutung soll in **Aufgabenteil b\*)** bewiesen werden.

Damit die Schüler diese beiden Aufgabenteile lösen können, müssen Kenntnisse zur Funktionsweise von Spurkammern und zur Kraftwirkung auf elektrisch geladene Anti-/Teilchen in magnetischen Feldern (Lorentzkraft) vorhanden sein. **Aufgabenteil b\*)** fordert die mathematische Herleitung des Zusammenhangs zwischen Anti-/Teilchenimpuls und Krümmungsradius der Anti-/Teilchenspur in der Spurkammer bei der Bewegung in einem senkrecht zur Bewegungsrichtung orientierten homogenen magnetischen Feld. Diese Aufgabe hat aufgrund des hohen Mathematisierungsgrades ein deutlich **erhöhtes Anforderungsniveau**. Daher kann diese Aufgabe zur **Differenzierung** dienen und muss nicht zwangsläufig von allen Schülern bearbeitet werden.

Der **Ansatz** für die Lösung dieser Teilaufgabe ist, dass die Lorentzkraft bei der Bewegung elektrisch geladener Anti-/Teilchen in einem senkrecht zur Bewegungsrichtung orientierten

homogenen magnetischen Feld als Zentripetalkraft wirkt. Für den Fall, dass dieser Ansatz bei der Behandlung der Bewegung elektrisch geladener Anti-/Teilchen in einem magnetischen Feld noch nicht angewendet wurde, sollte eine entsprechende Hilfestellung gegeben werden. Die Formulierung der Aufgabenstellung gibt allerdings bereits einen Hinweis auf den Lösungsansatz.

Alternativ kann der Beweis auch im gemeinsamen **Unterrichtsgespräch** geführt werden. In jedem Fall sollte vor der Bearbeitung dieser Aufgabe ein Vergleich der Ergebnisse von Aufgabenteil a) und b) stattfinden um zu prüfen, ob die aufgestellten Vermutungen korrekt sind.

In der im **Erwartungsbild** angegebenen Herleitung wurde die relativistische Masse unter Berücksichtigung des geschwindigkeitsabhängigen Lorentzfaktors  $\gamma$  verwendet. Da der Krümmungsradius der Anti-/Teilchenspur allerdings masseunabhängig ist, gelangt man auch bei der Nutzung der Ruhemasse zum korrekten Ergebnis. Die Aufgabe kann daher auch gelöst werden, falls das Konzept der relativistischen Masse von den Schülern nicht verinnerlicht oder bisher überhaupt nicht behandelt wurde. Daher sollte gegebenenfalls beim Vergleich der Lösungen auf diese Problematik eingegangen werden.

Weiterhin wurde im **Erwartungsbild** nicht die allgemeine Formulierung der Lorentzkraft<sup>67</sup> verwendet. Diese vereinfacht sich jedoch unter den gegebenen Umständen zu der verwendeten Formulierung. Sofern den Schülern die allgemeine Form bekannt ist, muss mit der **Schülerfrage** gerechnet werden, ob ein elektrisches Feld vorhanden ist. Da dies nicht der Fall ist, entfällt der entsprechende Teil aus der Gleichung für die Lorentzkraft. Dass mit den Beträgen der magnetischen Feldstärke und der Geschwindigkeit gearbeitet werden kann, ergibt sich daraus, dass sich das Anti-/Teilchen senkrecht zum magnetischen Feld bewegen soll.

Aus dem in Aufgabenteil b\*) hergeleiteten Ausdruck für den Krümmungsradius der Anti-/Teilchenspur geht hervor, dass dieser neben dem Impuls und der magnetischen Feldstärke auch vom Betrag und dem Vorzeichen der elektrischen Ladung des Anti-/Teilchens abhängt.

Mit Hilfe der als bekannt vorauszusetzenden „Rechte-Hand-Regel“ sollen die Schüler abschließend in **Aufgabenteil c)** bestimmen, welche Vorzeichen die elektrischen Ladungen der beiden Anti-/Teilchen gehabt haben müssen, deren Signaturen im OPAL-Eventdisplay dargestellt sind. Daraus wiederum lässt sich zusammen mit dem Ergebnis auf Aufgabenteil a) schlussfolgern, welche Anti-/Teilchen die jeweiligen Signaturen erzeugt haben.

Im Zusammenhang mit der Bearbeitung dieses Arbeitsblattes kann diskutiert werden, dass der Krümmungsradius der Anti-/Teilchenspur in einer Spurkammer zur Bestimmung des Anti-/Teilchenimpulses herangezogen werden kann.

---

67  $F_L = Q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

### 5.3.6 Identifikation möglicher Umwandlungskanäle des Z-Teilchens

#### Benötigtes Vorwissen:

- Erhaltungsgrößen bei Anti-/Teilchenumwandlungen: Energieerhaltung, Erhaltung der elektrischen, schwachen und starken Ladung
- Symbole für das Z-Teilchen sowie für die Anti-/Materieteilchen des Standardmodells
- Kopplung des Z-Teilchens an die schwache und elektrische Ladung
- Anti-/Farbladungsvektoren und vektorielle Addition

#### weiterhin günstig:

- Dupletts der schwachen Ladung
- elektrische, schwache und starke Ladung des Z-Teilchens
- Masse sowie elektrische, schwache und starke Ladung der elementaren Anti-/Teilchen des Standardmodells

#### Lernziele:

#### Die Schüler:

- nennen unter Bezugnahme auf die Eigenschaften des Z-Teilchens Kriterien, die bei dessen Umwandlung erfüllt sein müssen.
- überprüfen, ob diese Kriterien bei den vorgeschlagenen Umwandlungskanälen erfüllt sind und entscheiden anschließend, ob eine Umwandlung des Z-Teilchens in die angegebenen Anti-/Teilchen möglich ist.
- festigen ihre Kenntnisse zu den Massen, den elektrischen und schwachen Ladungszahlen sowie den starken Farbladungsvektoren des Z-Teilchens und den ausgewählten elementaren Anti-/Materieteilchen.

### Hinweise:

Dieses Arbeitsblatt kann zur **Festigung, Wiederholung und Überprüfung** der Kenntnisse zu Erhaltungsgrößen bei Anti-/Teilchenumwandlungen eingesetzt werden. In **Aufgabe 1** sollen die Schüler Kriterien nennen, die die Umwandlungsprodukte eines Z-Teilchens erfüllen müssen.

Im **Erwartungsbild** zu dieser Aufgabe ist die Energieerhaltung anhand der Massen der Anti-/Teilchen formuliert. Außerdem wird die Erhaltung der Ladungen genannt. Dass die Umwandlungsprodukte eine elektrische und/oder schwache Ladung besitzen müssen, ist das dritte notwendige Kriterium. Zudem werden zwei weitere Kriterien genannt, die bei den Umwandlungen des Z-Teilchens (und auch bei anderen Anti-/Teilchenumwandlungen) erfüllt sein müssen. Diese spielen allerdings bei der Bearbeitung der nachfolgenden Aufgabe keine wesentliche Rolle, da sie in allen dort betrachteten Beispielen erfüllt sind. Aufgabe 2 kann also auch ohne Kenntnis dieser Kriterien erfolgreich bearbeitet werden. Daher wurden sie als **zusätzliche Kriterien** bezeichnet.

Zum einen können immer nur genau zwei Anti-/Teilchen entstehen (wobei es sich aufgrund der Erhaltung der Ladungen um ein Teilchen-Anti-Teilchen-Paar handeln muss). Dies kann damit begründet werden, dass jeder der in Kapitel 3.3 eingeführten fundamentalen Vertices genau drei Linien besitzt. Zum anderen dürfen die Umwandlungen nicht im Widerspruch zu den existierenden Dupletts der schwachen Ladung stehen. Sofern die Schüler diese beiden Kriterien nicht kennen, müssen diese bei der weiterführenden Diskussion der möglichen Umwandlungskanäle des Z-Teilchens (siehe unten) eingeführt werden.

**Aufgabe 2** dient der **Festigung** der Ergebnisse aus Aufgabe 1. Hier sollen die Schüler für vorgegebene Anti-/Teilchen-Paare feststellen, ob es sich dabei um mögliche Umwandlungsprodukte eines Z-Teilchens handeln kann. Dafür muss jeweils geprüft werden, ob die in Aufgabe 1 gefundenen Kriterien erfüllt sind. Zur Bearbeitung dieser Aufgabenstellung stehen mehrere **Varianten** zur Verfügung. Welche davon eingesetzt werden sollte, hängt vom Vorwissen der Schüler ab.

Sofern die Schüler schon ausreichende Erfahrungen mit Anti-/Teilchenumwandlungen und den dabei erhaltenen Größen haben sowie die Eigenschaften des Z-Teilchens und der elementaren Anti-/Materieteilchen kennen, kann auf den Einsatz von Hilfestellungen verzichtet werden. Von dieser Situation kann jedoch im Allgemeinen nicht ausgegangen werden. Zur systematischen Überprüfung der notwendigen Kriterien muss den Schülern in der Regel eine der in den Arbeitsmaterialien beigefügten Tabellen als **Hilfestellung** zur Verfügung gestellt werden.

In der **ersten Version** dieser Tabelle sind die relevanten Eigenschaften (Masse, elektrische und schwache Ladungszahl sowie starker Farbladungsvektor) des Z-Teilchens und der vorgegebe-

nen potentiellen Umwandlungsprodukte einzutragen. Anschließend kann die Summe dieser Größen für die Umwandlungsprodukte der zu prüfenden vorgeschlagenen Umwandlungskanäle bestimmt und eingetragen werden. Ein Vergleich mit den Eigenschaften des Z-Teilchens ermöglicht schließlich die Identifikation tatsächlich realisierbarer Umwandlungskanäle. Der Einsatz dieser Tabelle ist nur dann sinnvoll, wenn die Schüler die notwendigen Angaben in übersichtlicher Form vorliegen haben. Sofern dies nicht der Fall ist, sollte die zweite Ausführung der Tabelle eingesetzt werden.

In der **zweiten Version** sind die Eigenschaften des Z-Teilchens und der potentiellen Umwandlungsprodukte bereits vorgegeben. Die Massen wurden dabei sinnvoll gerundet. Hier reduziert sich der Arbeitsaufwand auf die Bestimmung der Summen der Massen, der elektrischen und der schwachen Ladungszahlen sowie der starken Anti-/Farbladungsvektoren der Umwandlungsprodukte. Der Einsatz dieser Version bietet sich an, wenn die für die Bearbeitung der Aufgabe benötigte Zeit reduziert werden soll.

Vermutlich werden die Schüler nicht die komplette Tabelle ausfüllen, da bereits durch eine einzige Verletzung eines Erhaltungssatzes auf die Unmöglichkeit des vorgeschlagenen Umwandlungskanals geschlossen werden kann, was die Überprüfung weiterer Erhaltungsgrößen unnötig macht. Bei den unmöglichen Umwandlungen in Aufgabenteil e) und f) sind jeweils zwei Erhaltungssätze verletzt. Hier sind also jeweils unterschiedliche Begründungen möglich. Bei der unter c) gegebenen Umwandlung des Z-Teilchens in zwei Photonen reicht die Überprüfung der Erhaltungssätze nicht aus um festzustellen, dass diese Umwandlung nicht möglich ist. Dafür müssen die Schüler wissen, dass eine Kopplung des Z-Teilchens an Photonen nicht möglich ist, da diese weder eine schwache noch eine elektrische Ladung besitzen.

Im Falle der Unmöglichkeit einer vorgegebenen Umwandlung sind die dafür verantwortlichen Eigenschaften der potentiellen Umwandlungsprodukte (bzw. die Summe dieser Eigenschaften) im **Erwartungsbild der Tabelle** gelb hinterlegt. Wie in allen vorliegenden Erwartungsbildern sind die Antworten in grüner Schriftfarbe dargestellt. Dies gilt ebenfalls für den Nullvektor der starken Farbladung. Diese Farbgebung steht in keinem Zusammenhang mit dem grünen Farbladungsvektor. Der Nullvektor symbolisiert wie üblich die Farbneutralität bezüglich der starken Wechselwirkung.

### Erschließung aller realisierbaren Umwandlungskanäle des Z-Teilchens

Die Lösungen der beiden vorgestellten Aufgaben können als Grundlage für eine **weiterführende Diskussion** dienen. Ziel dieser Diskussion ist die Erarbeitung einer vollständigen Übersicht der Umwandlungskanäle des Z-Teilchens (siehe Kapitel 4.3.2). Die Kenntnis der Umwandlungskanäle ist eine **Voraussetzung** dafür, dass die nachfolgende „Komplexe Übung zur Umwandlung von Z-Teilchen“ durchgeführt werden kann.

Die Umwandlungskanäle können in einem **gelenkten Unterrichtsgespräch** gefunden und als Tafelbild festgehalten werden. Einen möglichen Ausgangspunkt dafür bilden die in Aufgabe 2 identifizierten möglichen Umwandlungskanäle. Alternativ können die Umwandlungskanäle den Schülern auch einfach angegeben und bei Bedarf diskutiert werden.

Über den Umwandlungskanal  $Z \rightarrow e^+ + e^-$  lässt sich leicht auf die Umwandlungskanäle  $Z \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  und  $Z \rightarrow \tau^+ + \tau^-$  schließen, sofern den Schülern bekannt ist, dass die geladenen Leptonen abgesehen von ihrer Masse dieselben Eigenschaften besitzen (Leptonenuniversalität).

Ausgehend von dem in Teil e) der zweiten Aufgabe betrachteten unmöglichen Umwandlungskanal  $Z \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$  kann die Frage gestellt werden, welche Eigenschaften ein zu dem Myon-Anti-Neutrino „passendes“ Anti-/Teilchen haben müsste, damit eine Umwandlung des Z-Teilchens in diese beiden Anti-/Teilchen möglich wäre. Auf diesem Weg kann man zu den drei Umwandlungskanälen der Form  $Z \rightarrow \nu + \bar{\nu}$  gelangen.

Die möglichen hadronischen Umwandlungskanäle des Z-Teilchens ( $Z \rightarrow q + \bar{q}$ ) können unter Bezugnahme auf die Teilaufgaben d) und f) der zweiten Aufgabe gefunden werden. Aufgrund der Beträge der elektrischen Ladungen kann jeweils nur ein Quark-Anti-Quark-Paar entstehen. Durch Kombination zweier Quarks oder zweier Anti-Quarks ergibt die Summe der elektrischen Ladungszahlen in keinem Fall Null. Dies kann exemplarisch an Aufgabenteil f) nachvollzogen werden.

Dass die Summe zweier Vektoren nur dann den Nullvektor ergeben kann, wenn entweder beide Vektoren der Nullvektor sind oder die beiden Vektoren betragsmäßig gleich groß und entgegengesetzt gerichtet sind, ist entweder aus der Vektorrechnung hinreichend bekannt oder lässt sich leicht geometrisch veranschaulichen. Daraus ergibt sich das Kriterium, dass das Anti-Quark den zum Farbladungsvektor des Quarks zugeordneten Anti-Farbladungsvektor besitzen muss. Diese Anforderungen an die Umwandlungsprodukte bei den hadronischen Umwandlungen des Z-Teilchens müssen entsprechend artikuliert und festgehalten werden.

Bei der Sammlung der möglichen Umwandlungskanäle ist zu erwarten, dass es zu **Schülerfragen** bzw. zu Vorschlägen für Umwandlungskanäle kommt, die aus anderen Gründen als der Verletzung eines Erhaltungssatzes nicht möglich sind.

Die bisher diskutierten Erhaltungssätze für Energie und Ladungen schließen nicht aus, dass die beiden Umwandlungsprodukte zu unterschiedlichen Anti-/Teilchengenerationen gehören. Solche Umwandlungen stehen allerdings im Widerspruch zu den existierenden Dupletts der schwachen Ladung. Sofern diese Dupletts bekannt sind, kann die Unmöglichkeit der vorgeschlagenen Ereignisse wie in Kapitel 3.5 beschrieben durch die Rotation des Paarerzeugungsverstärkers der Z-Umwandlung gezeigt werden.

Es könnte von den Schülern ebenfalls vorgeschlagen werden, dass bei der Umwandlung mehrere Teilchen-Anti-Teilchen-Paare entstehen können. Dies ist allerdings nicht möglich, da für die Wechselwirkung zwischen Botenteilchen und Anti-/Materieteilchen nur die in Kapitel 3.3 vorgestellten fundamentalen Vertices mit drei beteiligten Anti-/Teilchen existieren.

Sofern die Schüler die zur Erklärung vorgeschlagenen Konzepte nicht kennen und diese nicht thematisiert werden sollen, muss darauf verwiesen werden, dass die vorgeschlagenen Umwandlung ausgeschlossen werden können, da sie in Experimenten nicht beobachtet worden sind.

### 5.3.7 Die Entstehung von Jets

#### Benötigtes Vorwissen:

- Anti-/Teilchensignaturen im OPAL-Detektor und im OPAL-Eventdisplay (Arbeitsmaterialien „Identifikation einzelner Teilchen“ und „Identifikation möglicher Umwandlungskanäle des Z-Teilchens“)
- Umwandlung von Z-Teilchen (Arbeitsmaterialien „Identifikation möglicher Umwandlungskanäle des Z-Teilchens“)

#### Lernziele:

Die Schüler:

- informieren sich über die Entstehung von Jets bei Kollisionsexperimenten.
- kennen die Bezeichnung *Hadronisierung* als Zusammenfassung der Prozesse bei der Jetbildung.
- kennen die Bezeichnung *Confinement* für die Tatsache, dass sich Anti-/Quarks nicht isolieren lassen.
- wissen, dass man den hadronischen Umwandlungskanal des Z-Teilchens dadurch identifizieren kann, dass im Eventdisplay (mindestens) zwei Jets sichtbar sind.

#### Hinweise:

In diesem Informationstext wird beschrieben, wie es zur Entstehung von Jets kommen kann. Die gegebenen Informationen werden von den Schülern benötigt, um Ereignisse identifizieren zu können, bei denen die Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Quark-Anti-Quark-Paar stattgefunden hat. Außerdem werden Kenntnisse zur Jetbildung durch Gluonen benötigt, um Ereignisse identifizieren zu können, bei denen ein solches Botenteilchen abgestrahlt wurde. Der Einsatz dieses Textes ist also eine **Voraussetzung** dafür, dass die Aufgabenstellungen der Arbeitsmaterialien „Komplexe Übung zur Umwandlung von Z-Teilchen“ und „Abstrahlung von Botenteilchen“ erfolgreich bearbeitet werden können.

### 5.3.8 Umwandlungen des Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar

#### Benötigtes Vorwissen:

- Signaturen von Anti-/Teilchen im OPAL-Detektor und deren Darstellung im OPAL-Eventdisplay (Arbeitsmaterialien: „Nachweis von Anti-/Teilchen mit Großdetektoren“, „Identifikation einzelner Teilchen“)
- Entstehung von Jets (Arbeitsmaterialien: „Die Entstehung von Jets“)
- Feynman-Diagramme

#### Lernziele:

Die Schüler:

- informieren sich über die verschiedenen Kombinationen von Umwandlungsprodukten, die bei der Umwandlung von Tauonen und Anti-Tauonen entstehen können.
- entscheiden für fünf Ereignisdarstellungen im OPAL-Eventdisplay jeweils, ob die sichtbaren Anti-/Teilchensignaturen auf eine Umwandlung des Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar schließen lassen und geben für ihre Entscheidung eine Begründung an.

#### Hinweise:

In diesen Arbeitsmaterialien ist zunächst ein **Informationstext** gegeben. Darin werden die verschiedenen Möglichkeiten der Anti-/Teilchenkombinationen genannt, die im Zusammenhang mit der Umwandlung von Tauonen und Anti-Tauonen entstehen können.

Die **Aufgabenstellung** besteht anschließend darin, für fünf Darstellungen von Ereignissen im OPAL-Eventdisplay zu entscheiden, ob eine Umwandlung des Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar stattgefunden hat oder ob ein anderer Umwandlungskanal realisiert wurde. Für die Entscheidung ist jeweils eine Begründung anzugeben.

Im **Erwartungsbild** ist jeweils eine mögliche Formulierung der Begründung angegeben. Mitunter lassen die Ereignisdarstellungen unterschiedliche Begründungen bzw. Argumentationen zu. Es handelt sich daher um eine relativ offene Aufgabenstellung. Aus diesem Grund können die von den Schülern gewählten Formulierungen der Begründung nicht vorhergesehen werden und unterscheiden sich mit hoher Wahrscheinlichkeit von Schüler zu Schüler. Ein Vergleich der Lösungen im Unterrichtsgespräch oder durch Vorlage einer Musterlösung erscheint daher bei dieser Aufgabe kaum sinnvoll.

Stattdessen sollte die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, die Schüler ihre Lösungen und

Begründung gegenseitig auf Richtigkeit überprüfen zu lassen. Dafür bietet es sich an, **Kleingruppen** zu bilden, in denen die Schüler ihre Entscheidungen und Begründungen untereinander darlegen. Wenn ein Gruppenmitglied eine vorgebrachte Begründung nicht nachvollziehen kann oder als ungenügend erachtet, kann der Lehrer zur Diskussion hinzugezogen werden. Je größer die Anzahl der Schüler pro Gruppe ist, umso wahrscheinlicher ist es, dass eine fehlerhafte Argumentation als solche erkannt wird. Im Gegenzug steigt aber auch der Zeitaufwand, der für die Diskussion der Lösungen benötigt wird. Eine Anzahl von drei bis vier Schülern pro Gruppe stellt einen guten Kompromiss zwischen diesen beiden Aspekten dar.

Es bietet sich an, in die **Zusammenstellung der Gruppen** derart einzugreifen, dass wenn möglich in jeder Gruppe ein leistungsstarker Schüler vertreten ist, von dem erwartet wird, dass er unschlüssige Argumentationen mit hoher Wahrscheinlichkeit erkennt.

Es liegt auf der Hand, dass diese Variante der Ergebnissicherung den Schülern ein hohes Maß an Selbstständigkeit sowie Mitarbeit- und Diskussionsbereitschaft abverlangt. Sofern die Schüler dazu bereit sind, aktiv an der Gruppendiskussion teilzunehmen, erfolgt zusätzlich zur Erreichung der fachlichen Zielstellungen ein Schritt zur Erreichung allgemeiner Ziele im Bereich **Sozialkompetenz und Kommunikation**. Unter Umständen bleiben in der vorgeschlagenen Variante des Lösungsvergleichs fachliche Ungenauigkeiten oder Fehler unentdeckt. Der Zugewinn durch die Förderung der kommunikativen Fähigkeiten der Schüler wiegt diese Schwachstelle der Variante jedoch mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auf.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Lösungen der Schüler am Ende der Unterrichtsstunde einzusammeln und zu überprüfen, ob fachliche Fehler oder unschlüssige Argumentationen in den Diskussionen unentdeckt geblieben sind. So lässt sich ebenfalls ein guter Überblick darüber gewinnen, wie gut die Fähigkeiten zur Identifikation von Anti-/Teilchen in Abbildungen des OPAL-Eventdisplays bereits ausgeprägt sind. Anschließend sollte evaluiert werden, auf welche Aspekte eventuell erneut eingegangen werden muss, bevor die in den nachfolgenden Arbeitsmaterialien vorgesehene „Komplexe Übung zur Umwandlung von Z-Teilchen“ durchgeführt wird.

### 5.3.9 Komplexe Übung zur Umwandlung von Z-Teilchen

#### Benötigtes Vorwissen:

- Feynman-Diagramme
- Signaturen von Anti-/Teilchen im OPAL-Detektor und deren Darstellung im OPAL-Eventdisplay (Arbeitsmaterialien: „Nachweis von Anti-/Teilchen mit Großdetektoren“, „Identifikation einzelner Teilchen“)
- Entstehung von Jets (Arbeitsmaterialien : „Die Entstehung von Jets“)

#### Lernziele:

Die Schüler:

- fügen acht Hälften von im OPAL-Eventdisplay abgebildeten Ereignissen so zusammen, dass sich vier vollständige Abbildungen von Ereignissen ergeben, bei denen eine Umwandlung eines Z-Teilchens stattgefunden hat.
- zeichnen zu jeder vollständigen Abbildung ein Feynman-Diagramm, welches den jeweils zugrunde liegenden Umwandlungskanal des Z-Teilchens visualisiert.

#### Hinweise:

Diese Aufgabenstellung eignet sich als Abschluss der Betrachtungen zu den Umwandlungen des Z-Teilchens und der Teilchenidentifikation im OPAL-Eventdisplay. Sie kann also zur finalen **Ergebnissicherung** dienen. Mit Hilfe dieses Arbeitsblattes kann überprüft werden, ob die Schüler einerseits in der Lage sind, Anti-/Teilchen anhand der sichtbaren Signaturen im OPAL-Eventdisplay zu identifizieren und andererseits die verschiedenen möglichen Umwandlungskanäle des Z-Teilchens kennen. Im Gegensatz zu den Aufgabenstellungen in den bereits vorgestellten Arbeitsmaterialien müssen die Schüler hier diese Kenntnisse kombinieren, um die Aufgabe erfolgreich lösen zu können.

Zuerst müssen die in den Teilabbildungen zu sehenden Anti-/Teilchen identifiziert werden. Anschließend sollen die Teile zu vollständigen Abbildungen einer Z-Umwandlung zusammengefügt werden. In der Aufgabenstellung ist der **Hinweis** enthalten, dass die Teilabbildungen so zusammengefügt werden sollen, dass sich vier Ereignisse ergeben, die auf unterschiedliche

Umwandlungskanäle des Z-Teilchens zurückzuführen sind. Die Lösung dieses Aufgabenteils ist aufgrund dieser Vorgabe abgesehen von der Orientierung der Abbildungen eindeutig.

Damit die Zuordnung zusammenpassender Teilabbildungen nicht anhand geometrischer Überlegungen erfolgen kann, wurden an ihnen einige Veränderungen vorgenommen. Die Abbildungen wurden auf die schematische Darstellung des OPAL-Detektors und die sichtbaren Anti-/Teilchensignaturen reduziert. Dafür wurden das Koordinatensystem, der Maßstab, die Koordinaten des Abbildungsmittelpunktes sowie die Legende zu den Farben der Signaturen entfernt. Weiterhin wurden alle Abbildungen so gedreht, dass die Anti-/Teilchenspuren in der Spurkammer jeweils horizontal verlaufen.

Es kann sein, dass die Schüler die Abbildungen trotz falscher Teilchenidentifikation korrekt zusammensetzen. Dies wäre zum Beispiel der Fall, wenn sie Anti-/Myonen als Positronen bzw. Elektronen identifizieren und umgekehrt. Um überprüfen zu können, ob die Auswahl der zusammenpassenden Teile aufgrund korrekter Teilchenidentifikationen stattgefunden hat, sollen die Schüler zu den vier dargestellten Ereignissen jeweils ein Feynman-Diagramm zeichnen, welches den zugeordneten Umwandlungskanal des Z-Teilchens visualisiert. Sollten Feynman-Diagramme im Unterricht nicht ausführlich behandelt worden sein, so kann die Aufgabenstellung zur Angabe des Umwandlungskanals in Form einer Reaktionsgleichung (z.B.  $Z \rightarrow e^+ + e^-$ ) abgeändert werden.

In welcher Reihenfolge die Schüler die zusammengefügtten Abbildungen aufkleben ist nicht vorgegeben. Sie wird daher von Schüler zu Schüler unterschiedlich sein. Außerdem ist nicht vorhersehbar, in welcher Orientierung die Abbildungen aufgeklebt werden. Da es hierfür jeweils vier unterschiedliche Möglichkeiten gibt, bietet es sich bei dieser Aufgabe an, dass die Schüler ihre **Lösungen selbstständig mit dem Erwartungsbild vergleichen**. Dabei sollte darauf hingewiesen werden, dass eine andere als die vorgegebene Orientierung der Abbildungen ebenfalls eine korrekte Lösung darstellt.

Die Darstellungen der Z-Umwandlungen durch Feynman-Diagramme sind ebenfalls nicht eindeutig. Durch Vertauschen der Linien von Materie-Teilchen und Anti-Materie-Teilchen bei den Umwandlungsprodukten ergeben sich jeweils weitere korrekte Lösungen.

Alternativ kann zur **Differenzierung** den Schülern eine **Hilfestellung** in Form der beigefügten teilweise ausgefüllten Erwartungsbilder zur Verfügung gestellt werden. So lässt sich die Zusammenfügung der Teilabbildungen vor dem Zeichnen der Feynman-Diagramme vergleichen. Darüber hinaus ist es sinnvoll, hilfebedürftigen Schülern bei Bedarf die Feynman-Diagramme der abgebildeten Z-Umwandlungen zur Verfügung zu stellen. So können fehlende Kenntnisse zu den möglichen Umwandlungskanälen des Z-Teilchens ausgeglichen und die Aufgabe an-

schließlich nur durch die korrekte Identifikation der zugehörigen Signaturen vervollständigt werden.

### 5.3.10 Abstrahlung von Botenteilchen

#### Benötigtes Vorwissen:

- Kopplung der Botenteilchen an bestimmte Ladungen
- Umwandlung des Z-Teilchens in ein Quark-Anti-Quark-Paar (Arbeitsmaterialien: „Die Entstehung von Jets“, „Fehler: Referenz nicht gefunden“ und „Komplexe Übung zur Umwandlung von Z-Teilchen“)
- Jetbildung durch Gluonen (Arbeitsmaterialien: „Die Entstehung von Jets“)
- Signatur von Photonen im OPAL-Eventdisplay (Arbeitsmaterialien: „Identifikation einzelner Teilchen“)
- Emission von Botenteilchen durch Anti-/Materieteilchen
- Feynman-Diagramme

#### Lernziele:

Die Schüler:

- bestimmen in einer vorgegebenen Auflistung diejenigen Botenteilchen, die von einem Anti-/Quark nach dessen Entstehung bei der Umwandlung eines Z-Teilchens abgestrahlt werden können und begründen ihre Entscheidung unter Bezugnahme auf die Ladungen, Massen und Energien der an der Abstrahlung beteiligten Anti-/Teilchen.
- entscheiden für drei im OPAL-Eventdisplay dargestellte Ereignisse, bei denen eine Umwandlung des Z-Teilchens in ein Quark-Anti-Quark-Paar stattgefunden hat, ob von einem der Anti-/Quarks ein Botenteilchen abgestrahlt wurde und nennen gegebenenfalls, um welches Botenteilchen es sich gehandelt hat.
- vervollständigen zu jedem der drei Ereignisse das Feynman-Diagramm des zugrunde liegenden Prozesses.

#### Hinweise

In diesen Arbeitsmaterialien wird die Emission von Botenteilchen durch Anti-/Materieteilchen nach deren Entstehung bei der Umwandlung eines Z-Teilchens thematisiert. Die dabei zu erwerbenden Kenntnisse stellen eine **Voraussetzung** für die in den Materialien „Ergebnisse der LEP-Forschung“ gegebenen Informationstexte zur Bestimmung des starken Kopplungsparameters und der Anzahl der existierenden Neutrino-Generationen dar.

In **Aufgabe 1** müssen die Schüler ihre Kenntnisse zu den Botenteilchen des Standardmodells

und zu den Ladungen von Anti-/Quarks nutzen, um entscheiden zu können, welche Botenteilchen von einem Anti-/Quark emittiert werden können, welches bei der Umwandlung eines Z-Teilchens entstanden ist. Die Schüler müssen wissen, dass es sich bei einem Elektron-Neutrino nicht um ein Botenteilchen handelt, um eine Abstrahlung dieses Teilchens im Sinne der Aufgabenstellung ausschließen zu können. Mit dieser Aufgabe kann demnach überprüft werden, ob die Schüler den Begriff *Botenteilchen* korrekt zuordnen können.

In **Aufgabe 2** sollen die Schüler für drei im OPAL-Eventdisplay dargestellte Ereignisse jeweils entscheiden, ob ein Botenteilchen abgestrahlt wurde, und wenn dies der Fall war, um welches es sich dabei gehandelt hat. Dargestellt ist jeweils ein Ereignis mit Photon-Emission, Gluon-Emission und ohne emittiertes Botenteilchen.

Bei dem in der zweiten Abbildung dargestellten Ereignis befanden sich in den Jets energiearme Photonen. Dabei handelt es sich um Photonen, die während des Hadronisierungsprozesses entstanden sind, jedoch nicht von einem der primären Anti-/Quarks abgestrahlt wurden. Es ist durchaus denkbar, dass die Schüler die Photonen ebenfalls als abgestrahlte Photonen im Sinne der Aufgabenstellung auffassen. Um dem vorzubeugen, enthält die Aufgabenstellung den **Hinweis**, dass lediglich in zwei der drei dargestellten Ereignisse die Emission eines Botenteilchens (durch eines der primären Anti-/Quarks) stattgefunden hat.

Im Anschluss an die Identifikation der abgestrahlten Botenteilchen sollten die Schüler zu jedem Ereignis ein Feynman-Diagramm des zugrundeliegenden Prozesses zeichnen. Eine Möglichkeit dafür ist jeweils im **Erwartungsbild** angegeben. Da allerdings anhand der Ereignisdarstellungen nicht entschieden werden kann, ob das Botenteilchen von dem Quark oder dem Anti-Quark abgestrahlt wurde, sind die Feynman-Diagramme beider Prozesse als richtig anzusehen.

In der Darstellung des Ereignisses mit Gluon-Emission sind Energieeinträge zu erkennen, die sich scheinbar innerhalb der Spurkammer befinden. Es ist mit der **Schülerfrage** zu rechnen, woher diese stammen. Diese Einträge stammen von Anti-/Teilchen, die sich unter kleinem Winkel zur Strahlachse der Elektronen und Positronenstrahlen bewegt haben und aus diesem Grund in den Vorwärtskalorimetern detektiert wurden. In der vorliegenden Projektion scheint es daher so, als ob die Einträge in der Spurkammer hinterlassen wurden.

### 5.3.11 Ergebnisse der LEP-Forschung

#### Hinweise:

Diese Arbeitsmaterialien umfassen insgesamt drei **Informationstexte** zu verschiedenen Ergebnissen der LEP-Forschung (siehe Kapitel 4.3.3), die unabhängig voneinander eingesetzt werden können. Allgemeines Ziel der Auseinandersetzung mit diesen Informationsmaterialien ist, dass die Schüler einen Einblick erhalten, welche wichtigen Schlussfolgerungen aus den Experimenten am LEP gezogen werden konnten und welche Methoden bei der Auswertung der experimentellen Daten eingesetzt wurden. Diese Informationsmaterialien sollten in jedem Fall zum Einsatz kommen, damit den Schülern deutlich gemacht werden kann, wieso Kollisionsexperimente überhaupt durchgeführt werden. Ohne die Vorstellung von Forschungsergebnissen ist es wahrscheinlich, dass die Schüler den Zweck der Experimente allein auf die Identifikation von Anti-/Teilchen reduzieren und der eigentliche Sinn der Forschung unreflektiert bleibt.

**Vor dem Einsatz** dieser Materialien sollte wiederholt werden, weshalb zur Erkenntnisgewinnung bei Kollisionsexperimenten eine Vielzahl von Ereignissen ausgewertet werden müssen. Diese **Wiederholung** kann in Form eines Unterrichtsgesprächs erfolgen bei welchem herausgestellt wird, dass in der Teilchenphysik keine Aussagen über den Ausgang einer einzelnen Versuchsdurchführung getroffen werden und genauso wenig aus dem Ergebnis einer solchen Durchführung genaue Erkenntnisse über die Eigenschaften der Untersuchungsobjekte gewonnen werden können. Da es sich bei den Wechselwirkungen von Anti-/Teilchen um stochastische Prozesse handelt, müssen die entsprechenden Experimente sehr oft durchgeführt werden, um aussagefähige Ergebnisse zu erhalten. In den hier betrachteten Fällen bedeutet dies, dass eine Vielzahl von Umwandlungen des Z-Teilchens ausgewertet werden muss, damit Rückschlüsse auf die Eigenschaften der beteiligten Anti-/Teilchen sowie die stattgefundenen Wechselwirkung gezogen werden können.

Eine Möglichkeit der Verwendung der Texte ist die Durchführung eines **Gruppenpuzzles**, bei dem sich die Schüler mit jeweils einem der vorgestellten Ergebnisse beschäftigen und anschließend ihr erworbenes Wissen an andere Schüler weitergeben. Da sich die drei Texte im Umfang und der Komplexität der Inhalte unterscheiden, kann bei dieser Methode ebenfalls eine **Differenzierung** stattfinden.

Die Formulierung von **Verständnisfragen** und deren anschließende Diskussion im Unterrichtsgespräch stellt ebenfalls eine mögliche Form der Ergebnissicherung dar.

Im Folgenden wird das benötigte Vorwissen und die Zielstellung der einzelnen Informationstexte vorgestellt.

## **Die Leptonenuniversalität**

### Benötigtes Vorwissen:

- leptonische Umwandlungskanäle des Z-Teilchens
- Kopplung des Z-Teilchens an die elektrische und die schwache Ladung
- Feynman-Diagramme

### Lernziele:

Die Schüler:

- informieren sich über die Bestätigung der Leptonenuniversalität bei den LEP-Experimenten.
- wissen, dass Elektronen, Tauonen und Myonen abgesehen von ihrer Masse die gleichen Eigenschaften besitzen und dass diese Tatsache als *Leptonenuniversalität* bezeichnet wird.

## **Bestimmung des starken Kopplungsparameters**

### Benötigtes Vorwissen:

- starker Kopplungsparameter
- hadronischer Umwandlungskanal des Z-Teilchens (Arbeitsmaterialien: „Identifikation möglicher Umwandlungskanäle des Z-Teilchens“)
- Jetbildung (Arbeitsmaterialien: „Die Entstehung von Jets“)
- Feynman-Diagramme
- Abstrahlung von Botenteilchen (Arbeitsmaterialien: „Abstrahlung von Botenteilchen“)

### Lernziele:

Die Schüler:

- informieren sich über eine bei der LEP-Forschung eingesetzte Methode zur Bestimmung des starken Kopplungsparameters.
- wissen, dass bei den Experimenten am LEP die Vorhersagen des Standardmodells bezüglich der Energieabhängigkeit des starken Kopplungsparameters bestätigt wurden.

### **Die Anzahl der Neutrino-Generationen**

#### Benötigtes Vorwissen:

- leptonische Umwandlungskanäle des Z-Teilchens (Arbeitsmaterialien: „Identifikation möglicher Umwandlungskanäle des Z-Teilchens“)
- Feynman-Diagramme
- Abstrahlung von Botenteilchen (Arbeitsmaterialien: „Abstrahlung von Botenteilchen“)

### Lernziele:

Die Schüler:

- informieren sich über eine bei der LEP-Forschung eingesetzte Methode zur Bestimmung der Anzahl der existierenden leichten Anti-/Neutrinoarten
- wissen, dass bei den Experimenten am LEP bestätigt wurde, dass lediglich die drei bisher bekannten Arten leichter Anti-/Neutrinos existieren.

## 6 Literaturverzeichnis

- Abbiendi, G. et al. (OPAL collaboration) (2001). *Precise determination of the Z resonance parameters at LEP: „Zedometry“*. [http://opal.web.cern.ch/Opal/pubs/paper/pr328/journal/pr328\\_journal.pdf](http://opal.web.cern.ch/Opal/pubs/paper/pr328/journal/pr328_journal.pdf), [zuletzt besucht am 20.10.2015].
- Allison, J. et al. (1991). *The Detector Simulation Program for the OPAL Experiment at LEP*. <http://cds.cern.ch/record/228933/files/ppe-91-234.pdf>, [zuletzt besucht am 22.10.2015].
- Arduini, G. et al. (1996). *LEP1 operation, 1989-1995*. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e96/PAPERS/ORALS/MOO02A.PDF>, [zuletzt besucht am 25.10.2015].
- Aßmann, R., Lamont, M. & Myers, S. (2002). „A Brief History of the LEP Collider“. In Navarra, F.-L., Paganoni, M. & Pelfer, P. G. (Hrsg.): *The Legacy of LEP and SLC. Proceedings of the 7<sup>th</sup> Topical Seminar on the Legacy of LEP and SLC*. Elsevier, Amsterdam u.a.
- Barker, G. J. (2010). *b-Quark Physics with the LEP Collider: The Development of Experimental Techniques for B-Quark Studies from Z<sup>0</sup>-Decay*. Springer, Berlin & Heidelberg.
- Biebel, O. et al. (1992). *Performance of the OPAL jet chamber*. <https://cds.cern.ch/record/235819/files/cer-000150587.pdf>, [zuletzt besucht am 20.10.2015].
- Bleck-Neuhaus, J. (2013). *Elementare Teilchen. Von den Atomen über das Standard-Modell bis zum Higgs-Boson*. 2. Auflage. Springer, Berlin & Heidelberg.
- Brown, D. (2003). *Illuminati*. Bastei Lübbe, Köln.
- BSB, Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Schule und Berufsbildung (Hrsg.) (2009). *Bildungsplan gymnasiale Oberstufe. Physik*. <http://www.hamburg.de/contentblob/1475224/data/physik-gyo.pdf>, [zuletzt besucht am 19.10.2015].
- BSUK, Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus (2004). *Lehrplan für das Gymnasium in Bayern. Physik*. <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=27147>, [zuletzt besucht am 04.09.2015].
- Burkhardt, H. & Steinberger, J. (1991). „Tests of the Electroweak Theory at the Z Resonance“. In: Jackson, J. D., Gove, H. E. & Lüth, V. (Hrsg.) (1991). *Annual Review of Nuclear and Particle Science*. Volume 41. Annual Reviews Inc. Palo Alto, S. 55-96.
- Duit, R. (2004). „Teilchen- und Atomvorstellungen“. In: Müller, R., Wodzinski, R. & Hopf, M. (Hrsg.). *Schülervorstellungen in der Physik*. Aulis, Köln, S. 223-238.
- Dunne, P. (2001). *Looking for consistency in the construction and use of Feynman diagrams*. <http://www.xplora.org/downloads/Knoppix/CERN/Feynman.pdf>, [zuletzt besucht am 19.10.2015].
- Fischler, H. & Lichtfeldt, M. (2004). Teilchen und Atome. In: Müller, R., Wodzinski, R. & Hopf, M. (Hrsg.) (2004). *Schülervorstellungen in der Physik*. Aulis, Köln, S. 218-222.
- Grünewald, M. & Hebbeker, T. (1995). *Teilchenphysik am e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>-Speicherring LEP*. [web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/p104/p104\\_116.pdf](http://web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/p104/p104_116.pdf), [zuletzt besucht am 26.10.2015].
- Haag, C. (2002). „Measurement of inclusive and exclusive B-hadron lifetimes at LEP“. In: Navarra, F.-L., Paganoni, M. & Pelfer, P. G. (Hrsg.) (2002). *The Legacy of LEP and SLC. Proceedings of the 7<sup>th</sup> Topical Seminar on the Legacy of LEP and SLC*. Elsevier, Amsterdam u.a., S. 93-98.
- Hebbeker, T. (2005). *Skript zur Vorlesung Elementarteilchenphysik*. [http://web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/p104/p104\\_116.pdf](http://web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/p104/p104_116.pdf), [zuletzt besucht am 17.10.2015].
- HKM, Hessisches Kultusministerium (Hrsg.). (2010). *Lehrplan Physik. Gymnasialer Bildungsgang Jahrgangsstufe 6G bis 9G und gymnasiale Oberstufe*. [https://verwaltung.hessen.de/irj/servlet/prt/portal/prtroot/slimp.CMReader/HKM\\_15/HKM\\_Internet/med/4a1/4a1704b5-267f-121a-e-b6d-f191921321b2,22222222-2222-2222-2222-222222222222,true](https://verwaltung.hessen.de/irj/servlet/prt/portal/prtroot/slimp.CMReader/HKM_15/HKM_Internet/med/4a1/4a1704b5-267f-121a-e-b6d-f191921321b2,22222222-2222-2222-2222-222222222222,true), [zuletzt besucht am 22.10.2015].

- KMK, Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.) (2005). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss. Beschluss vom 16.12.2004*. Luchterhand, München & Neuwied.
- KMK, Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.) (2004). *Einheitliche Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung. Physik*. Luchterhand, München & Neuwied.
- KMSA, Kultusministerium des Landes Sachsen-Anhalt (Hrsg.) (2003). *Rahmenrichtlinien Gymnasium. Physik. Schuljahrgänge 6-12*. [http://www.bildung-lsa.de/pool/RRL\\_Lehrplaene/physgyrna.pdf](http://www.bildung-lsa.de/pool/RRL_Lehrplaene/physgyrna.pdf), [zuletzt besucht am 19.10.2015].
- Küblbeck, J. & Müller, R. (2002). *Die Wesenszüge der Quantenphysik: Modelle, Bilder, Experimente*. Aulis-Verlag Deubner, Köln.
- Küblbeck, J. (2015). Quantenphysik. In: Kircher, E., Girwidz, R. & Häußler, P. (Hrsg.) (2015). *Physikdidaktik. Theorie und Praxis. 3. Auflage*. Springer, Berlin Heidelberg, S. 479-501.
- LEP Injector Study Group. (1983). *LEP Design Report, Vol. 1: The LEP Injector Chain*. <https://cds.cern.ch/record/98881/files/cm-p00047695.pdf>, [zuletzt besucht am 19.10.2015].
- LEP Injector Study Group. (1984). *LEP design report, Vol. 2: The LEP main ring*. <https://cds.cern.ch/record/102083/files/cm-p00047694.pdf>, [zuletzt besucht am 19.10.2015].
- LHC Safety Assessment Group. (2008). *Review of the Safety of LHC Collisions*. <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0806/0806.3414.pdf>, [zuletzt besucht am 23.10.2015].
- Marinelli, N. (2002). „Measurement of the b quark branching fractions“. In: Navarra, F.-L., Paganoni, M. & Pelfer, P. G. (Hrsg.) (2002). *The Legacy of LEP and SLC. Proceedings of the 7<sup>th</sup> Topical Seminar on the Legacy of LEP and SLC*. Elsevier, Amsterdam u.a., S. 112-117.
- MBFFK, Ministerium für Bildung, Familie, Frauen und Kultur Saarland (Hrsg.) (2008). *Lehrplan Physik. Gymnasiale Oberstufe Saar (GOS). G-Kurs*. [http://www.saarland.de/dokumente/thema\\_bildung/PH-GOS-270711.pdf](http://www.saarland.de/dokumente/thema_bildung/PH-GOS-270711.pdf), [zuletzt besucht am 19.10.2015].
- MBJS, Ministerium für Bildung, Jugend und Sport des Landes Brandenburg (Hrsg.) (2011). *Vorläufiger Rahmenlehrplan für den Unterricht in der gymnasialen Oberstufe im Land Brandenburg. Physik*. [http://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/gymnasiale\\_oberstufe/curricula/2011/Physik-VRLP\\_GOST\\_2011\\_Brandenburg.pdf](http://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/gymnasiale_oberstufe/curricula/2011/Physik-VRLP_GOST_2011_Brandenburg.pdf), [zuletzt besucht am 19.10.2015].
- MBWK-TH, Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur (Hrsg.) (2012). *Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife. Physik*. [https://www.schulportal-thueringen.de/tip/resources/medien/14477?dateiname=Physik\\_GY\\_Nov\\_2012\\_7\\_12.pdf](https://www.schulportal-thueringen.de/tip/resources/medien/14477?dateiname=Physik_GY_Nov_2012_7_12.pdf), [zuletzt besucht am 19.10.2015].
- MBWW, Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (o.J.). *Lehrplan Physik*. [http://lehrplaene.bildung-rp.de/no-cache/schulart.html?tx\\_abdownloads\\_pi1%5Baction%5D=getviewclickedownload&tx\\_abdownloads\\_pi1%5Buid%5D=227](http://lehrplaene.bildung-rp.de/no-cache/schulart.html?tx_abdownloads_pi1%5Baction%5D=getviewclickedownload&tx_abdownloads_pi1%5Buid%5D=227), [zuletzt besucht am 19.10.2015].
- MBWK-MV, Ministerium für Bildung Wissenschaft und Kultur Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.) (2006). *Kerncurriculum für die Qualifikationsphase der gymnasialen Oberstufe. Physik*. <http://www.bildungs-server-mv.de/download/rahmenplaene/kc-physik-11-12-gym.pdf>, [zuletzt besucht am 19.10.2015].
- MBWK-SH, Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig-Holstein (Hrsg.) (2002). *Lehrplan für die Sekundarstufe II. Gymnasium, Gesamtschule. Physik*. <http://www.lehrplan.lernnetz.de/index.php?DownloadID=83>, [zuletzt besucht am 19.10.2015].
- MKJS, Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg (Hrsg.) (2004). *Bildungsplan 2004. Allgemein bildendes Gymnasium*. [http://www.bildung-staerkt-menschen.de/service/downloads/Bildungsplaene/Gymnasium/Gymnasium\\_Bildungsplan\\_Gesamt.pdf](http://www.bildung-staerkt-menschen.de/service/downloads/Bildungsplaene/Gymnasium/Gymnasium_Bildungsplan_Gesamt.pdf), [zuletzt besucht am 19.10.2015].
- MSW, Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2014). *Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Physik*. [http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp\\_SII/ph/KLP\\_GOST\\_Physik.pdf](http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/ph/KLP_GOST_Physik.pdf), [zuletzt besucht am 19.10.2015].

- Montagna, G., Moretti, M., Nicosini, O. & Piccinini, F. (1998). *Single-and multi-photon final states with missing energy at  $e^+ e^-$  colliders*. <http://arxiv.org/pdf/hep-ph/9807465.pdf>, [zuletzt besucht am 19.10.2015].
- Müller, R. (2003). *Quantenphysik in der Schule*. Logos, Berlin.
- Müller, R., Berger, R. & Wiesner, H. (1998). *Didaktische Aspekte des quantenmechanischen Zustandsbegriffs*. <https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/ifdn-physik/quant8.pdf>, [zuletzt besucht am 24.08.2015].
- Müller, R. & Wiesner, H. (2000). *Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik*. <http://homepages.physik.uni-muenchen.de/~milq/kap1/images/Lehrtext%20milq.pdf>, [zuletzt besucht am 24.08.2015].
- Nakamura, K. et al. (Particle Data Group) (2010). *Review of Particle Physics 2010*. <http://pdg.lbl.gov/2010/reviews/rpp2010-rev-light-neutrino-types.pdf>, [zuletzt besucht am 23.10.2015]
- Nakamura, K. et al. (Particle Data Group) (2011). *Review of Particle Physics 2010. Update 2011 für die Ausgabe 2012*. <http://pdg.lbl.gov/2011/listings/rpp2011-list-z-boson.pdf>, [zuletzt besucht am 23.10.2015].
- Netzwerk Teilchenwelt (Hrsg.) (2013). *Materialsammlung. Kontextmaterialien für Lehrkräfte*. Dresden.
- Netzwerk Teilchenwelt (2015). *Unterrichtsmaterial zu Teilchenphysik. Erstellt von Netzwerk Teilchenwelt. In Kooperation mit der Joachim Herz Stiftung*. In Vorbereitung.
- NKM, Niedersächsische Kultusministerium (Hrsg.) (2009). *Kerncurriculum für das Gymnasium – gymnasiale Oberstufe, die Gesamtschule – gymnasiale Oberstufe, das Fachgymnasium, das Abendgymnasium, das Kolleg. Physik*. [http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/kc\\_physik\\_go\\_i\\_2009.pdf](http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/kc_physik_go_i_2009.pdf), [zuletzt besucht am 19.10.2015]
- Olive, K.A. et al. (Particle Data Group) (2015.). *Review of Particle Physics 2014. Update 2015*. <http://pdg.lbl.gov/2015/tables/rpp2015-sum-leptons.pdf>, [zuletzt besucht am 23.10.2015].
- Pospiech, G. (2004). *Moderne Quantenphysik im Unterricht. Ein Lehrgang*. Logos, Berlin.
- Pospiech, G. & Schoene, M. (2012). *Quantenphysik in Schule und Hochschule*. <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/download/392/509>, [zuletzt besucht am 19.10.2015].
- Povh, B., Rith, K., Scholz, C. & Zetsche, F. (2009). *Teilchen und Kerne. Eine Einführung in die physikalischen Konzepte*. Achte Auflage. Springer, Berlin & Heidelberg.
- Rubbia, C. (1994). The discovery of the W and Z bosons. In: Brewer, D. F. et al. (Hrsg.) (1994). *Physics Reports. Volume 239, No. 4*. Elsevier, Amsterdam u.a., S. 241-284.
- SBW, Die Senatorin für Bildung und Wissenschaft (Hrsg.) (2008). *Physik. Bildungsplan für die Gymnasiale Oberstufe – Qualifikationsphase*. [http://www.lis.bremen.de/sixcms/media.php/13/PHY\\_GyQ\\_2008.pdf](http://www.lis.bremen.de/sixcms/media.php/13/PHY_GyQ_2008.pdf), [zuletzt besucht am 19.10.2015].
- Schieck, J. (2015). Elementarteilchenphysik in der Schule. In: Kircher E., Girwitz, R. Häußler, P. (Hrsg.). *Physikdidaktik. Theorie und Praxis*. 3. Auflage. Springer, Berlin & Heidelberg, S. 503-527.
- Schmüser, P. (1995). *Feynman-Graphen und Eichtheorien für Experimentalphysiker*. Zweite, neubearbeitete Auflage. Springer, Berlin & Heidelberg.
- Schopper, H. (2009). *LEP – The Lord of the Collider Rings at CERN 1980-2000. The Making, Operation and Legacy of the World's Largest Scientific Instrument*. Springer, Berlin & Heidelberg.
- Schorn, B. (o.J.). *Einführung in die Quantenphysik*. [http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt\\_materialien/quantenphysik\\_sek1/quant\\_sek1.pdf](http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt_materialien/quantenphysik_sek1/quant_sek1.pdf), [zuletzt besucht am 24.08.2015]
- SMK, Sächsisches Staatsministerium für Kultus und Sport (Hrsg.) (2011). *Lehrplan Gymnasium. Physik*. [http://www.schule.sachsen.de/lpdb/web/downloads/lp\\_gy\\_physik\\_2011.pdf?v2](http://www.schule.sachsen.de/lpdb/web/downloads/lp_gy_physik_2011.pdf?v2), [zuletzt besucht am 19.10.2015].
- Treille, D. (2002). „LEP/SLC: what did we expect? What did we achieve? A very quick historical review“. In: Navarra, F.-L., Paganoni, M. & Pelfer, P. G. (Hrsg.) (2002). *The Legacy of LEP and SLC. Proceedings of the 7<sup>th</sup> Topical Seminar on the Legacy of LEP and SLC*. Elsevier, Amsterdam u.a., S. 1-16.

- Vollmer, C. F. (2004). *Bestimmung der Masse und Breite des W-Boson Teilchens im semileptonischen Zerfallskanal mit dem OPAL Detektor bei LEP. Dissertation der Fakultät für Physik Ludwig-Maximilians-Universität München.* [https://edoc.ub.uni-muenchen.de/2111/1/vollmer\\_cornelius\\_fritz.pdf](https://edoc.ub.uni-muenchen.de/2111/1/vollmer_cornelius_fritz.pdf), [zuletzt besucht am 25.10.2015].
- Ward, D.R. (2002). „Experimental Status of  $\alpha_s$  Measurements“. In: Navarra, F.-L., Paganoni, M. & Pelfer, P.G. (Hrsg.) (2002). *The Legacy of LEP and SLC. Proceedings of the 7<sup>th</sup> Topical Seminar on the Legacy of LEP and SLC.* Elsevier, Amsterdam u.a., S. 74-80.
- Wilson, I. H. & Henke, H. (1989). *The LEP main-ring accelerating structure.* <http://cds.cern.ch/record/202932/files/CERN-89-09.pdf>, [zuletzt besucht am 19.10.2015].

### Weitere Onlinequellen:

- <http://www.weltderphysik.de/thema/physik-im-spielfilm/illuminati/wahr-oder-falsch/>  
[zuletzt besucht am 17.10.2015]
- [http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=schwarze\\_loecher](http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=schwarze_loecher)  
[zuletzt besucht am 17.10.2015]
- [http://erlangen.physicsmasterclasses.org/msm\\_feyn/msm\\_feyn\\_00.html](http://erlangen.physicsmasterclasses.org/msm_feyn/msm_feyn_00.html)  
[zuletzt besucht am 20.10.2015]
- <http://home.web.cern.ch/about/accelerators/large-electron-positron-collider>  
[zuletzt besucht am 22.10.2015]
- <http://home.web.cern.ch/about/experiments/opal>  
[zuletzt besucht am 21.10.2015]
- <http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/home.html>  
[zuletzt besucht am 22.10.2015]
- <http://www-static.etp.physik.uni-muenchen.de/fp-versuch/node11.html>  
[zuletzt besucht am 22.10.2015]
- [http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/ATLAS/de/zpath\\_neutrino.htm](http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/ATLAS/de/zpath_neutrino.htm)  
[zuletzt besucht am 25.10.2015]
- [http://erlangen.physicsmasterclasses.org/msm\\_verei/msm\\_verei\\_00a.html](http://erlangen.physicsmasterclasses.org/msm_verei/msm_verei_00a.html)  
[zuletzt besucht am 22.10.2015]
- <http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/tautau.html>  
[zuletzt besucht am 20.10.2015]

## 7 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	<i>Übersicht über die Vereinheitlichung physikalischer Theorien</i> <a href="http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/teilchenphysik#Das%20Prinzip%20der%20Vereinfachung">http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/teilchenphysik#Das%20Prinzip%20der%20Vereinfachung</a> [zuletzt besucht am 26.10.2015]	S. 4
Abb. 2	<i>Feynman-Diagramm einer Beta-Umwandlung</i> von Philipp Lindenau mit JaxoDraw erstellt	S. 15
Abb. 3	<i>Linientypen in Feynman-Diagrammen</i> von Philipp Lindenau mit JaxoDraw erstellt	S. 16
Abb. 4	<i>Die vier fundamentalen Vertices zur Konstruktion von Feynman-Diagrammen.</i> <i>o. l.: Emission eines Botenteilchens, o. r.: Absorption eines Botenteilchens,</i> <i>u. l.: Paarvernichtung, u. r.: Paarerzeugung</i> von Philipp Lindenau mit JaxoDraw erstellt	S. 18
Abb. 5	<i>Feynman-Diagramm der Elektron-Elektron-Streuung</i> von Philipp Lindenau mit JaxoDraw erstellt	S. 18
Abb. 6	<i>Das zweidimensionale Farbgitter</i> Netzwerk Teilchenwelt (2015)	S. 20
Abb. 7	<i>Die drei Farbladungsvektoren der Quarks</i> Netzwerk Teilchenwelt (2015)	S. 20
Abb. 8	<i>Die drei Anti-Farbladungsvektoren der Anti-Quarks</i> Netzwerk Teilchenwelt (2015)	S. 20
Abb. 9	<i>Die drei Generationen der elementaren Materieteilchen</i> Netzwerk Teilchenwelt (2015)	S. 23
Abb. 10	<i>Überführung des Vertex der Emission eines Z-Teilchens durch ein Elektron in den Vertex der Paarerzeugung eines Elektron-Positron-Paares aus einem Z-Teilchen durch Rotation</i> von Philipp Lindenau mit JaxoDraw erstellt	S. 24
Abb. 11	<i>Schematische Darstellung des Vorbeschleuniger-Netzes des LEP</i> Schopper (2009)	S. 28
Abb. 12	<i>Foto des LEP-Tunnels</i> <a href="http://www-static.etp.physik.uni-muenchen.de/fp-versuch/lepTunnel.jpg">http://www-static.etp.physik.uni-muenchen.de/fp-versuch/lepTunnel.jpg</a> [zuletzt besucht am 22.10.2015]	S. 28
Abb. 13	<i>Schematische Darstellung des OPAL-Detektors mit Beschriftung wesentlicher Komponenten</i> Vollmer (2004), verändert durch Philipp Lindenau	S. 32
Abb. 14	<i>Foto der zentralen Spurkammer des OPAL-Detektors nach dessen Abbau im Jahr 2001</i> <a href="http://opal.web.cern.ch/Opal/pix/Dismantling/2400/471.jpg">http://opal.web.cern.ch/Opal/pix/Dismantling/2400/471.jpg</a> [zuletzt besucht am 10.10.2015]	S. 33
Abb. 15	<i>Foto einer Hälfte des elektromagnetischen Kalorimeters des OPAL-Detektors</i> <a href="http://www-static.etp.physik.uni-muenchen.de/fp-versuch/OPAL_ECAL.jpeg">http://www-static.etp.physik.uni-muenchen.de/fp-versuch/OPAL_ECAL.jpeg</a> [zuletzt besucht am 22.10.2015]	S. 34
Abb. 16	<i>Darstellung eines Ereignisses im OPAL-Eventdisplay</i> <a href="http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5293_54644.gif">http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5293_54644.gif</a> [zuletzt besucht am 27.09.2015], verändert durch Philipp Lindenau	S. 35

Abb. 17	<i>Vereinfachte Darstellung des OPAL-Eventdisplays mit Kennzeichnung der wesentlichen Detektorbereiche</i> <a href="http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5293_54644.gif">http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5293_54644.gif</a> [zuletzt besucht am 27.09.2015], verändert durch Philipp Lindenau	S. 36
Abb. 18	<i>Farbcode der Energiebereiche im OPAL-Eventdisplay</i> <a href="http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/detector1.html">http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/detector1.html</a> [zuletzt besucht am 20.10.2015], verändert durch Philipp Lindenau	S. 36
Abb. 19	<i>Übersicht über Einträge verschiedener Anti-/Teilchen in den einzelnen Komponenten des OPAL-Detektors.</i> Netzwerk Teilchenwelt (2015)	S. 38
Abb. 20	<i>Spurkrümmung von elektrisch geladenen Anti-/Teilchen, links: elektrisch negativ geladenes Teilchen (Elektron), mittig: elektrisch positiv geladenes Anti-/Teilchen (Positron), rechts: aufgrund des großen Impulses des Anti-/Teilchens ist keine Spurkrümmung erkennbar</i> <a href="http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/">http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/</a> [zuletzt besucht am 23.10.2015], verändert durch Philipp Lindenau	S. 39
Abb. 21	<i>Signatur eines elektrisch (negativ) geladenen Hadrons im OPAL-Eventdisplay</i> <a href="http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7579_54729.gif">http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7579_54729.gif</a> [zuletzt besucht am 20.10.2015], verändert durch Philipp Lindenau	S. 40
Abb. 22	<i>Signatur eines Anti-/Myons im OPAL-Eventdisplay</i> <a href="http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7596_33708.gif">http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7596_33708.gif</a> [zuletzt besucht am 20.10.2015], verändert durch Philipp Lindenau	S. 40
Abb. 23	<i>Bildung neuer Anti-/Quarks als Folge des Confinements</i> Netzwerk Teilchenwelt (2015), verändert durch Philipp Lindenau	S. 41
Abb. 24	<i>Signaturen zweier Jets im OPAL-Eventdisplay, welche durch Hadronisierung aus einem Quark-Anti-Quark-Paar entstanden sind</i> <a href="http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5293_20246.gif">http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5293_20246.gif</a> [zuletzt besucht am 20.10.2015], verändert durch Philipp Lindenau	S. 42
Abb. 25	<i>Feynman-Diagramm für die Erzeugung eines Z-Teilchens bei einer Elektron-Positron-Kollision</i> von Philipp Lindenau mit JaxoDraw erstellt	S. 43
Abb. 26	<i>Signatur eines Myon-Anti-Myon-Paares im OPAL-Eventdisplay, welches durch Umwandlung eines Tauon-Anti-Tauon-Paares entstanden ist.</i> <a href="http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5293_19167.gif">http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5293_19167.gif</a> [zuletzt besucht am 20.10.2015], verändert durch Philipp Lindenau	S. 48
Abb. 27	<i>Abbildung 27: Signaturen zweier Jets im OPAL-Eventdisplay, die nach der Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Quark-Anti-Quark-Paar entstanden sind</i> <a href="http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7575_31138.gif">http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7575_31138.gif</a> [zuletzt besucht am 20.10.2015], verändert durch Philipp Lindenau	S. 49
Abb. 28	<i>Theoretischer Verlauf (QCD-Quantenchromodynamik) der Energieabhängigkeit des starken Kopplungsparameters und Messwerte aus der Analyse von Anti-/Tauon- und Z-Umwandlungen</i> Grünewald und Hebbeker (1995)	S. 51
Abb. 29	<i>Feynman-Diagramm für die Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Quark-Anti-Quark-Paar</i> von Philipp Lindenau mit JaxoDraw erstellt	S. 52
Abb. 30	<i>Die beiden möglichen Feynman-Diagramme für die Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Quark-Anti-Quark-Paar mit anschließender Emission von Gluon-Bremsstrahlung</i> von Philipp Lindenau mit JaxoDraw erstellt	S. 52
Abb. 31	<i>Visualisierung eines 3-Jet-Ereignisses im OPAL-Eventdisplay</i> <a href="http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7579_6540.gif">http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7579_6540.gif</a> [zuletzt besucht am 20.10.2015], verändert durch Philipp Lindenau	S. 52

Abb. 32 *Feynman-Diagramm der Erzeugung eines Z-Teilchens und dessen anschließender Umwandlung in ein Neutrino-Anti-Neutrino-Paar mit der Abstrahlung eines Photons vor der Erzeugung des Z-Teilchens* S. 57  
von Philipp Lindenau mit JaxoDraw erstellt

## A Anhang

## **A.1 Arbeitsmaterialien: Der OPAL-Detektor**

## Der OPAL-Detektor

OPAL (**O**mn**P**urpose **A**pparatus at **L**EP) war neben ALEPH, DELPHI und L3 einer der Detektoren am Large Electron-Positron Collider (LEP). Er besaß die Abmessungen eines Würfels mit etwa 12 Metern Kantenlänge.

Der OPAL-Detektor diente dem Nachweis und der Identifikation von Teilchen, die am LEP bei den Elektron-Positron-Kollisionen entstanden waren. Dafür bestand der OPAL-Detektor aus einer Vielzahl verschiedener Komponenten, welche zwiebelschalenförmig um den Kollisionspunkt von Elektronen und Positronen angeordnet waren.



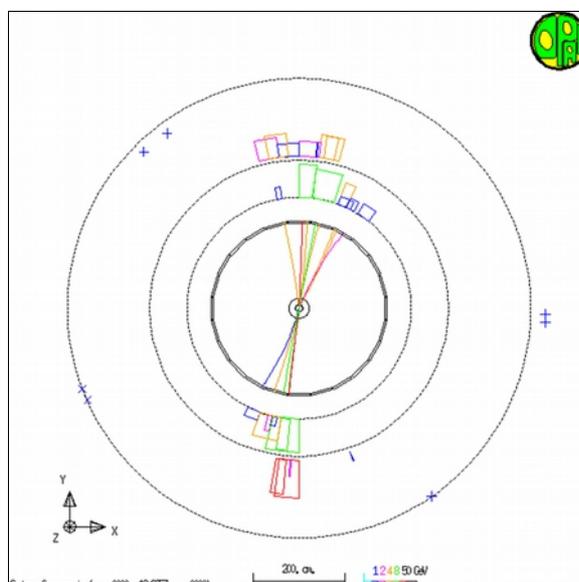
(Quelle: <http://opal.web.cern.ch/Opal/pix/Dismantling/2400/471.jpg>, 10.10.2015)

Zuerst durchquerten die entstandenen Anti-/Teilchen die von einem Magnetfeld durchsetzte **zentrale Spurkammer**. In dieser konnten elektrisch geladenen Teilchen nachgewiesen werden. Das Foto oben rechts zeigt die Spurkammer nach dem Abbau des OPAL-Detektors im Jahr 2001.

Nach der Spurkammer folgte das **elektromagnetische Kalorimeter** zur Bestimmung der Energien von elektrisch geladenen Leptonen und Photonen. Um auch die Energie der entstandenen Hadronen bestimmen zu können, war nach dem elektromagnetischen ein **hadronisches Kalorimeter** installiert. Die äußere Schicht des OPAL-Detektors bildeten die **Myonenkammern** zum Nachweis der entstandenen Anti-/Myonen. Anti-/Neutrinos konnten mit dem OPAL-Detektor nicht auf direktem Weg nachgewiesen werden.

Um auch Teilchen nachzuweisen zu können, die sich in Richtung der einlaufenden Elektronen- und Positronenstrahlen durch den Detektor bewegten, waren an den Enden des Detektors **Vorwärtsdetektoren und -kalorimeter** sowie **Myonen-Endkappen** installiert.

Zur Analyse der am OPAL-Detektor beobachteten Ereignisse stand den Wissenschaftlern ein sogenanntes **Eventdisplay** zur Verfügung, in welchem die Signaturen der beobachteten Teilchen visualisiert wurden. In der Abbildung unten ist das Bild eines Ereignisses im OPAL-Eventdisplay zu sehen, bei dem eine Vielzahl unterschiedlicher Anti-/Teilchen entstanden ist. Diese haben sich anschließend aus der Detektormitte nach außen bewegt. In dieser Darstellung entspricht die z-Richtung (senkrecht zur Abbildungsebene) der Bewegungsrichtung der Elektronen und Positronen, die im Zentrum des OPAL-Detektors zur Kollision gebracht wurden.



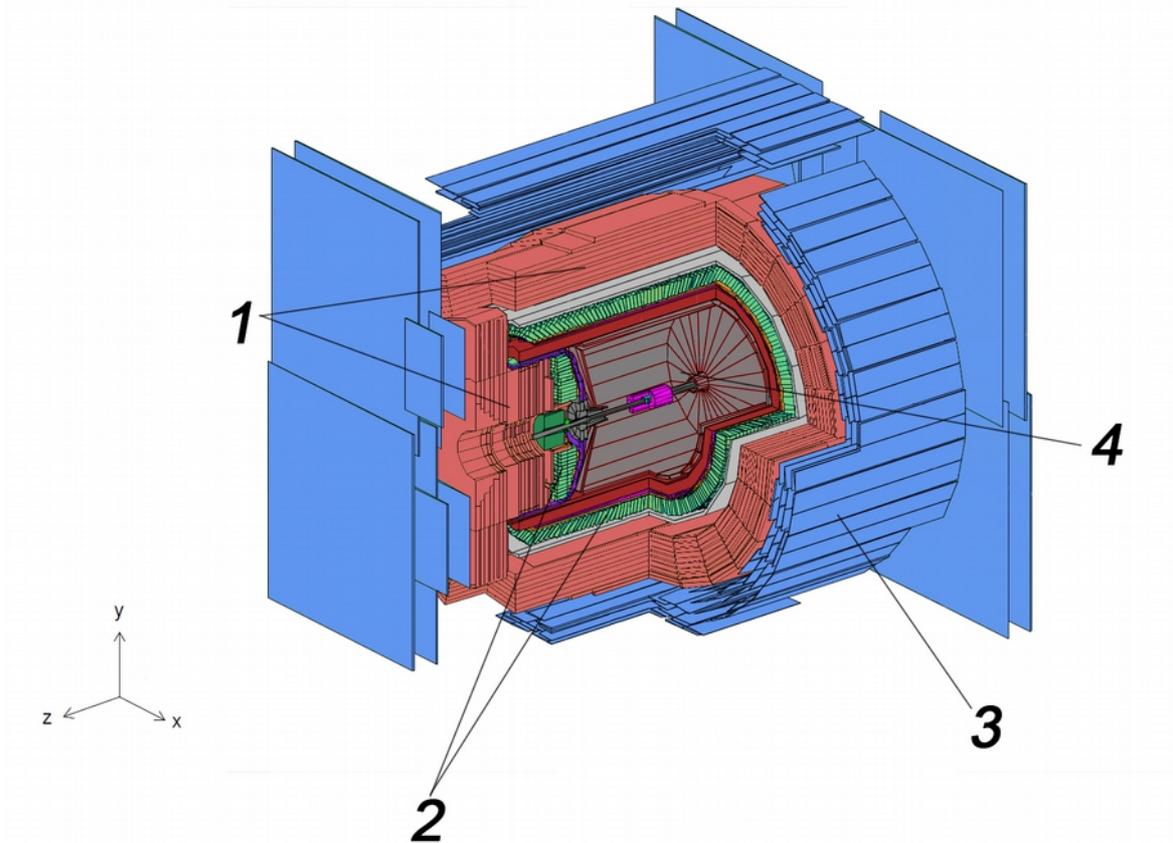
(Quelle: [http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5294\\_9103.gif](http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5294_9103.gif), 27.09.2015, verändert durch Philipp Lindenau)

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Beschrifte die Myonenkammer, die Spurkammer sowie die hadronischen und elektromagnetischen Kalorimeter in der schematischen Darstellung des OPAL-Detektors. Trage die zu den Komponenten gehörenden Zahlen anschließend in die zugehörigen Bereiche des OPAL-Eventdisplays ein.  
Hinweis: Beachte die Orientierung der dargestellten Koordinatensysteme.

Schematische Darstellung des OPAL-Detektors:



(Quelle: Vollmer, C. F. (2004). Bestimmung der Masse und Breite des W-Bosons im semileptonischen Zerfallskanal mit dem OPAL Detektor bei LEP, verändert durch Philipp Lindenau)

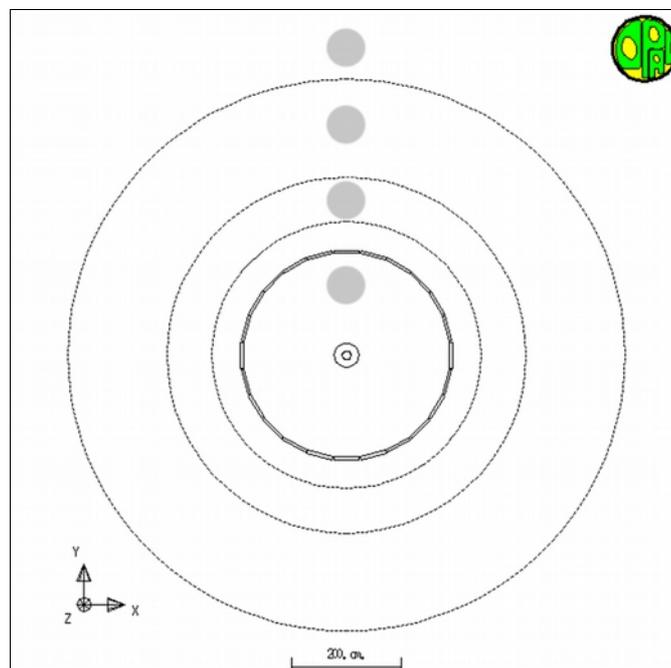
1 \_\_\_\_\_

3 \_\_\_\_\_

2 \_\_\_\_\_

4 \_\_\_\_\_

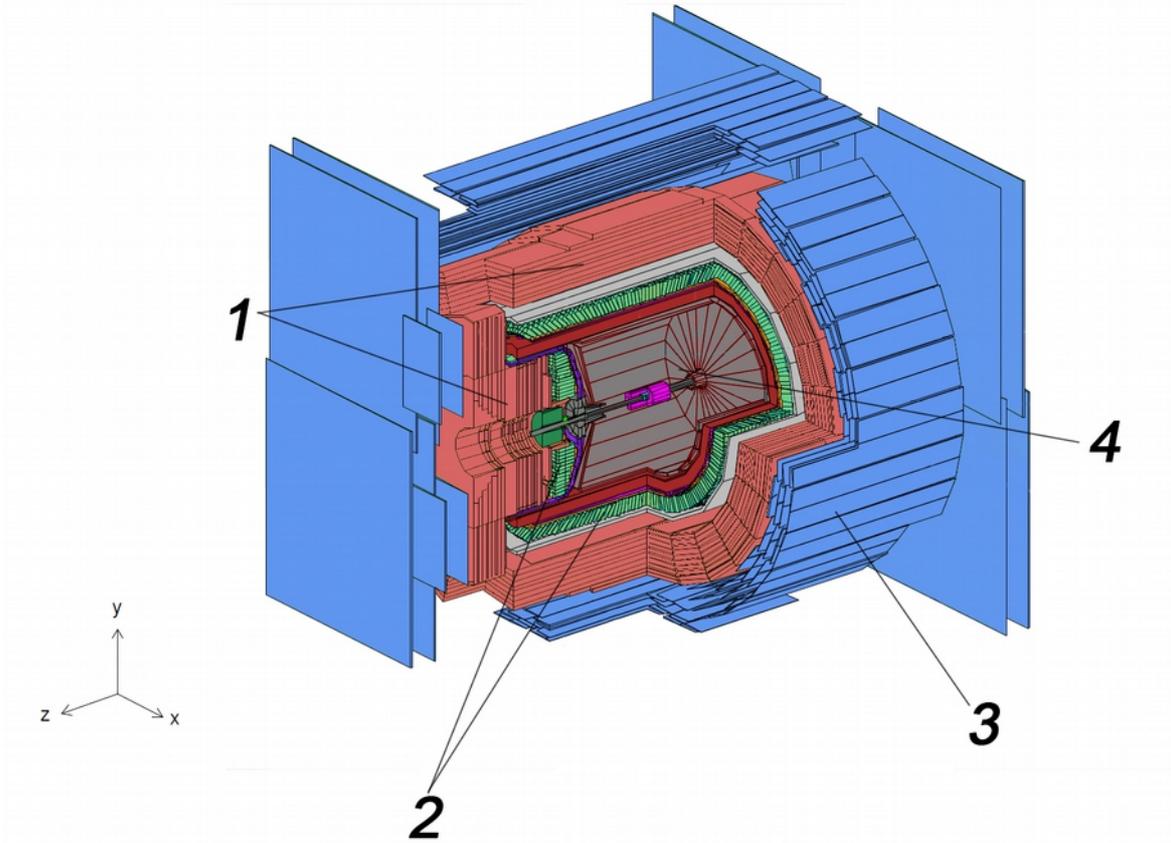
Vereinfachte Darstellung des OPAL-Eventdisplays:



(Quelle: [http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7575\\_13812.gif](http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7575_13812.gif), 20.08.2015, verändert durch Philipp Lindenau)

Beschrifte die Myonenkammer, die Spurkammer sowie die hadronischen und elektromagnetischen Kalorimeter in der schematischen Darstellung des OPAL-Detektors. Trage die zu den Komponenten gehörenden Zahlen anschließend in die zugehörigen Bereiche des OPAL-Eventdisplays ein.  
 Hinweis: Beachte die Orientierung der dargestellten Koordinatensysteme.

Schematische Darstellung des OPAL-Detektors:



(Quelle: Vollmer, C. F. (2004). Bestimmung der Masse und Breite des W-Bosons im semileptonischen Zerfallskanal mit dem OPAL Detektor bei LEP, verändert durch Philipp Lindenau)

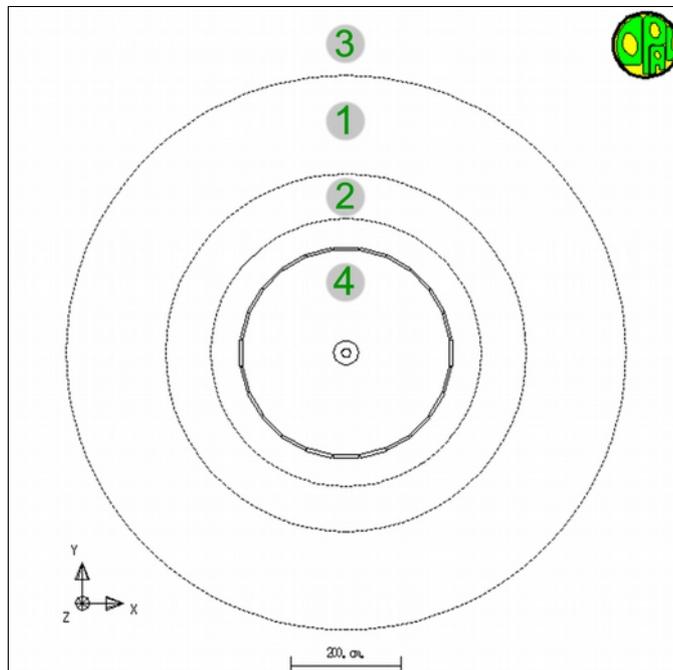
1 hadronische Kalorimeter

3 Myonenkammer

2 elektromagnetische Kalorimeter

4 Spurkammer

Vereinfachte Darstellung des OPAL-Eventdisplays:



(Quelle: [http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7575\\_13812.gif](http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7575_13812.gif), 20.08.2015, verändert durch Philipp Lindenau)

## **A.2 Arbeitsmaterialien: Nachweis von Anti-/Teilchen mit Großdetektoren**

## Nachweis von Anti-/Teilchen mit Großdetektoren

1. Bei einer Elektron-Positron-Kollision **im Inneren** des OPAL-Detektors konnten viele verschiedene Anti-/Teilchen entstehen. Diese konnten anhand der Spuren und Energieeinträge, die sie in den Detektorkomponenten hinterließen, unterschieden werden.

Kreuze an, welche der folgenden Anti-/Teilchen Energieeinträge im **hadronischen Kalorimeter** hinterlassen haben.

- |                                   |   |                                   |
|-----------------------------------|---|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Elektron | <input type="checkbox"/> Photon         | <input type="checkbox"/> Neutron  |
| <input type="checkbox"/> Myon     | <input type="checkbox"/> Tauon-Neutrino | <input type="checkbox"/> Positron |
| <input type="checkbox"/> Proton   |   |                                   |

Kreuze an, welche der folgenden Anti-/Teilchen in der **Spurkammer** detektiert werden konnten.

- |                                   |   |                                   |
|-----------------------------------|---|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Elektron | <input type="checkbox"/> Photon         | <input type="checkbox"/> Neutron  |
| <input type="checkbox"/> Myon     | <input type="checkbox"/> Tauon-Neutrino | <input type="checkbox"/> Positron |
| <input type="checkbox"/> Proton   |   |                                   |

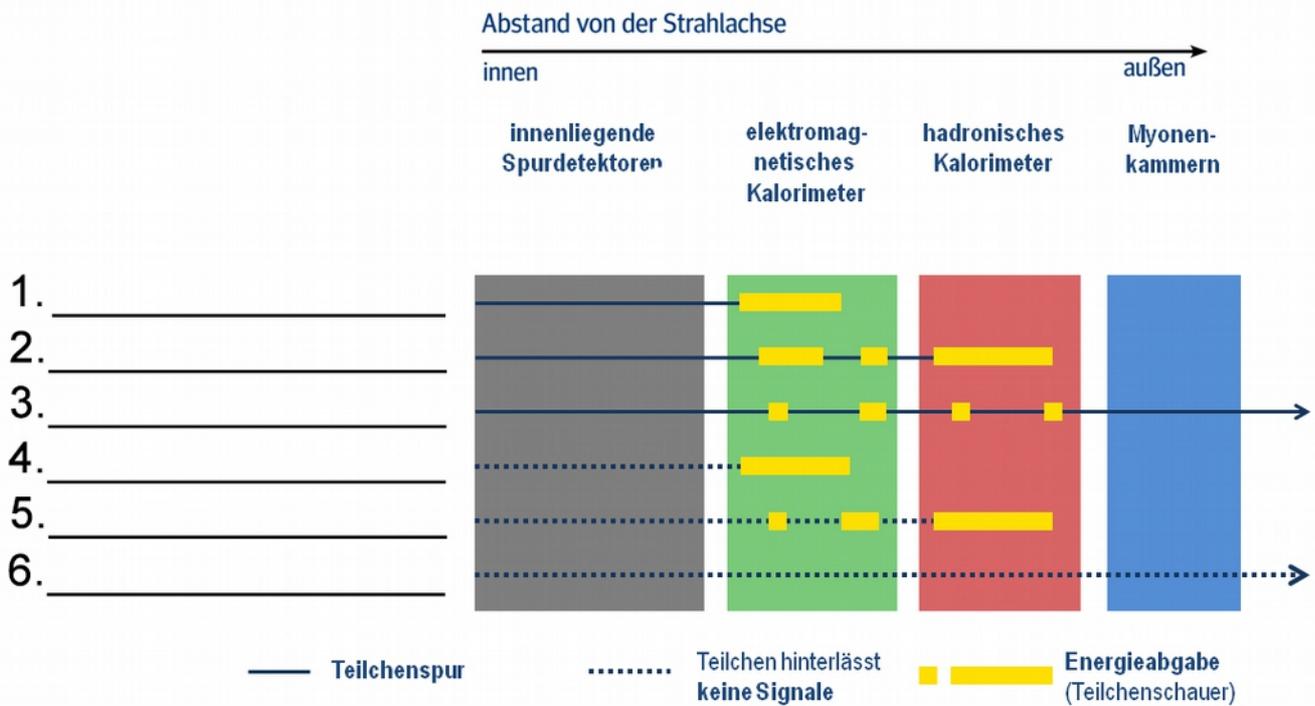
Kreuze an, welche der folgenden Anti-/Teilchen in der **Myonenkammer** detektiert werden konnten.

- |                                   |   |                                   |
|-----------------------------------|---|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Elektron | <input type="checkbox"/> Photon         | <input type="checkbox"/> Neutron  |
| <input type="checkbox"/> Myon     | <input type="checkbox"/> Tauon-Neutrino | <input type="checkbox"/> Positron |
| <input type="checkbox"/> Proton   |   |                                   |

Kreuze an, welche der folgenden Anti-/Teilchen Energieeinträge im **elektromagnetischen Kalorimeter** hinterlassen haben.

- |                                   |   |                                   |
|-----------------------------------|---|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Elektron | <input type="checkbox"/> Photon         | <input type="checkbox"/> Neutron  |
| <input type="checkbox"/> Myon     | <input type="checkbox"/> Tauon-Neutrino | <input type="checkbox"/> Positron |
| <input type="checkbox"/> Proton   |   |                                   |

2. In der folgenden schematischen Darstellung des OPAL-Detektors sind die Signaturen unterschiedlicher Anti-/Teilchen dargestellt, welche diese nach ihrer Entstehung im Inneren des OPAL-Detektors hinterlassen haben.  
 Beschrifte die dargestellten Signaturen jeweils mit den Namen derjenigen Anti-/Teilchen, die sie erzeugt haben können.  
 Hinweis:  
 Den Signaturen können meist mehrere Anti-/Teilchen zugeordnet werden.  
 Gib gegebenenfalls den allgemeinen Namen der entsprechenden Anti-/Teilchenklasse an.



(Quelle: Netzwerk Teilchenwelt (2015). Unterrichtsmaterial zur Teilchenphysik, verändert durch Philipp Lindenu)

## Nachweis von Anti-/Teilchen mit Großdetektoren

1. Bei einer Elektron-Positron-Kollision **im Inneren** des OPAL-Detektors konnten viele verschiedene Anti-/Teilchen entstehen. Diese konnten anhand der Spuren und Energieeinträge, die sie in den Detektorkomponenten hinterließen, unterschieden werden.

Kreuze an, welche der folgenden Anti-/Teilchen Energieeinträge im **hadronischen Kalorimeter** hinterlassen haben.

- |  |   |   |
|--|---|---|
| <input type="checkbox"/> Elektron          | <input type="checkbox"/> Photon         | <input checked="" type="checkbox"/> Neutron |
| <input checked="" type="checkbox"/> Myon   | <input type="checkbox"/> Tauon-Neutrino | <input type="checkbox"/> Positron           |
| <input checked="" type="checkbox"/> Proton |   |   |

Kreuze an, welche der folgenden Anti-/Teilchen in der **Spurkammer** detektiert werden konnten.

- |  |   |  |
|--|---|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Elektron | <input type="checkbox"/> Photon         | <input type="checkbox"/> Neutron             |
| <input checked="" type="checkbox"/> Myon     | <input type="checkbox"/> Tauon-Neutrino | <input checked="" type="checkbox"/> Positron |
| <input checked="" type="checkbox"/> Proton   |   |  |

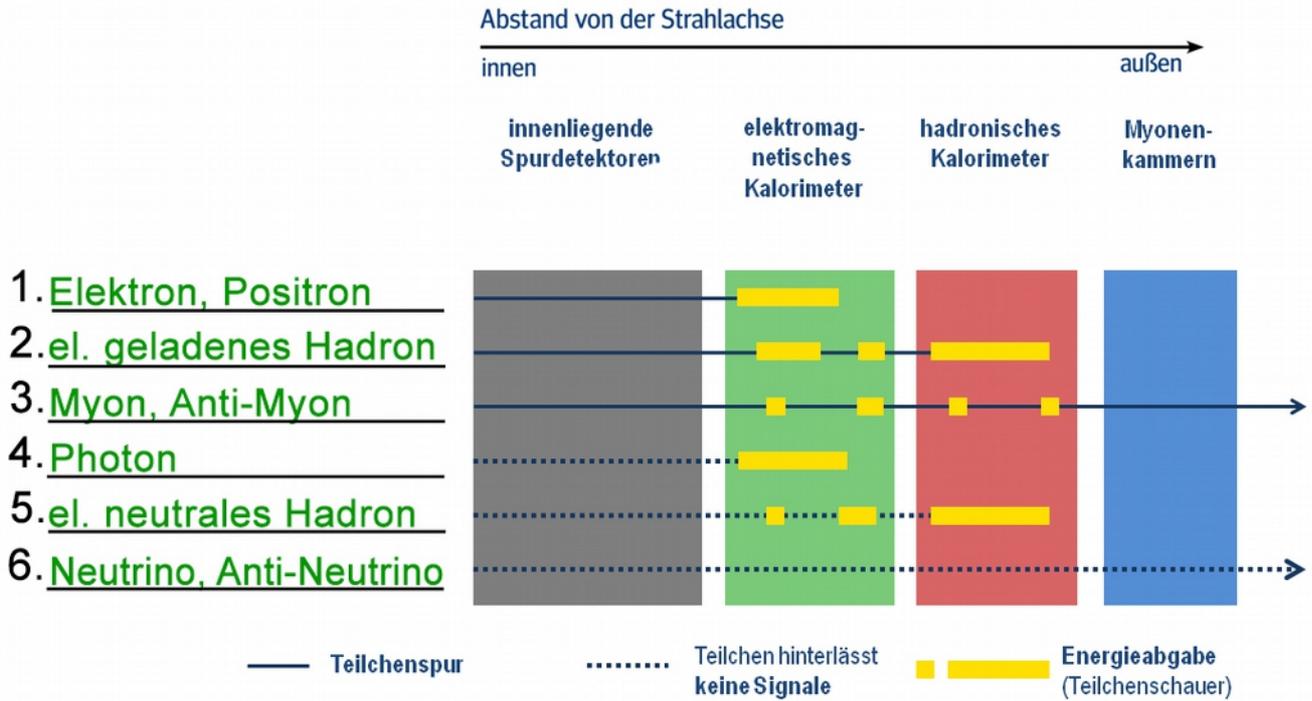
Kreuze an, welche der folgenden Anti-/Teilchen in der **Myonenkammer** detektiert werden konnten.

- |  |   |                                   |
|--|---|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Elektron        | <input type="checkbox"/> Photon         | <input type="checkbox"/> Neutron  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Myon | <input type="checkbox"/> Tauon-Neutrino | <input type="checkbox"/> Positron |
| <input type="checkbox"/> Proton          |   |                                   |

Kreuze an, welche der folgenden Anti-/Teilchen Energieeinträge im **elektromagnetischen Kalorimeter** hinterlassen haben.

- |  |  |  |
|--|--|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Elektron | <input checked="" type="checkbox"/> Photon | <input checked="" type="checkbox"/> Neutron  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Myon     | <input type="checkbox"/> Tauon-Neutrino    | <input checked="" type="checkbox"/> Positron |
| <input checked="" type="checkbox"/> Proton   |  |  |

2. In der folgenden schematischen Darstellung des OPAL-Detektors sind die Signaturen unterschiedlicher Anti-/Teilchen dargestellt, welche diese nach ihrer Entstehung im Inneren des OPAL-Detektors hinterlassen haben.  
 Beschrifte die dargestellten Signaturen jeweils mit den Namen derjenigen Anti-/Teilchen, die sie erzeugt haben können.  
 Hinweis:  
 Den Signaturen können meist mehrere Anti-/Teilchen zugeordnet werden.  
 Gib gegebenenfalls den allgemeinen Namen der entsprechenden Anti-/Teilchenklasse an.



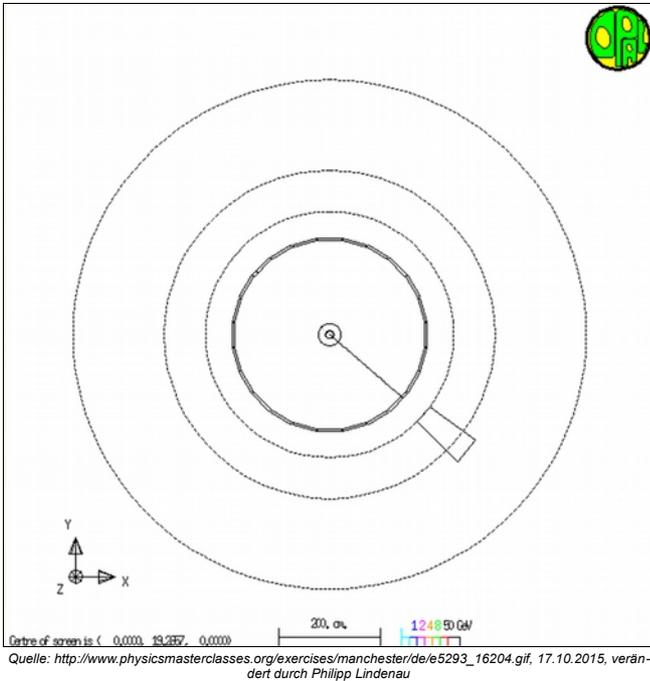
(Quelle: Netzwerk Teilchenwelt (2015). Unterrichtsmaterial zur Teilchenphysik, verändert durch Philipp Lindenu)

### **A.3 Arbeitsmaterialien: Identifikation einzelner Teilchen**

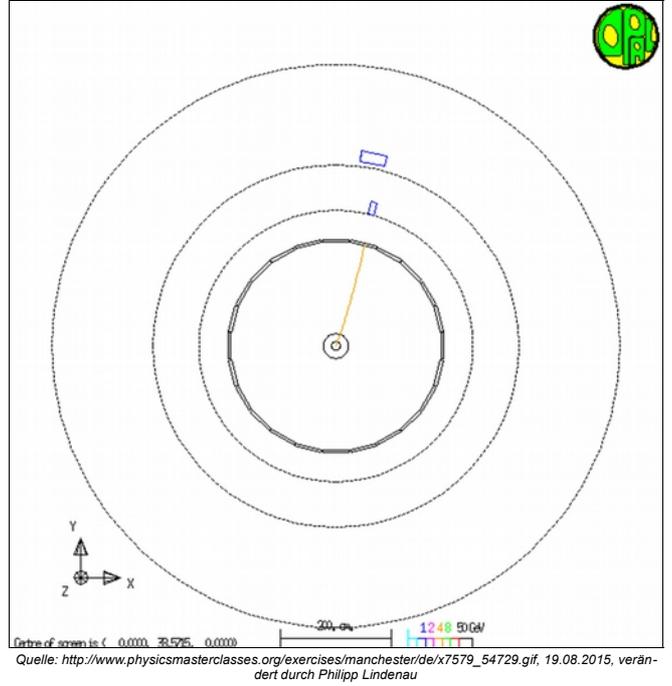
## Identifikation einzelner Teilchen

In den folgenden Abbildungen sind jeweils Signaturen einzelner Teilchen im OPAL-Eventdisplay dargestellt. Ordne den Abbildungen zu, welche der aufgeführten Teilchen die jeweilige Signatur hinterlassen haben :

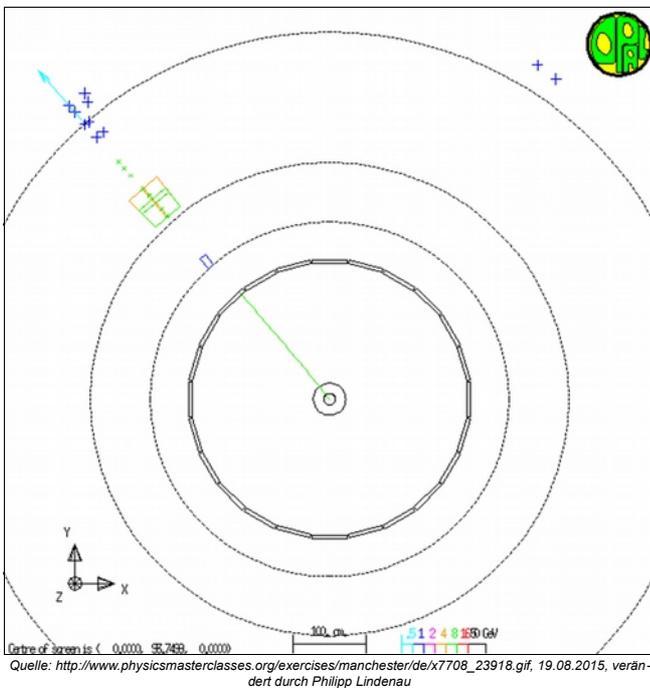
*Myon, Elektron, Photon, elektrisch geladenes Hadron, elektrisch neutrales Hadron, Elektron-Neutrino*



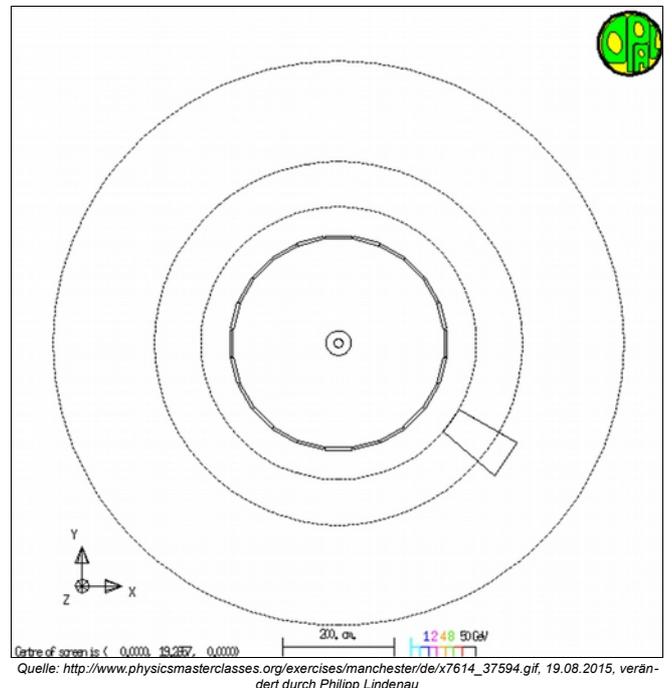
Teilchen: \_\_\_\_\_



Teilchen: \_\_\_\_\_



Teilchen: \_\_\_\_\_

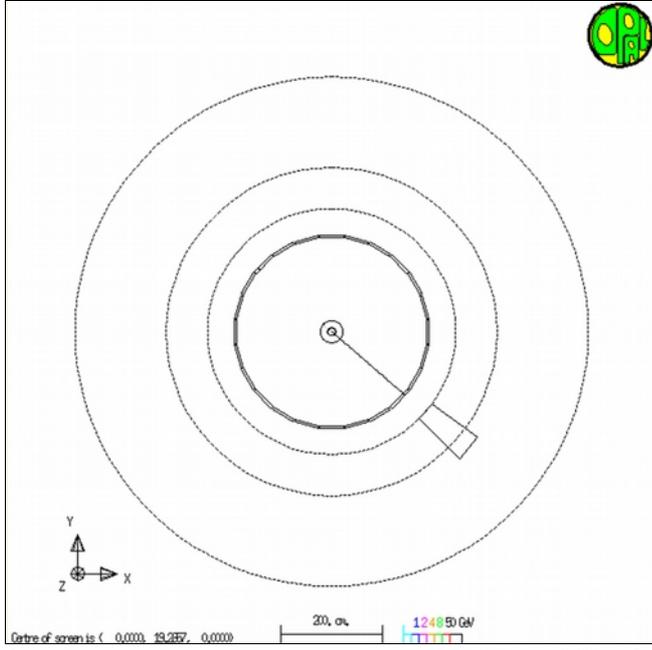


Teilchen: \_\_\_\_\_

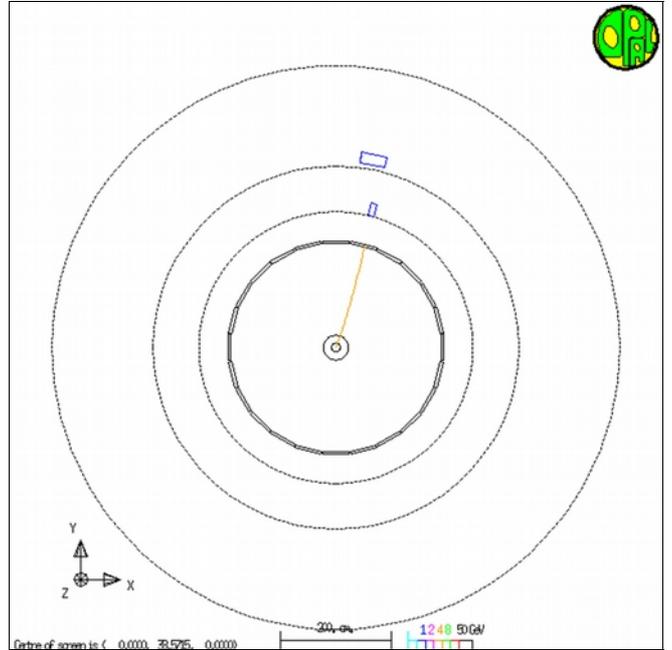
### Identifikation einzelner Teilchen

In den folgenden Abbildungen sind jeweils Signaturen einzelner Teilchen im OPAL-Eventdisplay dargestellt. Ordne den Abbildungen zu, welche der aufgeführten Teilchen die jeweilige Signatur hinterlassen haben:

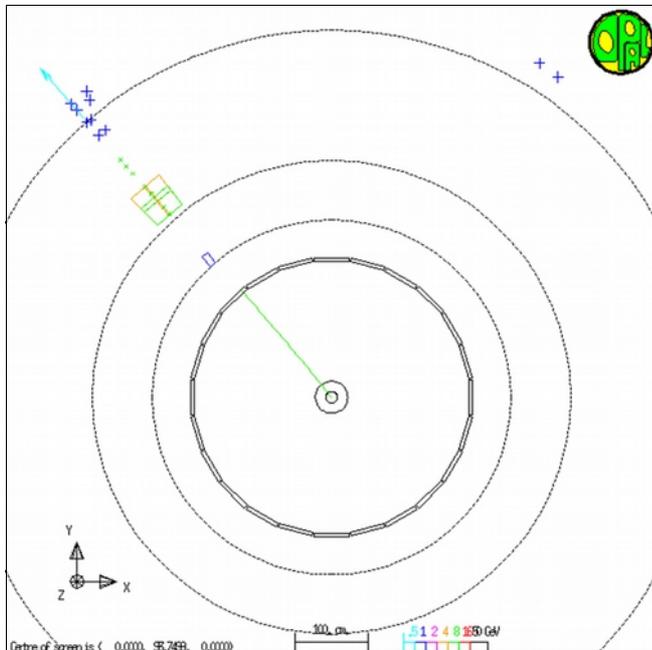
Myon, Elektron, Photon, elektrisch geladenes Hadron, elektrisch neutrales Hadron, Elektron-Neutrino



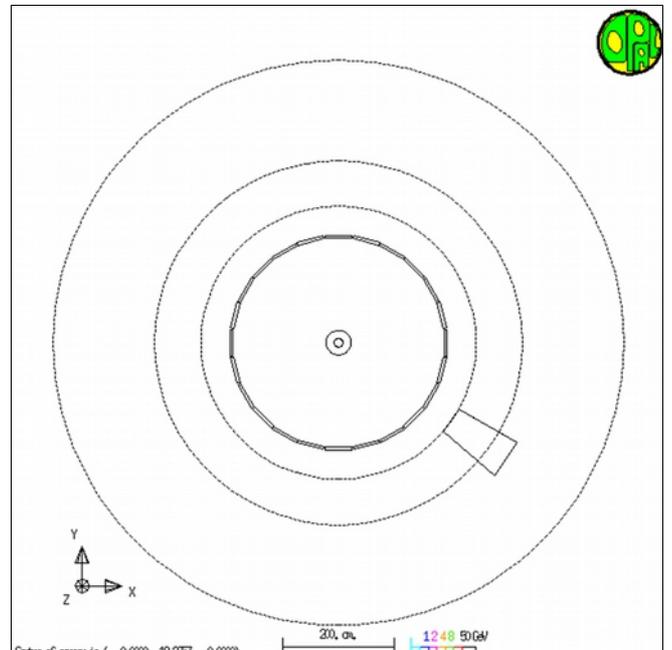
Teilchen: Elektron



Teilchen: elektrisch geladenes Hadron



Teilchen: Myon



Teilchen: Photon

ERWARTUNGSBILD

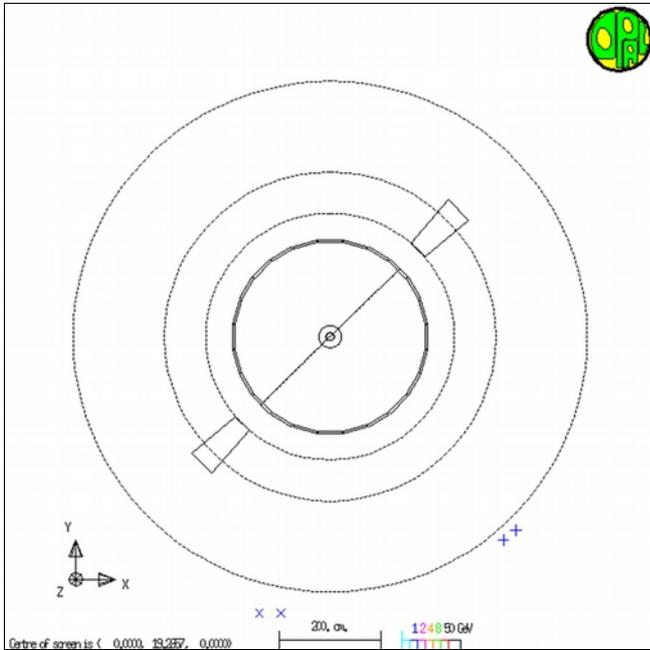
## **A.4 Arbeitsmaterialien: Mysteriöse Einträge**



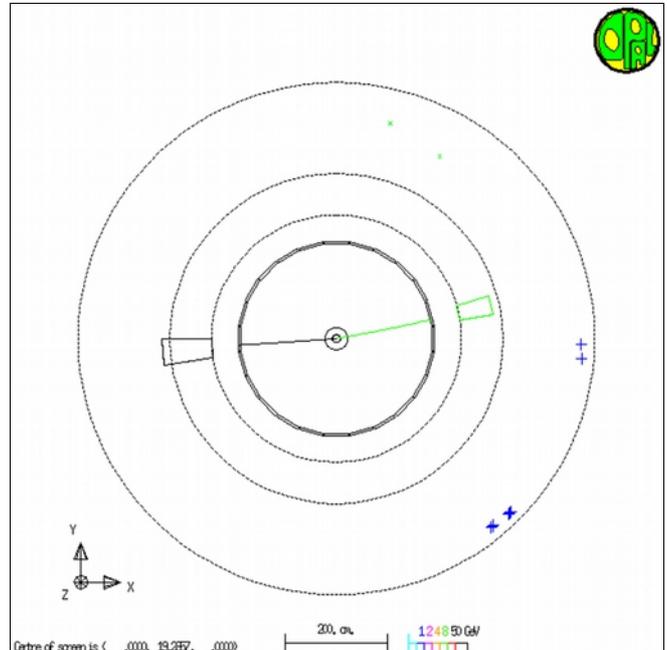
## Mysteriöse Einträge

In den Darstellungen von Ereignissen im OPAL-Eventdisplay sind häufig einzelne Kreuze als Markierungen für Einträge zu sehen, denen kein vom Kollisionspunkt in der Mitte kommendes Anti-/Teilchen zugeordnet werden kann. Man findet sie vor allem in der Myonenkammer (linke Abbildung) und/oder im hadronischen Kalorimeter (rechte Abbildung).

Begründe, warum derartige Einträge an den genannten Stellen nicht von Anti-/Teilchen stammen können, die bei einer Elektron-Positron-Kollision im Inneren des Detektors entstanden sind. Überlege dir anschließend, wodurch solche Einträge verursacht worden sein können.



(Quelle: [http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/e5293\\_16237.gif](http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/e5293_16237.gif), 23.09.2015, verändert durch Philipp Lindenu)



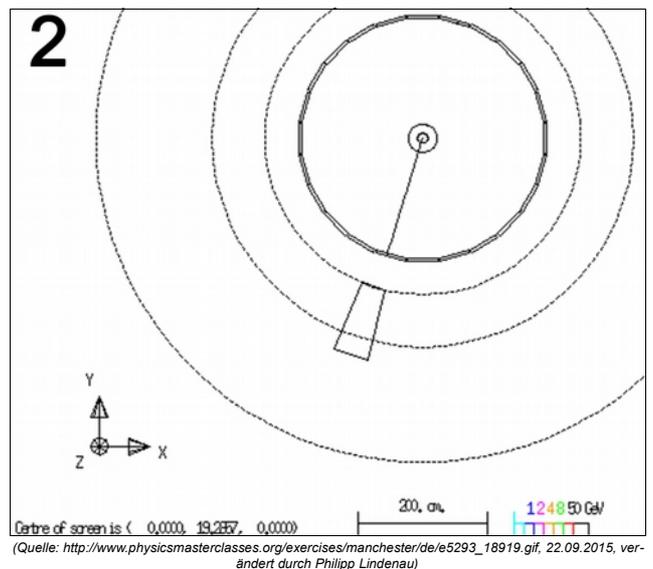
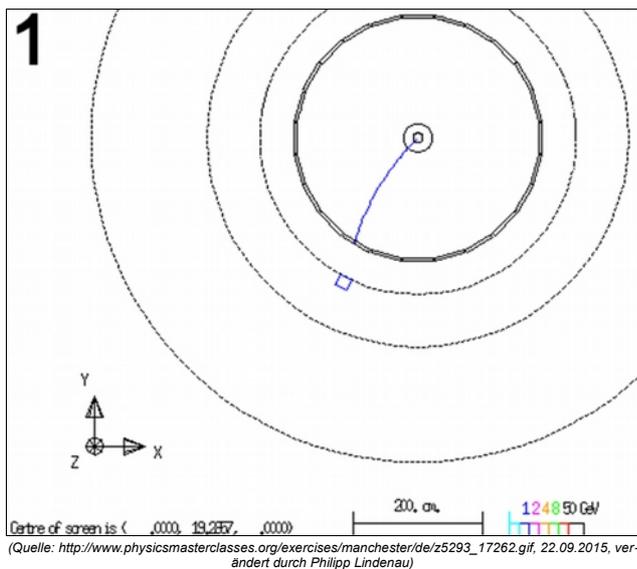
(Quelle: [http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5293\\_20706.gif](http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5293_20706.gif), 23.09.2015, verändert durch Philipp Lindenu)

Da den Einträgen keine Spuren in der Spurkammer zugeordnet werden können, scheiden alle aus der Detektormitte kommenden elektrisch geladenen Anti-/Teilchen als Ursache aus. Daher bleiben nur noch Photonen, elektrisch neutrale Hadronen und Anti-/Neutrinos als mögliche Ursachen der Einträge. Photonen verlieren allerdings ihre komplette Energie im elektromagnetischen Kalorimeter und gelangen daher nicht bis zum hadronischen Kalorimeter, weswegen sie als Ursache ebenfalls ausscheiden. Da keine Energiedepositionen im elektromagnetischen Kalorimeter zu sehen sind, können auch elektrisch neutrale Hadronen als Ursache ausgeschlossen werden, da diese dort Einträge hinterlassen. Anti-/Neutrinos können ebenfalls keine derartigen Einträge hinterlassen, da sie mit dem OPAL-Detektor nicht nachgewiesen werden konnten. Somit sind alle aus der Detektormitte kommenden Anti-/Teilchen als mögliche Ursache ausgeschlossen.

Es existieren mehrere mögliche Ursachen für das Vorhandensein derartiger Einträge:

1. Es handelt sich um elektronisches Rauschen
2. Die Einträge wurden von Anti-/Teilchen hervorgerufen, die von außerhalb in den Detektor gelangt sind. Die wahrscheinlichste Quelle solcher Anti-/Teilchen ist die kosmische Höhenstrahlung.
3. Die Einträge stammen von Anti-/Teilchen, die bei spontanen Umwandlungen der Atomkerne des Detektormaterials (Radioaktivität) erzeugt wurden.

## **A.5 Arbeitsmaterialien: Einflussfaktoren auf die Spurkrümmung**



Die abgebildeten Ausschnitte aus Bildern des OPAL-Eventdisplays zeigen jeweils die Signatur eines einzelnen Anti-/Teilchens.

- a) Nenne jeweils die Komponenten des OPAL-Detektors, in welchen die Anti-/Teilchen Spuren bzw. Einträge hinterlassen haben. Schlussfolgere daraus, welche Anti-/Teilchen die erkennbaren Signaturen jeweils erzeugt haben könnten.

---



---



---

- b) Abgesehen davon, dass sich die ursprüngliche Ausbreitungsrichtung der Anti-/Teilchen unterscheidet, gibt es weitere sichtbare Unterschiede zwischen den Signaturen. Nenne diese und stelle eine Vermutung auf, welcher Zusammenhang zwischen ihnen besteht.

---



---



---



---



---

- b\*) Beweise deine Vermutung. Gehe dabei davon aus, dass sich das Anti-/Teilchen in der x-y-Ebene bewegt haben. Das Magnetfeld war in positiver z-Richtung orientiert.

---



---



---



---



---



---



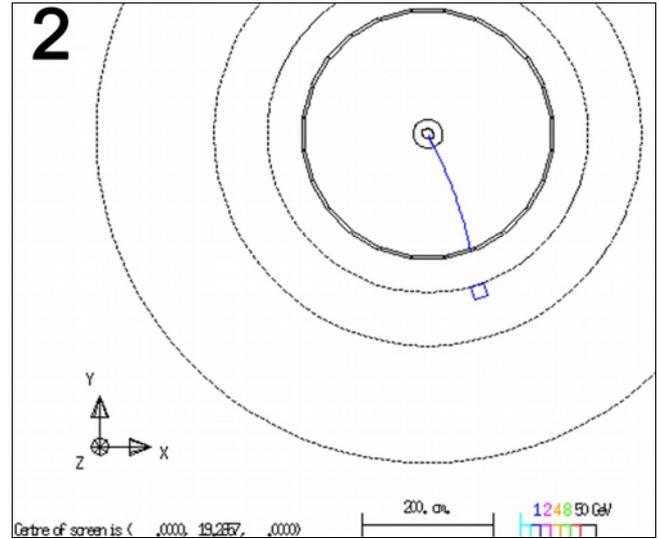
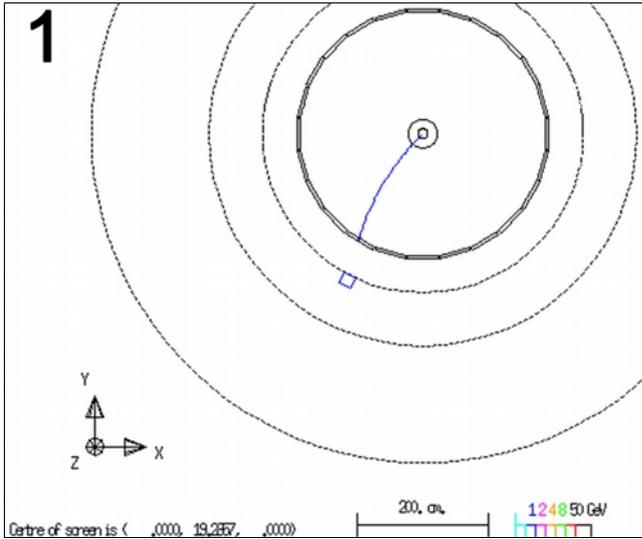
---

Name:

Datum:

c) Entscheide, welche Anti-/Teilchen die Signaturen in den folgenden beiden Abbildungen des OPAL-Eventdisplays erzeugt haben. Begründe jeweils deine Entscheidung.

Hinweis: Das Magnetfeldes zeigt in positive z-Richtung, also aus der Blattebene hinaus



---

---

---

---

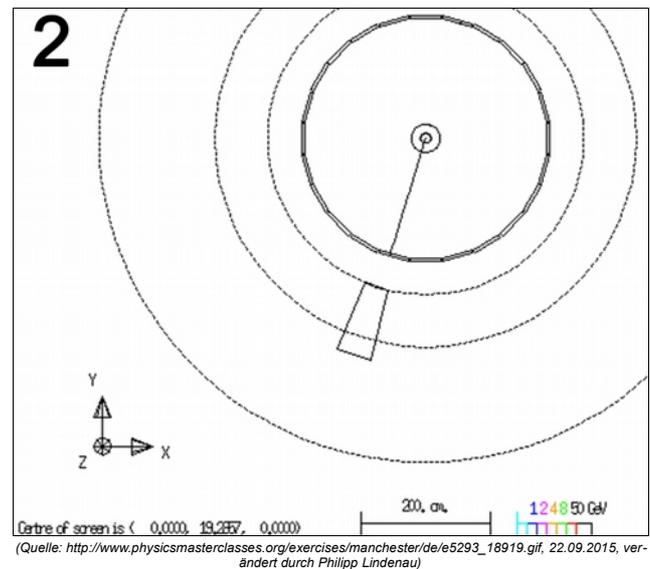
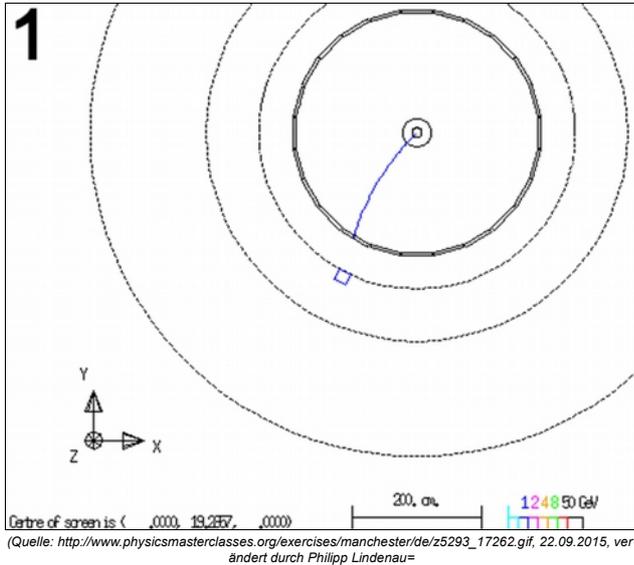
---

---

---

---

## Einflussfaktoren auf die Spurkrümmung



Die abgebildeten Ausschnitte aus Bildern des OPAL-Eventdisplays zeigen jeweils die Signatur eines einzelnen Anti-/Teilchens.

- a) Nenne jeweils die Komponenten des OPAL-Detektors, in welchen die Anti-/Teilchen Spuren bzw. Einträge hinterlassen haben. Schlussfolgere daraus, welche Anti-/Teilchen die erkennbaren Signaturen jeweils erzeugt haben könnten.

**Beide Anti-/Teilchen haben jeweils eine Spur in der Spurkammer und einen Energieeintrag im elektromagnetischen Kalorimeter hinterlassen. Weitere Einträge sind nicht sichtbar. Daher kann es sich in beiden Fällen nur um ein Elektron oder ein Positron handeln.**

- b) Abgesehen davon, dass sich die ursprüngliche Ausbreitungsrichtung der Anti-/Teilchen unterscheidet, gibt es weitere sichtbare Unterschiede zwischen den Signaturen. Nenne diese und stelle eine Vermutung auf, welcher Zusammenhang zwischen ihnen besteht.

**Ein Unterschied besteht im Impuls der Anti-/Teilchen, welchen diese in der Spurkammer besaßen. Bei dem Anti-/Teilchen in Abbildung 1 war dieser im Bereich von  $1-2 \frac{\text{GeV}}{c}$ , während der Impuls des Anti-/Teilchens in Abbildung 2 deutlich größer war. Des Weiteren besteht ein Unterschied in der Krümmung der Spur. Das Anti-/Teilchen in Abbildung 1 beschrieb eine deutliche Linkskurve. Beim Anti-/Teilchen in Abbildung 2 ist keine Krümmung der Spur zu erkennen.**

**Vermutung: Der Krümmungsradius der Spur ist umso kleiner, je geringer der Impuls des Anti-/Teilchens ist.**

- b\*) Beweise deine Vermutung. Gehe dabei davon aus, dass sich das Anti-/Teilchen in der x-y-Ebene bewegt haben. Das Magnetfeld war in positiver z-Richtung orientiert.

**Die Spurkammer des OPAL-Detektors war von einem homogenen Magnetfeld durchsetzt. Deshalb wirkte auf elektrisch geladene Anti-/Teilchen, welche sich mit der Geschwindigkeit  $v$  durch die Spurkammer bewegten, die Lorentzkraft als Zentripetalkraft.**

$$\rightarrow F_L = F_Z$$

$$\rightarrow Q \cdot v \cdot B = \gamma \cdot m \cdot \frac{v^2}{r} \quad (\text{beide Kräfte eingesetzt})$$

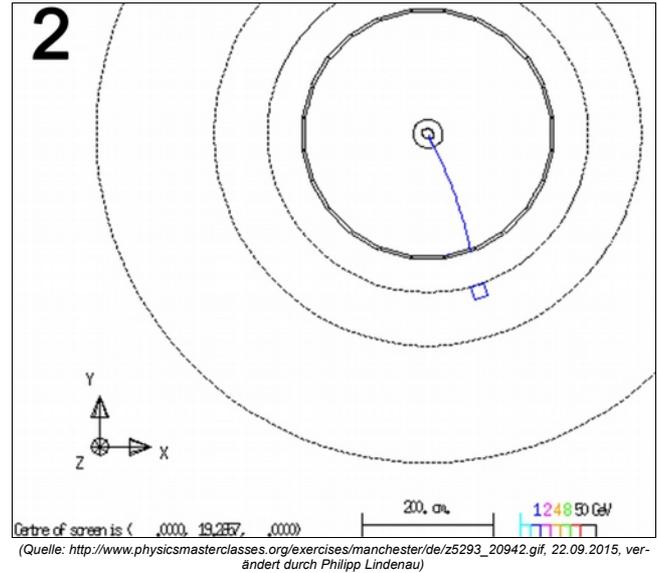
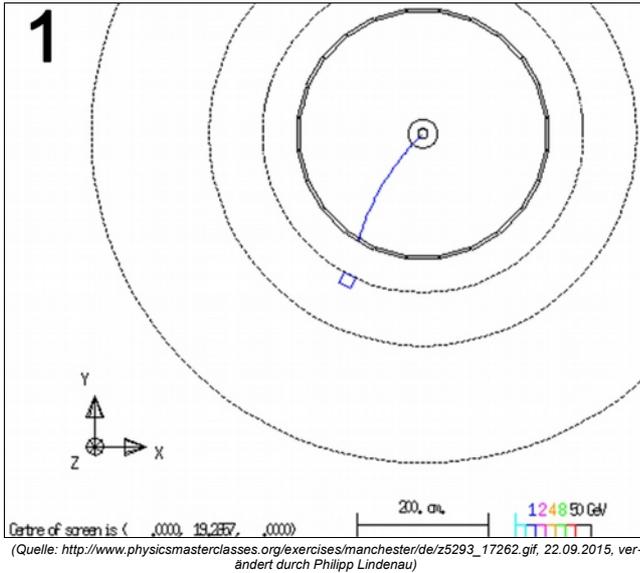
$$\rightarrow r = \frac{\gamma \cdot m \cdot v}{Q \cdot B} \quad (\text{nach dem Krümmungsradius } r \text{ umgestellt})$$

$$\rightarrow r = \frac{p}{Q \cdot B} \quad (\text{die Beziehung } p = \gamma \cdot m \cdot v \text{ genutzt})$$

**Der Krümmungsradius der Spur in der Spurkammer ist also direkt proportional zum Impuls des Anti-/Teilchens.**

- c) Entscheide, welche Anti-/Teilchen die Signaturen in den folgenden beiden Abbildungen des OPAL-Eventdisplays erzeugt haben. Begründe jeweils deine Entscheidung.

Hinweis: Das Magnetfeldes zeigt in positive z-Richtung, also aus der Blattebene hinaus



Durch Anwendung der „Rechte-Hand-Regel“ folgt, dass die nach links gekrümmte Spur in Abbildung 1 von einem elektrisch negativ geladenen Teilchen erzeugt wurde. Somit muss es sich um die Signatur eines Elektrons handeln. Analog folgt, dass die Signatur in Abbildung 2 von einem Positron erzeugt wurde, da die Spur nach rechts gekrümmt ist, was auf eine positive elektrische Ladung schließen lässt.

**A.6 Arbeitsmaterialien:  
Identifikation möglicher Umwandlungskanäle des Z-Teilchens**



Name:

Datum:

2. Entscheide, welche der folgenden Umwandlungen des Z-Teilchens möglich sind. Im Fall der Unmöglichkeit gib dafür eine Begründung an.

a)  $Z \rightarrow e^+ + e^-$

---

---

---

b)  $Z \rightarrow b^{\downarrow} + \bar{b}^{\uparrow}$

---

---

---

c)  $Z \rightarrow \gamma + \gamma$

---

---

---

d)  $Z \rightarrow \bar{t}^{\uparrow} + t^{\downarrow}$

---

---

---

e)  $Z \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_{\mu}$

---

---

---

f)  $Z \rightarrow u^{\downarrow} + d^{\uparrow}$

---

---

---

	Masse in $\frac{\text{GeV}}{c^2}$	Elektrische Ladungszahl	Schwache Ladungszahl	Starker Farbladungsvektor
Z				

a)

$e^+$				
$e^-$				
$e^+ + e^-$				

b)

$t$				
$\bar{t}$				
$t + \bar{t}$				

c)

$\gamma$				
$\gamma + \gamma$				

d)

$b$				
$\bar{b}$				
$b + \bar{b}$				

e)

$\mu^-$				
$\bar{\nu}_\mu$				
$\mu^- + \bar{\nu}_\mu$				

f)

$u$				
$d$				
$u + d$				

	Masse in $\frac{\text{GeV}}{c^2}$	Elektrische Ladungszahl	Schwache Ladungszahl	Starker Farbladungsvektor
Z	91,2	0	0	$\vec{0}$

a)

$e^+$	$0.5 \cdot 10^{-3}$	+1	$+\frac{1}{2}$	$\vec{0}$
$e^-$	$0.5 \cdot 10^{-3}$	-1	$-\frac{1}{2}$	$\vec{0}$
$e^+ + e^-$				

b)

$t$	173	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{2}$	$\vec{\phantom{0}}$
$\bar{t}$	173	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{2}$	$\vec{\phantom{0}}$
$t + \bar{t}$				

c)

$\gamma$	0	0	0	$\vec{0}$
$\gamma + \gamma$				

d)

$b$	4,2	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{2}$	$\downarrow$
$\bar{b}$	4,2	$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{2}$	$\uparrow$
$b + \bar{b}$				

e)

$\mu^-$	0,1	-1	$-\frac{1}{2}$	$\vec{0}$
$\bar{\nu}_\mu$	$< 2 \cdot 10^{-9}$	0	$-\frac{1}{2}$	$\vec{0}$
$\mu^- + \bar{\nu}_\mu$				

f)

$u$	$2 \cdot 10^{-3}$	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{2}$	$\downarrow$
$d$	$5 \cdot 10^{-3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{2}$	$\rightarrow$
$u + d$				

## Identifikation möglicher Umwandlungskanäle des Z-Teilchens

Während der ersten Betriebsphase des Large Electron-Positron Colliders („LEP1“, 1989-1995) wurden Elektronen und Positronen bei einer Kollisionsenergie im Bereich der Masse des Z-Teilchens (etwa  $91 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ ) zur Kollision gebracht. Dabei wurden insgesamt über 20 Millionen Z-Teilchen erzeugt. Diese sehr kurzlebigen Teilchen wandeln sich allerdings nahezu sofort in verschiedene andere Teilchen um.

1. Notiere dir bekannte Kriterien bzw. Anforderungen an die Umwandlungsprodukte, welche erfüllt sein müssen, damit eine Umwandlung des Z-Teilchens in diese Anti-/Teilchen möglich ist.
  - **Die Summe der Massen der Umwandlungsprodukte darf nicht größer sein als die Masse des Z-Teilchens.**
  - **Elektrische, schwache und starke Ladung müssen bei der Umwandlung erhalten bleiben. Die Summe der entsprechenden Ladungen der Umwandlungsprodukte muss also der entsprechenden Ladung des Z-Teilchens entsprechen.**
  - **Die Umwandlungsprodukte müssen eine elektrische und/oder schwache Ladung besitzen, da das Z-Teilchen an diese Ladungen koppelt.**

### Zusätzliche Kriterien:

- **Bei einer Umwandlung des Z-Teilchens entstehen immer genau zwei Anti-/Teilchen.**
- **Die Umwandlung des Z-Teilchens darf nicht im Widerspruch zu den Dupletts der schwachen Ladung stehen.**

2. Entscheide, welche der folgenden Umwandlungen des Z-Teilchens möglich sind. Im Fall der Unmöglichkeit gib dafür eine Begründung an.

a)  $Z \rightarrow e^+ + e^-$

Diese Umwandlung ist möglich.

b)  $Z \rightarrow t + \bar{t}$

Diese Umwandlung ist nicht möglich, da sowohl Top- als auch Anti-Top-Quark eine größere Masse als das Z-Teilchen besitzen. Die Summe der Massen der beiden entstandenen Quarks ist also größer als die Masse des Z-Teilchens.

c)  $Z \rightarrow \gamma + \gamma$

Diese Umwandlung ist nicht möglich, da Photonen weder eine schwache noch eine elektrische Ladung besitzen und das Z-Teilchen daher nicht an diese koppeln kann.

d)  $Z \rightarrow b + \bar{b}$

Diese Umwandlung ist möglich.

e)  $Z \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

Diese Umwandlung ist nicht möglich, da sowohl die elektrische als auch die schwache Ladung nicht erhalten sind. Die Summe der elektrischen und die Summe der schwachen Ladungszahlen der Umwandlungsprodukte beträgt jeweils -1, während das Z-Teilchen weder eine elektrische noch eine schwache Ladung besitzt.

f)  $Z \rightarrow u + d$

Diese Umwandlung ist nicht möglich. Zum einen ist die starke Ladung nicht erhalten, da sich die starken Farbladungsvektoren der Umwandlungsprodukte nicht zum Nullvektor addieren. Zum anderen ist die elektrische Ladung nicht erhalten, da die Summe der elektrischen Ladungszahlen bei den Umwandlungsprodukten  $\frac{1}{3}$  beträgt. Das Z-Teilchen ist allerdings elektrisch neutral und farbneutral bezüglich der starken Ladung.

	Masse in $\frac{\text{GeV}}{c^2}$	Elektrische Ladungszahl	Schwache Ladungszahl	Starker Farbladungsvektor
Z	91,2	0	0	$\vec{0}$

a)

$e^+$	$0.5 \cdot 10^{-3}$	+1	$+\frac{1}{2}$	$\vec{0}$
$e^-$	$0.5 \cdot 10^{-3}$	-1	$-\frac{1}{2}$	$\vec{0}$
$e^+ + e^-$	$1 \cdot 10^{-3}$	0	0	$\vec{0}$

b)

$t^{\rightarrow}$	173	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{2}$	$\rightarrow$
$\bar{t}^{\leftarrow}$	173	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{2}$	$\leftarrow$
$t^{\rightarrow} + \bar{t}^{\leftarrow}$	346	0	0	$\rightarrow + \leftarrow = \vec{0}$

c)

$\gamma$	0	0	0	$\vec{0}$
$\gamma + \gamma$	0	0	0	$\vec{0}$

d)

$b^{\downarrow}$	4,2	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{2}$	$\downarrow$
$\bar{b}^{\uparrow}$	4,2	$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{2}$	$\uparrow$
$b^{\downarrow} + \bar{b}^{\uparrow}$	8,4	0	0	$\downarrow + \uparrow = \vec{0}$

e)

$\mu^-$	0,1	-1	$-\frac{1}{2}$	$\vec{0}$
$\bar{\nu}_\mu$	$< 2 \cdot 10^{-9}$	0	$-\frac{1}{2}$	$\vec{0}$
$\mu^- + \bar{\nu}_\mu$	0,1	-1	-1	$\vec{0}$

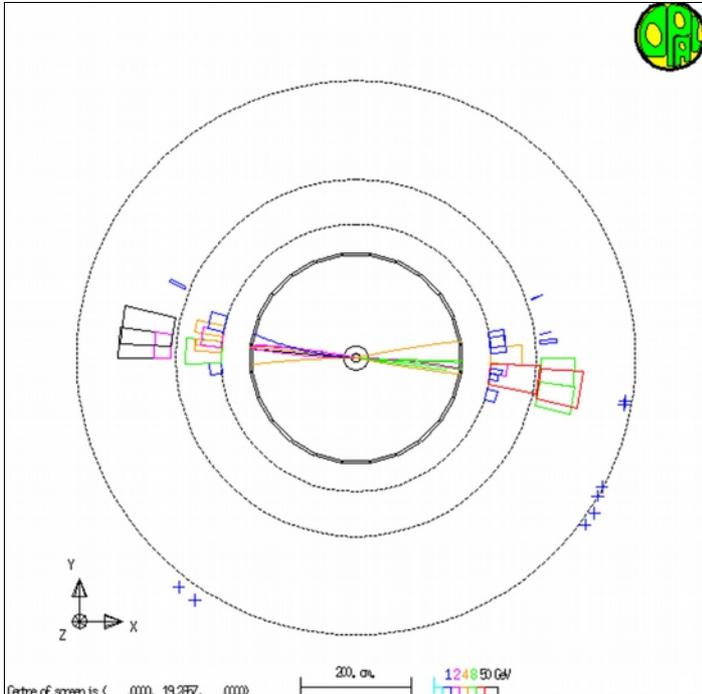
f)

$u^{\downarrow}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{2}$	$\downarrow$
$d^{\rightarrow}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{2}$	$\rightarrow$
$u^{\downarrow} + d^{\rightarrow}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$+\frac{1}{3}$	0	$\downarrow + \rightarrow = \rightarrow$

## **A.7 Arbeitsmaterialien: Die Entstehung von Jets**

## Die Entstehung von Jets

Bei der Umwandlung eines Z-Teilchens entsteht mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 70 Prozent ein Quark-Anti-Quark-Paar. Die Abbildung zeigt ein derartiges Ereignis im OPAL-Eventdisplay. Es ist eine Vielzahl von Spuren und Energieeinträgen in den Kalorimetern zu erkennen. Doch wie kann das sein, wenn bei der Umwandlung des Z-Teilchens lediglich ein Quark und ein Anti-Quark entstanden sind?



Centre of screen is ( 000, 19,287, 000) 1248 50 GeV  
 (Quelle: [http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5293\\_54644.gif](http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5293_54644.gif), 27.09.2015, verändert durch Philipp Lindenau)

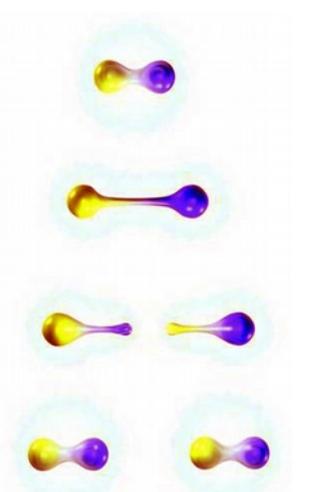
Die starke Wechselwirkung, welche unter anderem dafür verantwortlich ist, dass sich Quarks zu Hadronen binden und diese wiederum Atomkerne bilden, besitzt eine besondere Eigenschaft. Die von ihr hervorgerufene Kraftwirkung zwischen Anti-/Quarks wird mit wachsendem Abstand nicht immer kleiner, wie es zum Beispiel bei der elektromagnetischen Wechselwirkung der Fall ist. Stattdessen bleibt sie ab einem Abstand von etwa 1 fm (das entspricht etwa dem Radius von Protonen und Neutronen) annähernd konstant. Dies hat zur Folge, dass die potentielle Energie der Quarks sehr stark anwächst, wenn sich diese voneinander entfernen, wie es nach deren Erzeugung am Large Electron-Positron Collider (LEP) der Fall war. Diese potentielle Energie reicht spätestens ab einem Abstand von 2 fm aus, um ein neues Anti-/Quark zu erzeugen. Dieser Vorgang ist in der Abbildung unten rechts veranschaulicht.

Der beschriebene Prozess wiederholt sich bei den in Kollisionsexperimenten erzeugten Anti-/Quarks sehr oft, da diese sehr große kinetische Energien besitzen. Nachdem eine Vielzahl von Anti-/Quarks entstanden ist, binden sich diese schließlich zu Hadronen, die sich in Form sogenannter *Jets* etwa in die gleiche Richtung bewegen, wie das ursprünglich bei der Z-Umwandlung entstandene Anti-/Quark.

Mitunter bilden sich instabile Hadronen (z.B. Pionen), die sich selbst wieder umwandeln. Dabei kann es zur Entstehung von Leptonen und Photonen kommen, welche dann ebenfalls in den Jets zu finden sind. Den gesamten beschriebenen Prozess nennt man *Hadronisierung*. Die Tatsache, dass sich Anti-/Quarks nicht isolieren lassen, wird als Quark-Einschluss bzw. *Confinement* (engl. für Gefangenschaft) bezeichnet.

**Ereignisse, bei denen ein Quark-Anti-Quark-Paar entstanden ist, lassen sich also sehr einfach von anderen Umwandlungen des Z-Teilchens unterscheiden, da dabei stets Jets aus vielen Anti-/Teilchen entstehen.**

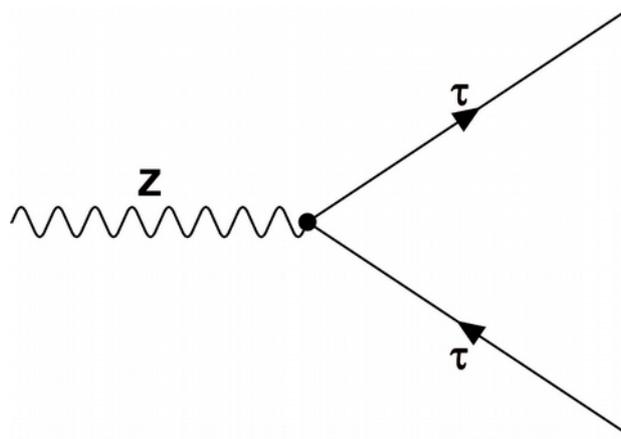
Da Gluonen (die Botenteilchen der starken Wechselwirkung) genau wie die Anti-/Quarks stark geladen sind, können auch sie nicht isoliert existieren. Einzelne Gluonen erzeugen ebenfalls Jets, welche im Eventdisplay sichtbar sind und sich schwer von den Jets der Anti-/Quarks unterscheiden lassen.



(Quelle: Netzwerk Teilchenwelt (2015). Unterrichtsmaterial zur Teilchenphysik, verändert durch Philipp Lindenau)

**A.8 Arbeitsmaterialien:  
Umwandlungen des Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar**

## Umwandlungen des Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar



Bei der Umwandlung eines Z-Teilchens kann ein Tauon-Anti-Tauon-Paar entstehen. Dieser Prozess ist im obigen Feynman-Diagramm dargestellt. Tauonen und Anti-Tauonen konnten mit dem OPAL-Detektor nicht direkt nachgewiesen werden, da diese Anti-/Teilchen eine sehr kurze mittlere Lebensdauer ( $\sim 10^{-13}$  Sekunden) besitzen und sich daher unmittelbar nach ihrer Entstehung in andere Anti-/Teilchen umwandeln. Dafür gibt es jeweils eine Vielzahl unterschiedlicher Möglichkeiten.

In der nachfolgenden Tabelle sind die wahrscheinlichsten Kombinationen von Anti-/Teilchen angegeben, die nach der Umwandlung eines Anti-/Tauons auftreten können. Mitunter entstehen bei der Umwandlung eines Anti-/Tauons instabile Hadronen, die sich sofort wieder umwandeln. In der Tabelle sind lediglich die finalen Umwandlungsprodukte angegeben, deren Signaturen schließlich im OPAL-Detektor beobachtet werden konnten.

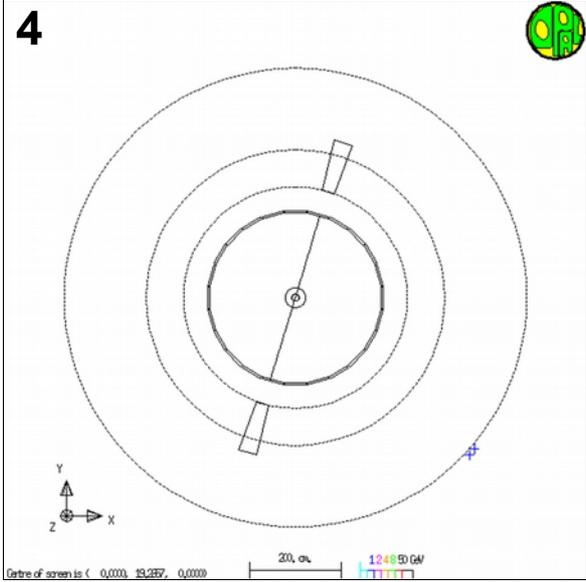
Umwandlungsprodukte des Tauons	Umwandlungsprodukte des Anti-Tauons
• $\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$	• $\tau^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\tau$
• $\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$	• $\tau^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu + \bar{\nu}_\tau$
• $\tau^- \rightarrow h^- + \nu_\tau + x\gamma$	• $\tau^+ \rightarrow h^+ + \bar{\nu}_\tau + x\gamma$
• $\tau^- \rightarrow h^- + h^+ + h^- + \nu_\tau + x\gamma$	• $\tau^+ \rightarrow h^+ + h^- + h^+ + \bar{\nu}_\tau + x\gamma$

Dabei bezeichnen  $h^+$  bzw.  $h^-$  elektrisch positiv bzw. elektrisch negativ geladene Hadronen und  $x\gamma$  symbolisiert eine beliebige Anzahl an Photonen (Es müssen allerdings keine Photonen entstehen). Die Umwandlungskanäle des Anti-Tauons erhält man aus denen des Tauons, indem man alle Teilchen durch ihre Anti-Teilchen ersetzt und umgekehrt.

Es entsteht in jedem Fall mindestens ein Anti-/Neutrino. Diese Anti-/Teilchen konnten mit dem OPAL-Detektor nicht nachgewiesen werden. Allerdings kann auf ihre Entstehung unter anderem dadurch geschlossen werden, dass die übrigen Umwandlungsprodukte zusammen nicht die komplette zur Verfügung stehende Kollisionsenergie besitzen. Dies kann man oft an den Farben der Signaturen im OPAL-Eventdisplay erkennen.

Die Umwandlungen des Tauons und des Anti-Tauons sind unabhängig voneinander. Daher können nach der Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar alle möglichen Kombinationen aus Tauon- und Anti-Tauon-Umwandlungsprodukten auftreten





(Quelle: [http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/e5293\\_18919.gif](http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/e5293_18919.gif), 27.09.2015, verändert durch Philipp Lindenau)

---

---

---

---

---

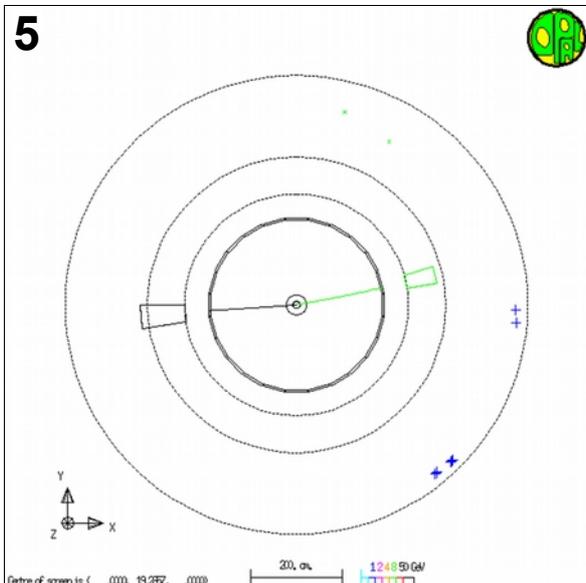
---

---

---

---

---



(Quelle: [http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5293\\_20706.gif](http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5293_20706.gif), 27.09.2015, verändert durch Philipp Lindenau)

---

---

---

---

---

---

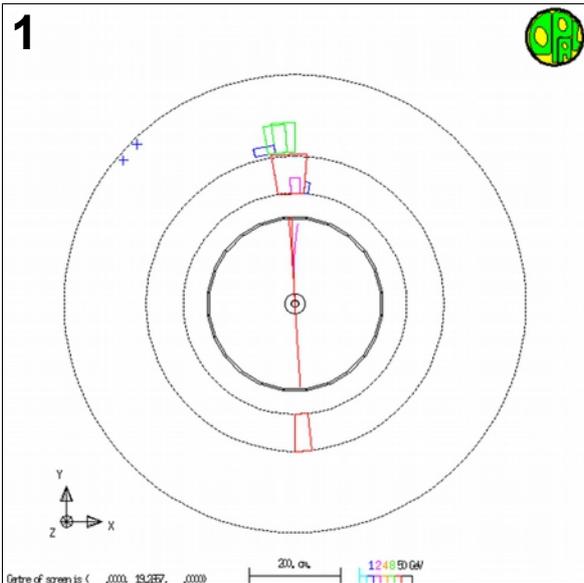
---

---

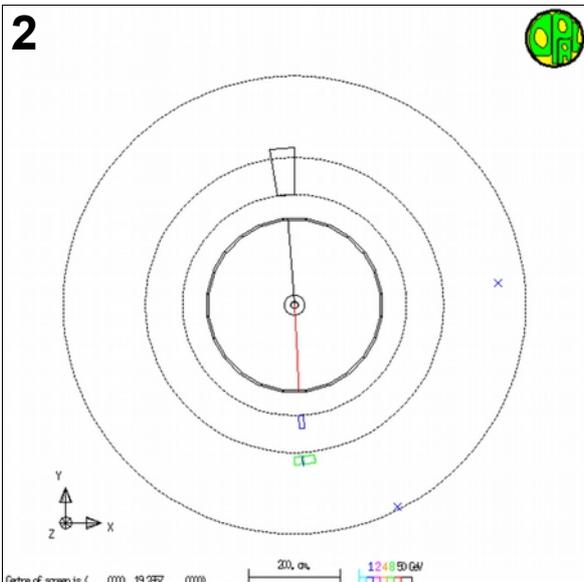
---

---

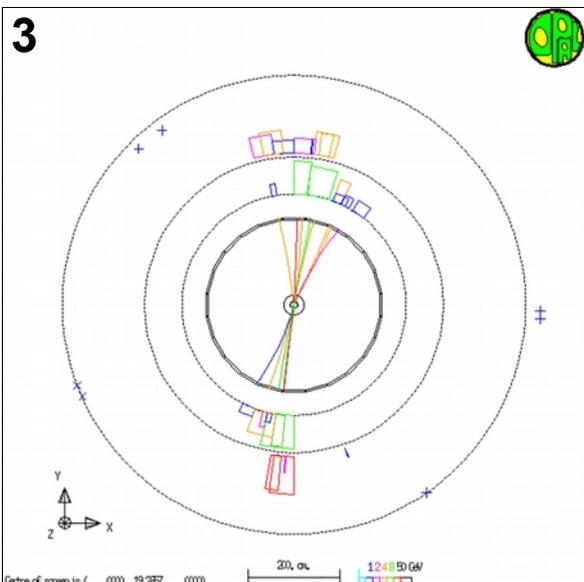
Die folgenden Abbildungen des OPAL-Eventdisplays zeigen die Signaturen von Anti-/Teilchen, die nach der Umwandlung eines Z-Teilchens im OPAL-Detektor registriert wurden. Entscheide jeweils, ob die Signaturen eindeutig auf eine Umwandlung des Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar schließen lassen. Begründe deine Entscheidung.



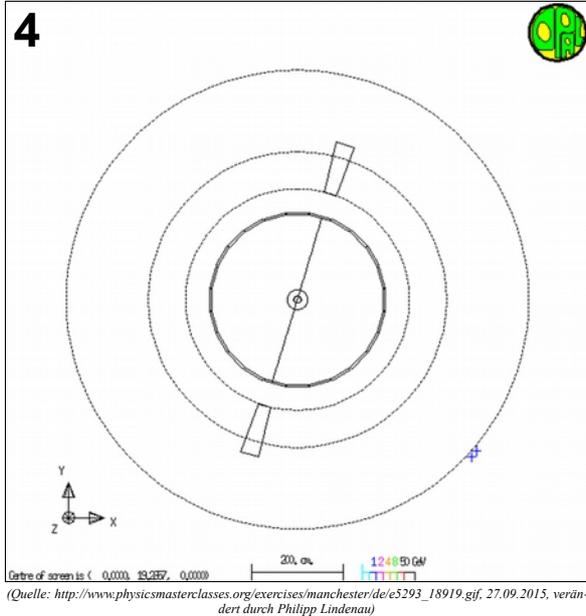
Ausgehend vom Kollisionspunkt im Zentrum sind in positiver y-Richtung drei dicht beieinanderliegende Spuren in der Spurkammer zu erkennen. Die Einträge in den Kalorimetern lassen darauf schließen, dass es sich bei den erzeugenden Anti-/Teilchen um elektrisch geladene Hadronen gehandelt hat. Es hat also eine Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar stattgefunden.



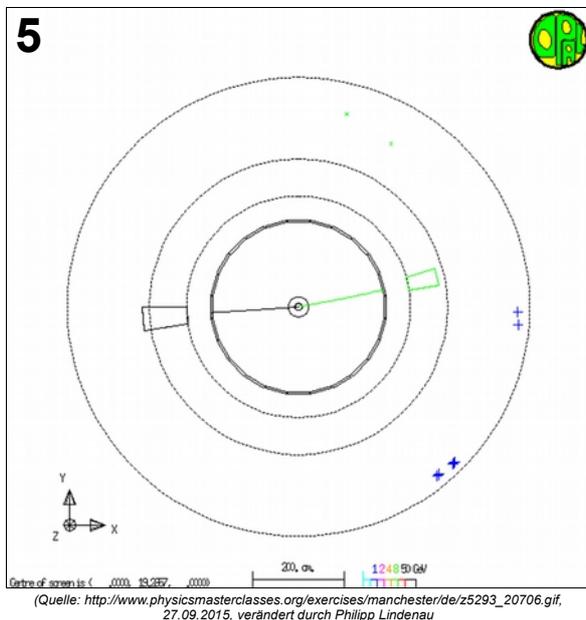
Es ist die Signatur eines einzelnen geladenen Hadrons und eines Elektrons oder Positrons zu erkennen. Diese Kombination ist nur möglich, wenn es sich um eine Umwandlung des Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar gehandelt hat.



Es sind zwei Jets mit einer Vielzahl von Spuren zu erkennen. Dies lässt auf die Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Quark-Anti-Quark-Paar schließen. Es handelt sich demnach nicht um eine Umwandlung in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar



Beide sichtbaren Signaturen können jeweils von einem Elektron oder einem Positron stammen. Demnach muss es sich um ein Elektron-Positron-Paar handeln. Dieses kann durch die Umwandlung eines Tauon-Anti-Tauon-Paares aber auch durch direkte Umwandlung eines Z-Teilchens entstanden sein. Eine eindeutige Zuordnung ist nicht möglich.



Es ist die Signatur eines Elektron-Positron-Paares zu sehen. Eines der beiden Anti-/Teilchen besaß einen geringen Impuls. Dies lässt darauf schließen, dass weitere Anti-/Teilchen entstanden sind, welche den fehlenden Impulsbetrag besaßen. Da keine weiteren Signaturen erkennbar sind, muss es sich bei diesen Anti-/Teilchen um Anti-/Neutrinos gehandelt haben. Die Entstehung von Anti-/Neutrinos ist auch daran erkennbar, dass sich Elektron und Positron nicht in exakt entgegengesetzter Richtung fortbewegt haben. Ohne zusätzliche Anti-/Neutrinos wäre also die Impulserhaltung verletzt.

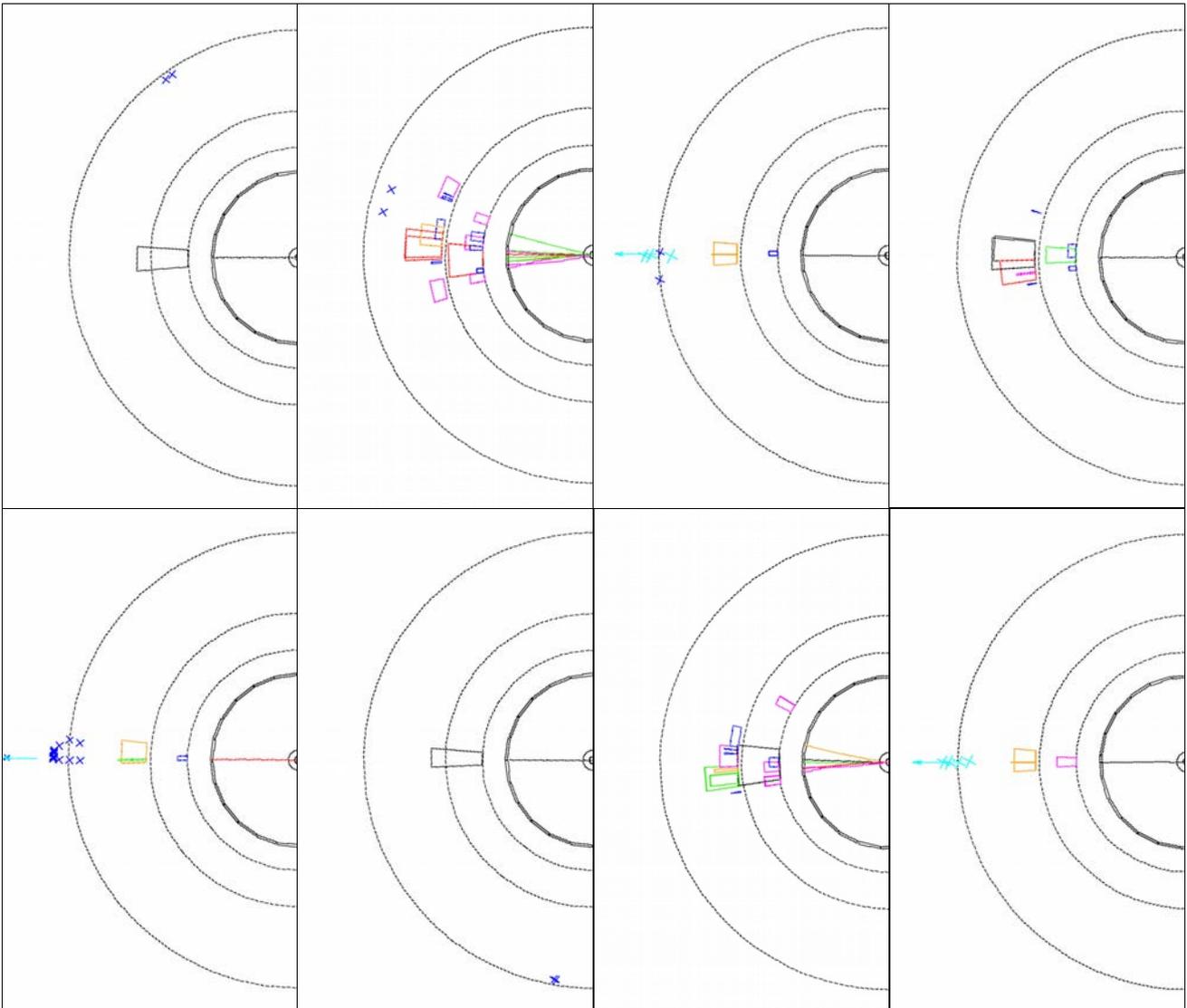
Es muss sich also um eine Umwandlung des Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar gehandelt haben, da nur bei einer solchen Umwandlung ein Elektron-Positron-Paar mit zusätzlichen Anti-/Neutrinos entstehen kann.

## **A.9 Arbeitsmaterialien: Komplexe Übung zur Umwandlung von Z-Teilchen**

## Komplexe Übung zur Umwandlung von Z-Teilchen

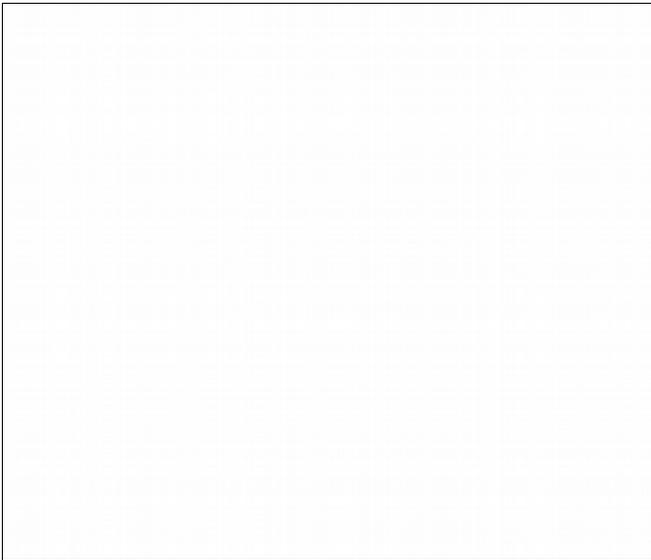
Die folgenden Abbildungen zeigen jeweils die Hälfte der Darstellung eines Ereignisses im OPAL-Eventdisplay. Bei den insgesamt vier Ereignissen handelte es sich um Umwandlungen von Z-Teilchen, wobei **jeweils ein anderer Umwandlungskanal** realisiert wurde.

Schneide die Abbildungen aus und füge sie zu vollständigen Darstellungen dieser Ereignisse zusammen. Klebe diese in die Felder auf dem beiliegenden Arbeitsblatt und zeichne unter die Abbildungen jeweils ein Feynman-Diagramm des zugehörigen Umwandlungskanals.

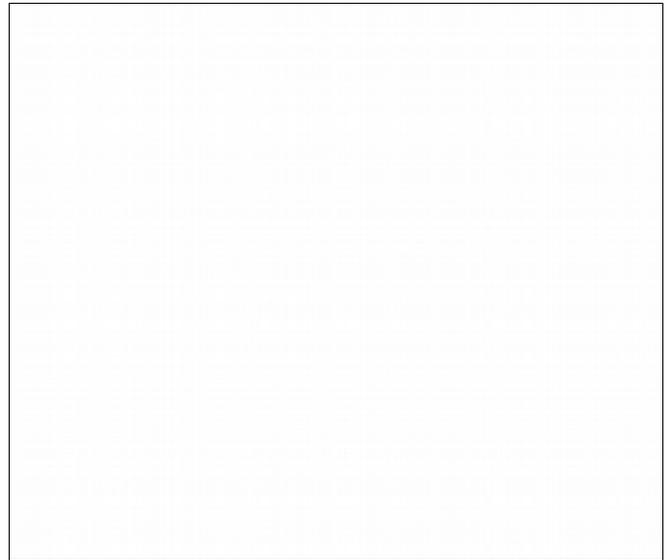


Name:

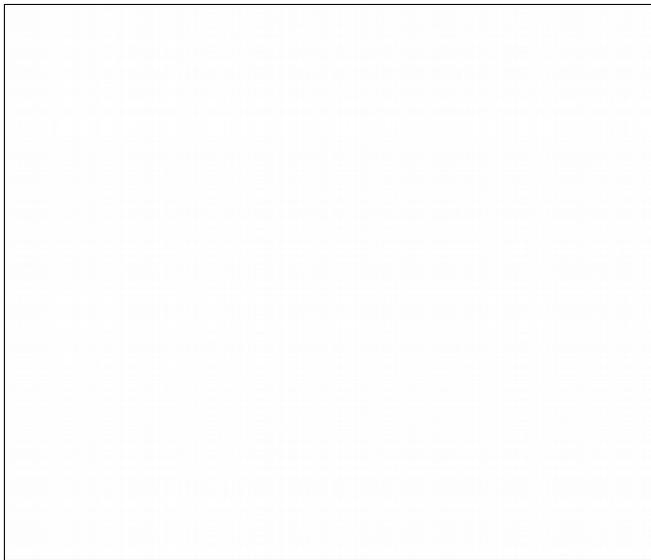
Datum:



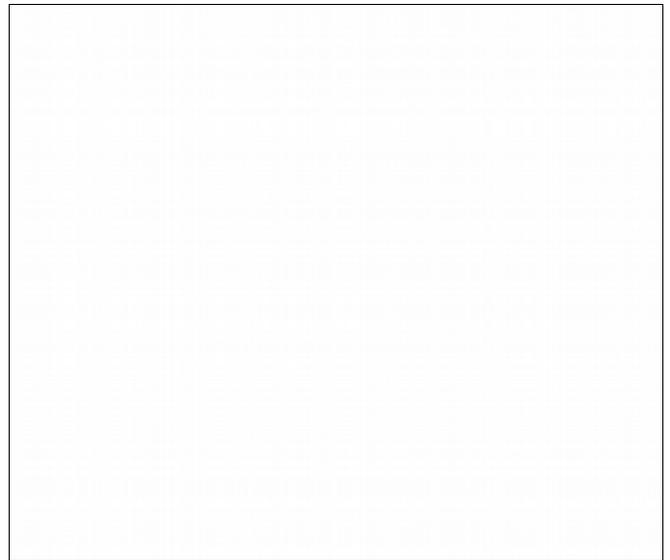
Feynman-Diagramm:



Feynman-Diagramm:



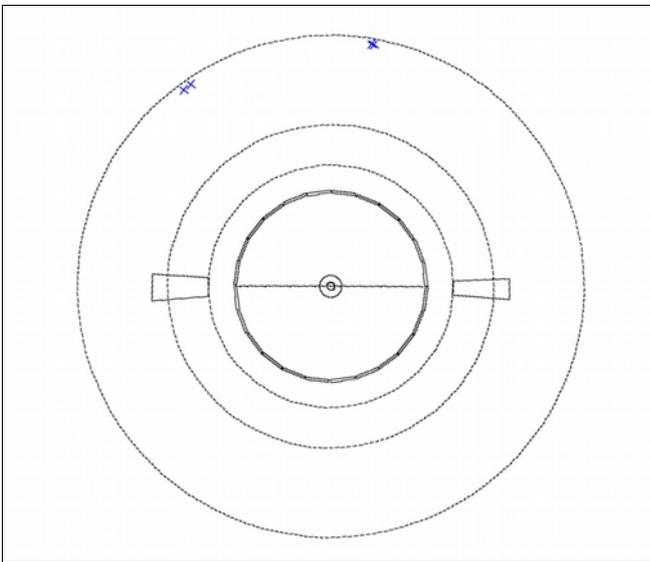
Feynman-Diagramm:



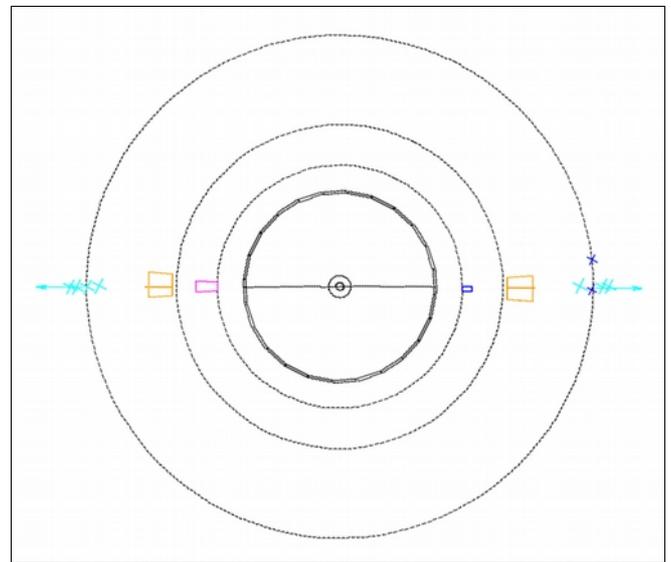
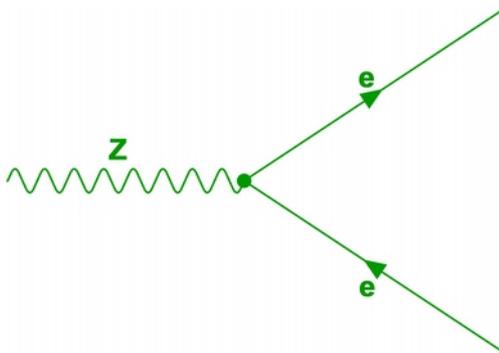
Feynman-Diagramm

Name:

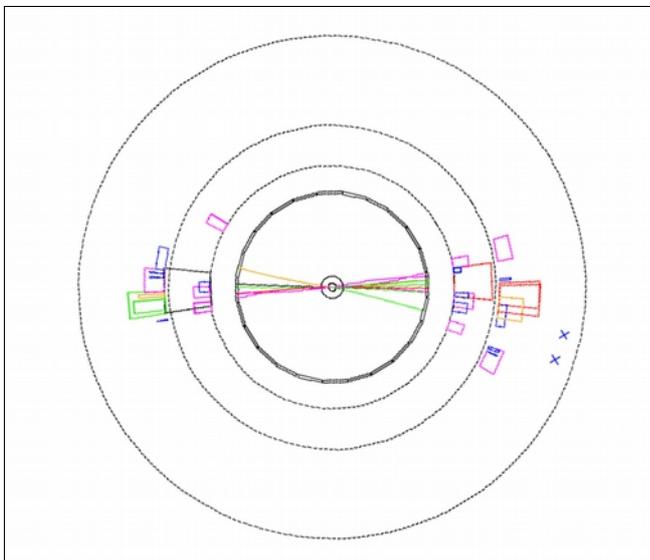
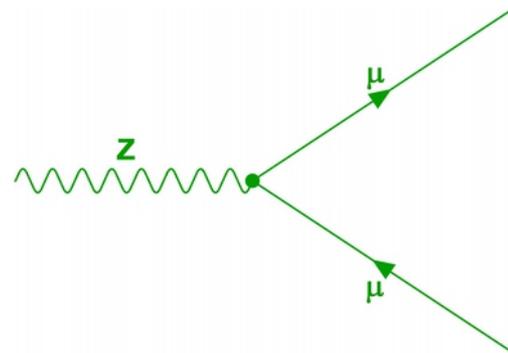
Datum:



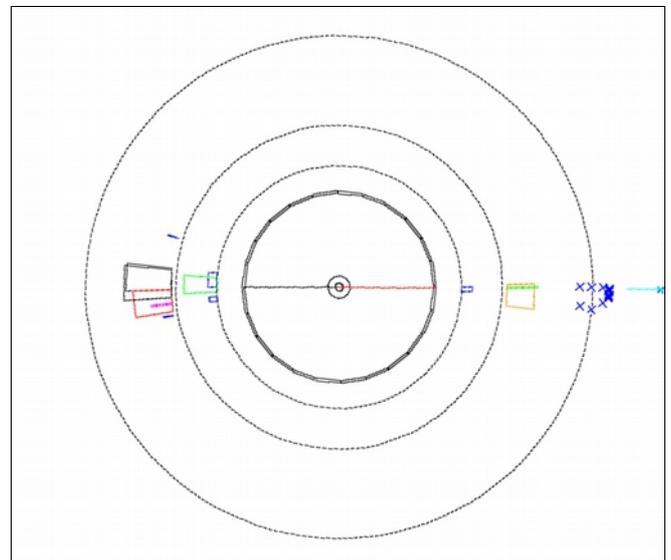
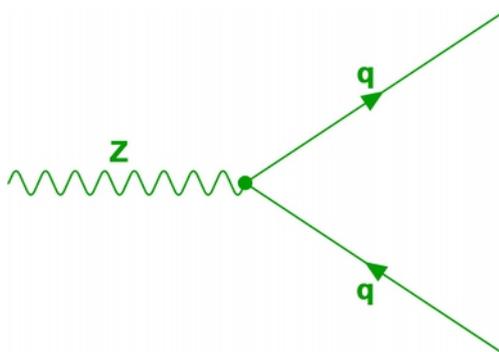
Feynman-Diagramm:



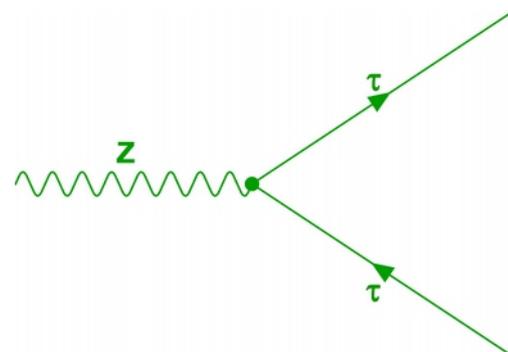
Feynman-Diagramm:



Feynman-Diagramm:



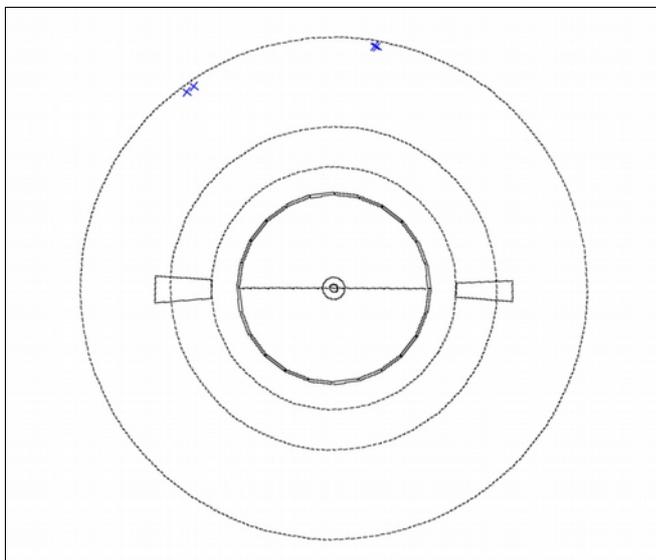
Feynman-Diagramm:



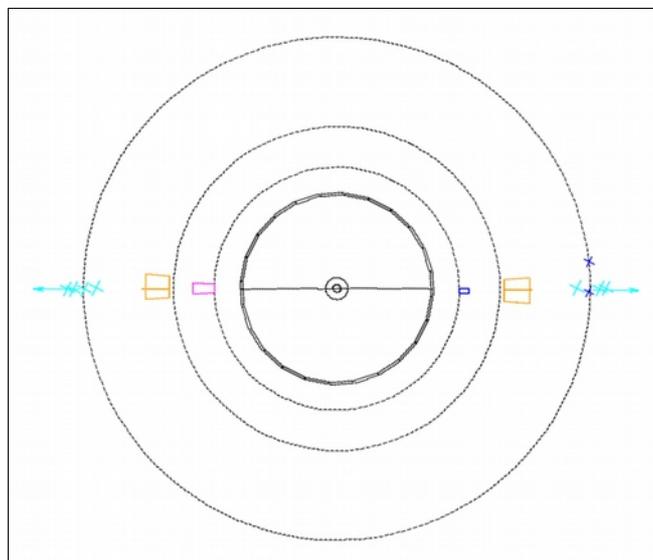
ERWARTUNGSBILD

Name:

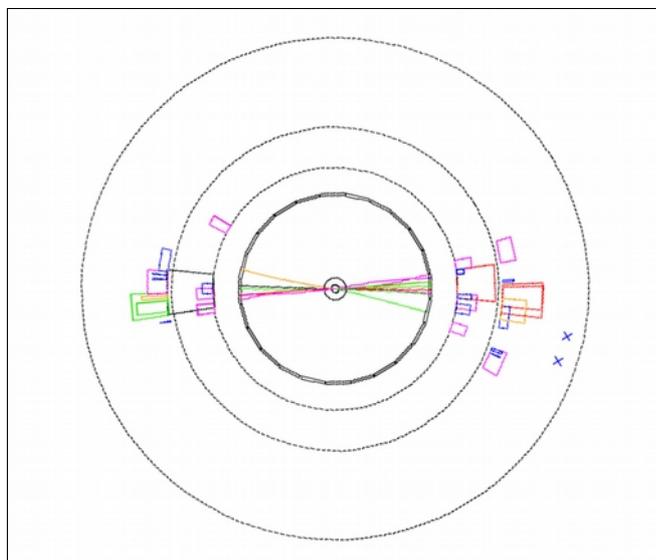
Datum:



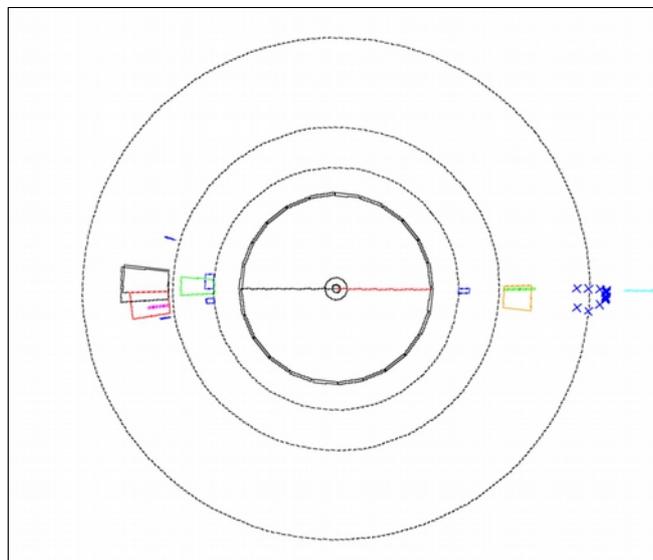
Feynman-Diagramm:



Feynman-Diagramm:



Feynman-Diagramm:

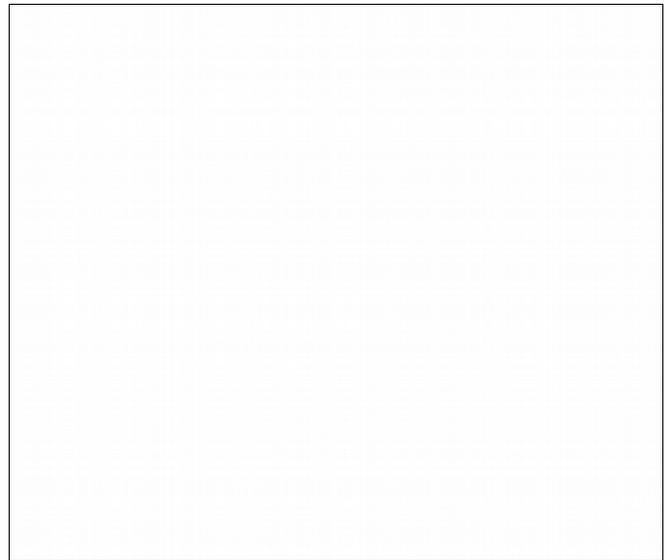
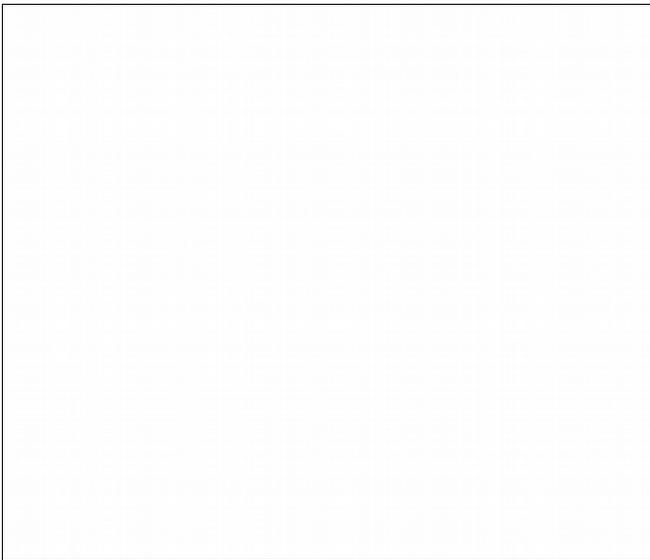


Feynman-Diagramm

HILFSTELLUNG

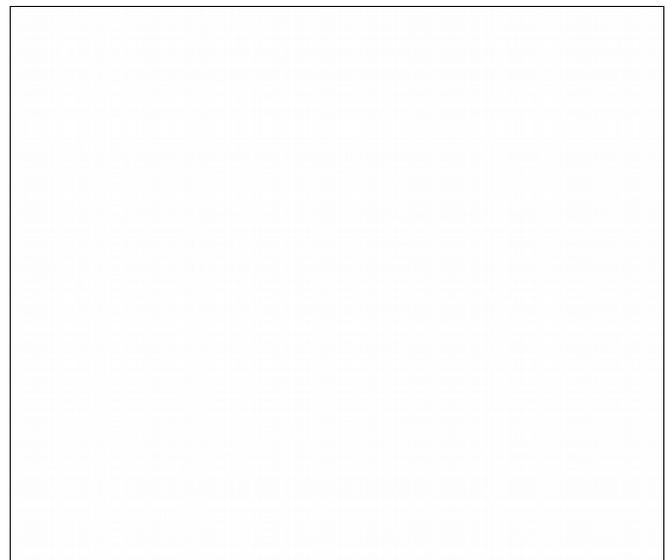
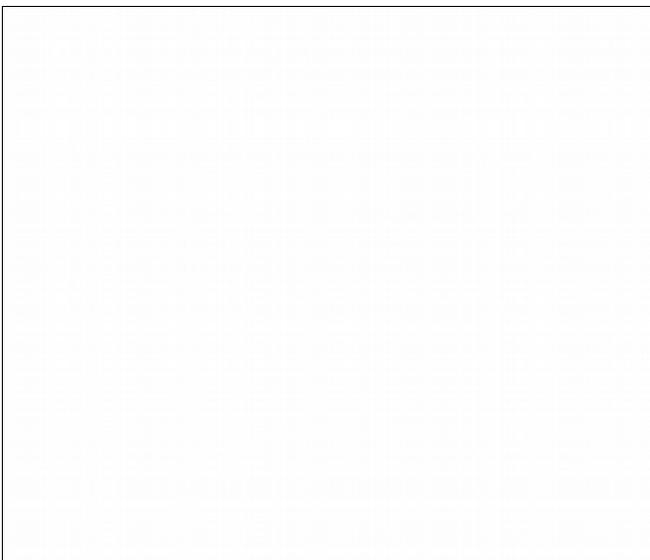
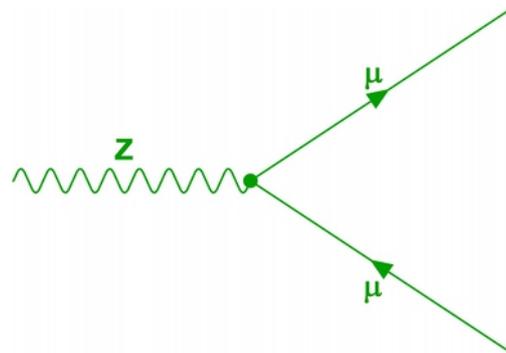
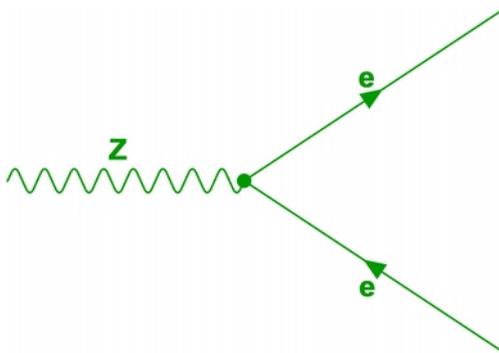
Name:

Datum:



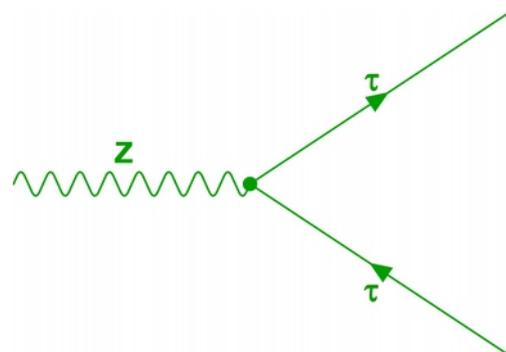
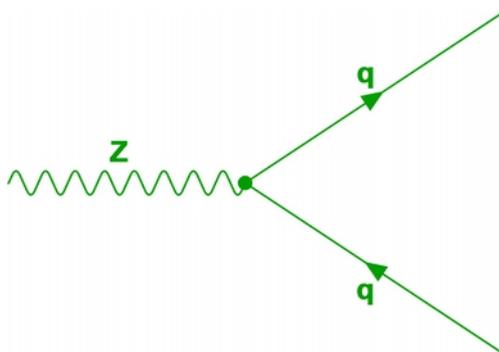
Feynman-Diagramm:

Feynman-Diagramm:



Feynman-Diagramm:

Feynman-Diagramm

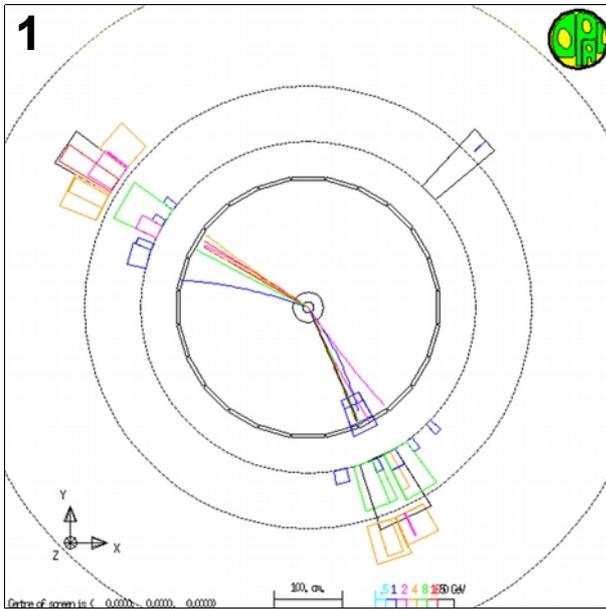


HILFSTELLUNG

## **A.10 Arbeitsmaterialien: Abstrahlung von Botenteilchen**

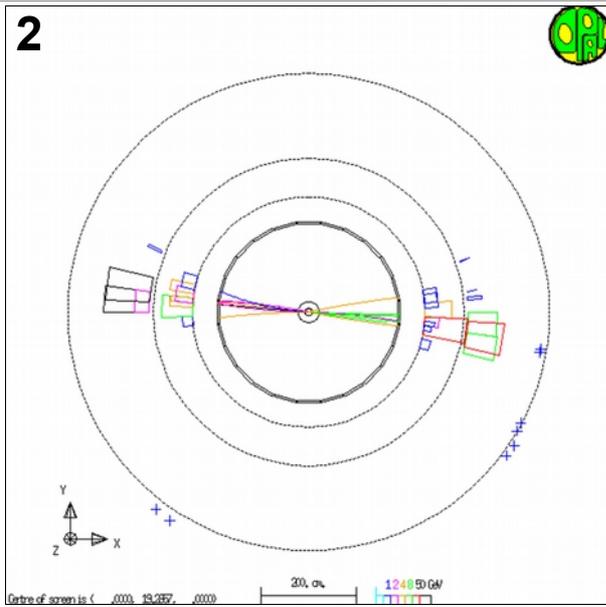


2. Die folgenden drei Abbildungen zeigen Ereignisse, bei denen sich ein Z-Teilchen in ein Quark-Anti-Quark-Paar umgewandelt hat. In zwei dieser Ereignisse wurde von einem beiden Anti-/Quarks ein Botenteilchen abgestrahlt wurde. Entscheide jeweils ob und wenn ja was für ein Botenteilchen abgestrahlt wurde. Vervollständige anschließend die zugehörigen Feynman-Diagramme. (Hinweis: Falls ein Botenteilchen abgestrahlt wurde, gibt es mehrere korrekte Feynman-Diagramme.)



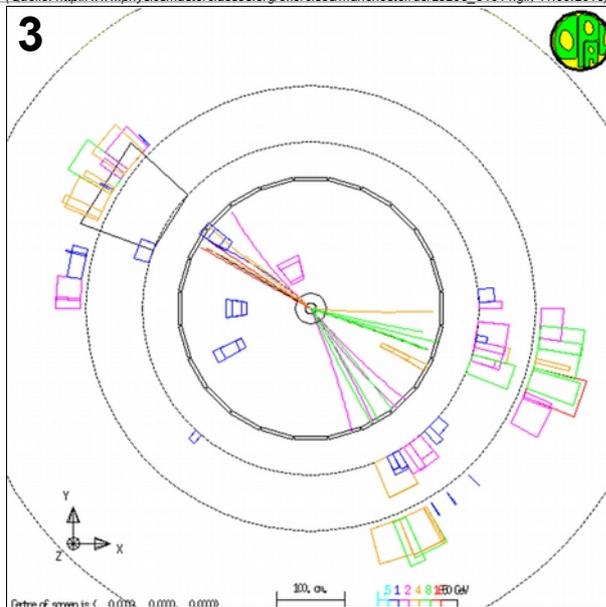
Abgestrahltes Botenteilchen:

Feynman-Diagramm:



Abgestrahltes Botenteilchen:

Feynman-Diagramm:



Abgestrahltes Botenteilchen:

Feynman-Diagramm:



## Abstrahlung von Botenteilchen

1. Bei der Umwandlung eines Z-Teilchens entsteht in etwa 70 Prozent der Fälle ein Quark-Anti-Quark-Paar. In einigen Fällen wird von einem der beiden entstandenen Anti-/Quarks ein Botenteilchen abgestrahlt, wobei die Art des Anti-/Quarks erhalten bleibt. Kreuze an, um welche der folgenden Teilchen es sich dabei handeln könnte. Begründe deine Entscheidung.

Z-Teilchen

Photon

$W^+$ -Teilchen

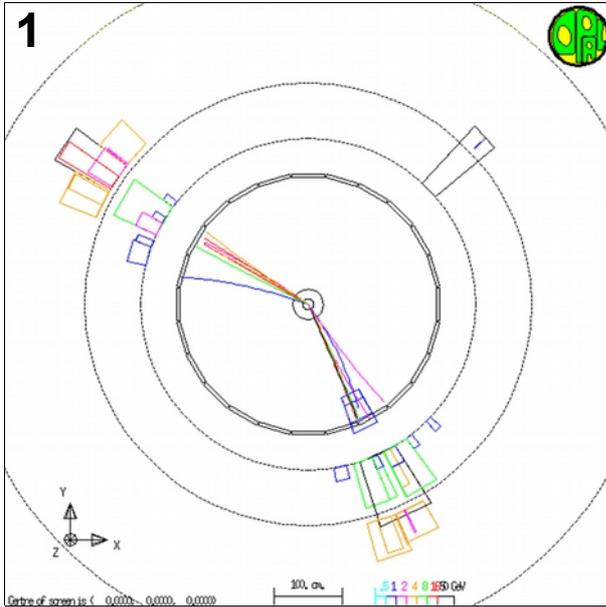
Gluon

$W^-$ -Teilchen

Elektron-Neutrino

Es können nur Teilchen abgestrahlt werden, für deren Erzeugung das Anti-/Quark ausreichend viel Energie besitzt. Da es sich um Quark-Anti-Quark-Paare aus einer Umwandlung des Z-Teilchens handelt, besitzen diese in keinem Fall eine ausreichende Energie um ein Z-Teilchen abzustrahlen.  $W^-$ - und  $W^+$ -Teilchen haben zwar eine geringere Masse als das Z-Teilchen, allerdings wäre in diesen Fällen die Erhaltung der elektrischen Ladung verletzt, da die Art des Quarks erhalten bleiben soll. Elektron-Neutrinos entfallen ebenfalls, da es sich bei diesen nicht um Botenteilchen handelt. Lediglich Photonen und Gluonen als masselose Botenteilchen erfüllen die nötigen Voraussetzung für eine Abstrahlung. Quarks bzw. Anti-Quarks besitzen sowohl eine elektrische als auch eine starke Ladung, weswegen sowohl Photonen als auch Gluonen an diese koppeln können.

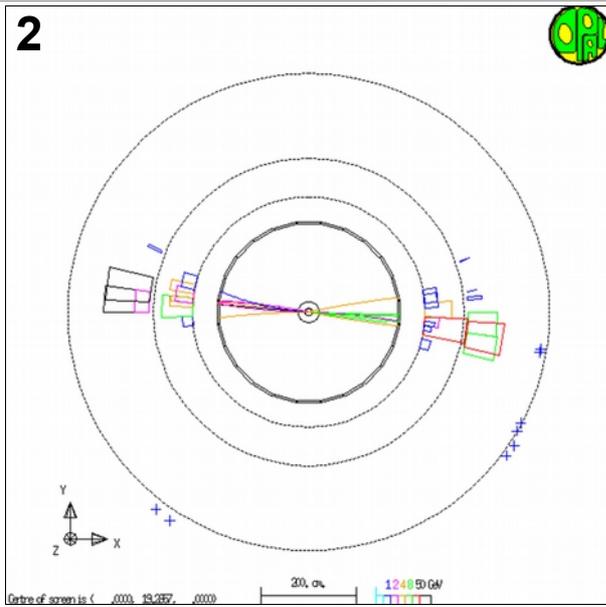
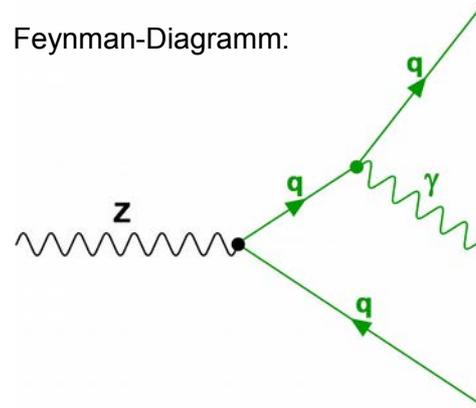
2. Die folgenden drei Abbildungen zeigen Ereignisse, bei denen sich ein Z-Teilchen in ein Quark-Anti-Quark-Paar umgewandelt hat. In zwei dieser Ereignisse wurde von einem beiden Anti-/Quarks ein Botenteilchen abgestrahlt wurde. Entscheide jeweils ob und wenn ja was für ein Botenteilchen abgestrahlt wurde. Vervollständige anschließend die zugehörigen Feynman-Diagramme. (Hinweis: Falls ein Botenteilchen abgestrahlt wurde, gibt es mehrere korrekte Feynman-Diagramme.)



Abgestrahltes Botenteilchen:

Photon

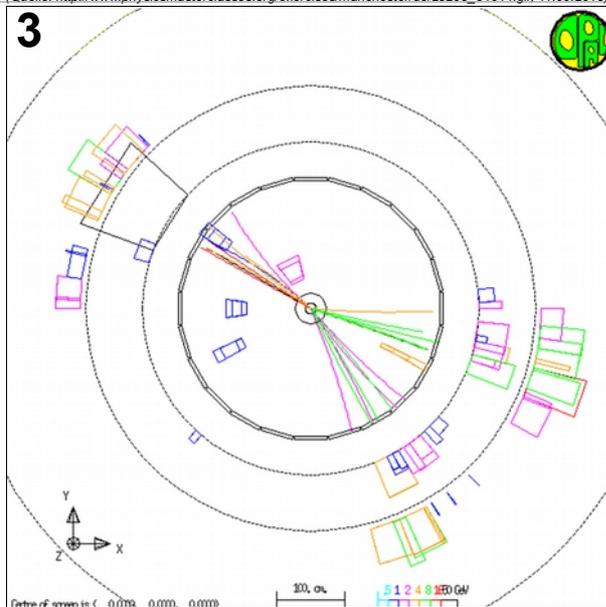
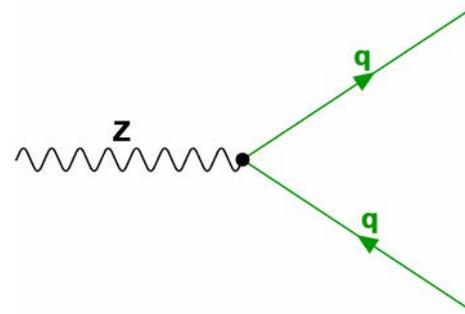
Feynman-Diagramm:



Abgestrahltes Botenteilchen:

Es wurde kein Botenteilchen abgestrahlt.

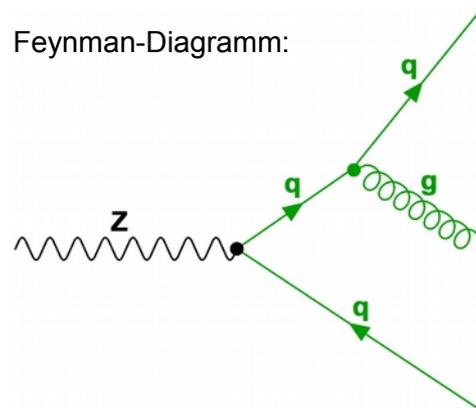
Feynman-Diagramm:



Abgestrahltes Botenteilchen:

Gluon

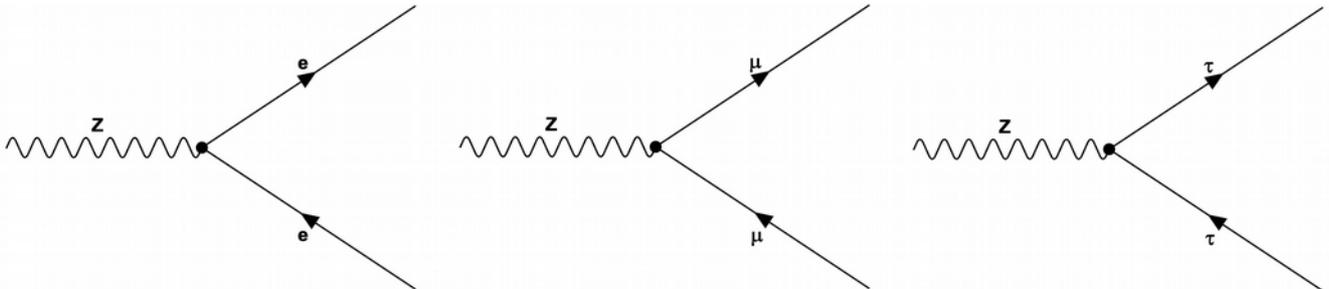
Feynman-Diagramm:



## **A.11 Arbeitsmaterialien: Ergebnisse der LEP-Forschung**

## Ergebnisse der LEP-Forschung: Die Leptonenuniversalität

Bereits vor den Experimenten am Large Electron-Positron Collider (LEP) gab es deutliche Hinweise darauf, dass die elektrisch geladenen Leptonen die gleichen elektrischen, schwachen und starken Ladungen besitzen. Bei den LEP-Messungen hoffte man, diese Annahme bestätigen zu können.



Die Auswertung der experimentellen Daten hat ergeben, dass die Umwandlungskanäle  $Z \rightarrow e^- + e^+$ ,  $Z \rightarrow \mu^- + \mu^+$  und  $Z \rightarrow \tau^- + \tau^+$  (siehe obige Feynman-Diagramme) mit gleicher Wahrscheinlichkeit realisiert werden. Jeder der drei Umwandlungskanäle wurde in etwa 3,4 Prozent der insgesamt beobachteten Z-Umwandlungen realisiert. Das Z-Teilchen koppelt sowohl an die elektrische als auch an die schwache Ladung. Die Wahrscheinlichkeit der Erzeugung bestimmter Anti-/Teilchen bei einer Umwandlung des Z-Teilchens ist also abhängig von deren elektrischer und schwacher Ladungszahl.

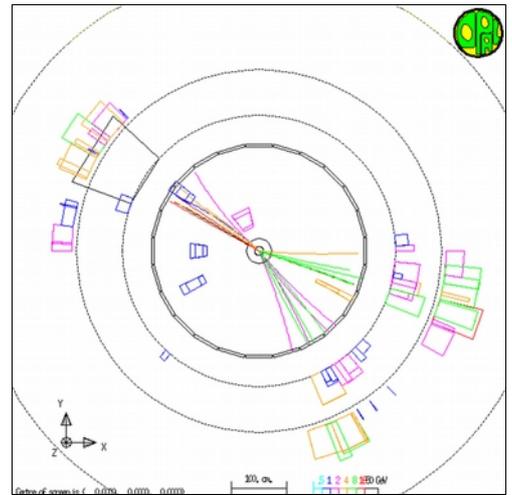
Bereits vor den LEP-Experimenten war bekannt, dass Elektronen, Myonen und Tauonen dieselbe elektrische Ladung besitzen und farbneutral bezüglich der starken Ladung sind (gleiches gilt für die entsprechenden Anti-Teilchen). Die Tatsache, dass die drei Umwandlungskanäle des Z-Teilchens in geladene Leptonen mit gleicher Häufigkeit beobachtet wurden, lässt den Schluss zu, dass Elektronen, Myonen und Tauonen ebenfalls dieselbe schwache Ladung besitzen. Gleiches gilt entsprechend auch für die zugehörigen Anti-Teilchen.

Elektronen, Myonen und Tauonen verhalten sich demnach bei Wechselwirkungen identisch. Gleiches gilt entsprechend für die zugehörigen Anti-Teilchen. Dieser Sachverhalt wird als *Leptonenuniversalität* bezeichnet. Der einzige Unterschied besteht in den Massen der Anti-/Teilchen. Da diese jedoch sehr klein gegenüber der Masse des Z-Teilchens sind, spielte dieser Aspekt bei den Experimenten am LEP keine Rolle. Die Bestätigung der Leptonenuniversalität ist eines der wichtigsten Ergebnisse der LEP-Forschung.

## Ergebnisse der LEP-Forschung:

### Bestimmung des starken Kopplungsparameters

Eines der Forschungsziele am Large Electron-Positron Collider (LEP) war die Bestimmung des starken Kopplungsparameters  $\alpha_s$ . Dieser Parameter ist unter anderem ein Maß dafür, mit welchen Wahrscheinlichkeiten Prozesse der starken Wechselwirkung stattfinden.  $\alpha_s$  ist abhängig von der Energie der Anti-/Teilchen, die an der Wechselwirkung beteiligt sind. Das Standardmodell der Teilchenphysik sagt den funktionellen Zusammenhang zwischen dem Kopplungsparameter und der Energie voraus, nicht jedoch dessen tatsächlichen Wert bei bestimmten Energien. Kennt man den Wert von  $\alpha_s$  bei einer bestimmten Energie, lassen sich die Werte für andere Energien aus den theoretischen Vorhersagen berechnen. Um zu überprüfen, ob diese Vorhersagen stimmen, muss man den Wert des Kopplungsparameters bei verschiedenen Energien experimentell bestimmen. Anschließend kann man diese Werte mit Hilfe der vorausgesagten Energieabhängigkeit auf eine Referenzenergie umrechnen und untereinander vergleichen. Als Referenzenergie wird üblicherweise die Energie des Z-Teilchens ( $E_Z=91,2$  GeV) gewählt. Sofern die Vorhersagen des Standardmodells stimmen, sollten sich aus unterschiedlichen Experimenten bzw. durch unterschiedliche Auswertungsmethoden dieselben Werte für  $\alpha_s(E_Z)$  ergeben.

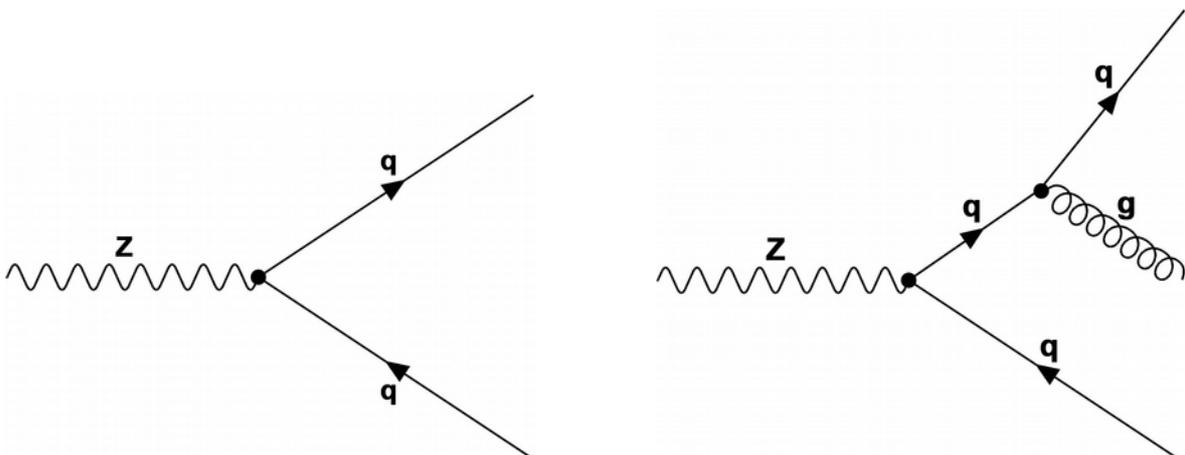


(Quelle: [http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7579\\_6540.gif](http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7579_6540.gif), 11.09.2015)

Da nur Anti-/Quarks und Gluonen eine starke Ladung besitzen, kann der Wert von  $\alpha_s$  nur durch die Untersuchung von Prozessen bestimmt werden, bei denen diese Anti-/Teilchen beteiligt sind

Bei den Umwandlungen der am LEP erzeugten Z-Teilchen entstanden häufig Quark-Anti-Quark-Paare. Gelegentlich kam es vor, dass eines der entstandenen Anti-/Quarks ein Gluon abstrahlte. Dieser Prozess wird auch als *Gluon-Bremsstrahlung* bezeichnet. Das emittierte Gluon bildete genau wie das Quark und das Anti-/Quark einen Jet. Bei Ereignissen mit Gluon-Bremsstrahlung waren im Eventdisplay also drei anstatt zwei Jets zu erkennen. Ein solches Ereignis ist in der obigen Abbildung des OPAL-Eventdisplays zu sehen.

Im Feynman-Diagramm unten links ist die Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Quark-Anti-Quark-Paar dargestellt. Das rechte Feynman-Diagramm zeigt den selben Prozess nur mit der anschließenden Emission eines Gluons durch eines der Anti-/Quarks.



Das rechte Feynman-Diagramm unterscheidet sich vom linken Diagramm durch den zusätzlichen Vertex, an dem das Gluon abgestrahlt wird. Jeder zusätzliche Vertex in einem Feynman-Diagramm beeinflusst die Wahrscheinlichkeit für die Realisierung des Prozesses. Pro Vertex tritt bei der Berechnung der Wahrscheinlichkeit ein zusätzlicher Faktor auf, der direkt proportional zum Kopplungsparameter der am Vertex stattfindenden Wechselwirkung ist. In dem hier betrachteten Fall ist dieser Faktor also proportional zum starken Kopplungsparameter  $\alpha_s$ .

Zwischen den Wahrscheinlichkeiten (P) für 2-Jet- und 3-Jet-Ereignisse besteht also folgender Zusammenhang:

$$P(3\text{-Jet}) = k \cdot \alpha_s(E_Z) \cdot P(2\text{-Jet})$$

Daraus folgt:

$$\alpha_s(E_Z) = \frac{P(3\text{-Jet})}{P(2\text{-Jet}) \cdot k}$$

In die Konstante k gehen zum Beispiel die gemessenen Energien des abstrahlenden Anti-/Quarks und des Gluons ein. Diese Energien lassen sich aus der Summe der Energien der in den entstandenen Jets enthaltenen Anti-/Teilchen bestimmen. Weiterhin gehen eine Vielzahl komplizierter Korrekturen ein, die sich aus dem Standardmodell ergeben.

Bei den Experimenten am LEP wurden Millionen von Z-Umwandlungen in Anti-/Quarks beobachtet. Aufgrund dieser großen Zahl kann aus den beobachteten relativen Häufigkeiten von 2-Jet- und 3-Jet-Ereignissen sehr genau auf die zugrunde liegenden Wahrscheinlichkeiten geschlossen werden. Die Bestimmung des Verhältnisses der Anzahl der 3-Jet-Ereignisse zu der Anzahl der 2-Jet-Ereignisse ermöglichte also eine sehr präzise Berechnung des starken Kopplungsparameters.

Durch Vergleich mit den Werten des starken Kopplungsparameters, die bei vorangegangenen Experimenten bzw. am LEP durch andere Untersuchungsmethoden gewonnen wurden, konnte die vom Standardmodell vorhergesagte Energieabhängigkeit bestätigt werden.

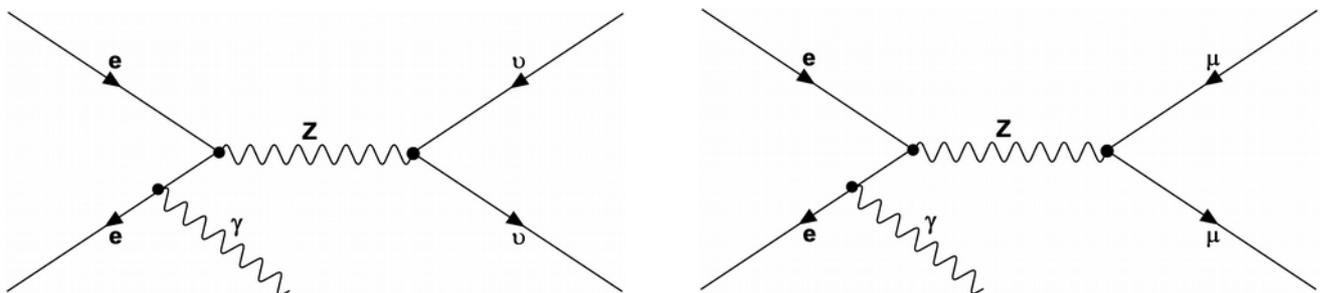
## Ergebnisse der LEP-Forschung: Die Anzahl der Neutrinogenerationen

In den Experimenten am Large Electron-Positron Collider (LEP) wollten die Wissenschaftler unter anderem überprüfen, wie viele unterschiedliche Arten von Anti-/Neutrinos existieren. Das Problem dabei war, dass Anti-/Neutrinos mit den Detektoren nicht direkt nachweisbar waren, was die Untersuchung dieser elementaren Anti-/Materieteilchen erschwerte.

Das Standardmodell sagt voraus, wie das Verhältnis der Anzahl der Umwandlungen des Z-Teilchens in ein Neutrino-Anti-Neutrino-Paar zur Anzahl der Umwandlungen in ein Paar aus geladenen Leptonen sein müsste, wenn wie angenommen nur die drei bekannten Arten leichter Anti-/Neutrinos existieren. Wie konnte dieses Verhältnis aber bestimmt werden, wenn man die Zahl der Umwandlungen von Z-Teilchen in Anti-/Neutrinos nicht zählen konnte?

Unter bestimmten Umständen war es möglich, auf die Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Neutrino-Anti-Neutrino-Paar zu schließen, auch wenn die Anti-/Neutrinos für die Detektoren unsichtbar blieben.

Die Z-Teilchen wurden am LEP durch die Kollision von Elektronen und Positronen erzeugt. Manchmal kam es vor, dass eines dieser Anti-/Teilchen vor der Kollision ein Photon abstrahlte, welches im Detektor registriert werden konnte. Wandelte sich das entstandene Z-Teilchen anschließend in ein Neutrino-Anti-Neutrino-Paar um, so war im Detektor nur die Signatur des Photons sichtbar. So konnten diese Ereignisse gezählt werden. Der gesamte Prozess ist im linken Feynman-Diagramm dargestellt. Das rechte Feynman-Diagramm beschreibt einen ähnlichen Prozess, nur dass sich das Z-Teilchen dabei in ein Myon-Anti-Myon-Paar umwandelt. Derartige Ereignisse konnten am LEP leicht identifiziert und gezählt werden



Das ermittelte Verhältnis aus Umwandlungen des Z-Teilchens in ein Neutrino-Anti-Neutrino-Paar zu den Umwandlungen in ein Myon-Anti-Myon-Paar wurde mit den Vorhersagen des Standardmodells verglichen, die sich ergeben, wenn man annimmt, dass genau die drei bisher bekannten leichten Neutrinos existieren. Es hat sich gezeigt, dass die experimentellen Ergebnisse sehr genau mit den Vorhersagen übereinstimmen. Mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit existieren also tatsächlich nur drei Arten leichter Anti-/Neutrinos.

Dass eventuell schwere Neutrinos existieren, die eine zu große Masse besitzen um bei der Umwandlung eines Z-Teilchens entstehen zu können, kann anhand der experimentellen Daten allerdings nicht ausgeschlossen werden.



## **Selbständigkeitserklärung**

Ich versichere hiermit, dass ich die Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen als Hilfsmittel benutzt habe.

Philipp Lindenau

Dresden, den 27.10.2015