

Carl Freytag · Wolfgang Osterhage

# Wie man Elementar- teilchen entdeckt

An abstract, colorful visualization of particle tracks and detector components. The central part features a bright yellow and green core surrounded by intricate, overlapping patterns of blue, green, and purple lines and dots, suggesting particle paths and interactions. The background is dark, with a large, multi-faceted, low-poly shape in shades of purple and blue. At the bottom, there's a curved, segmented structure in orange and red, resembling a detector ring or a particle accelerator component.

Vom Zyklotron zum LHC –

Ein Streifzug durch  
die Welt der Teilchenbeschleuniger

 Springer

Wie man Elementarteilchen entdeckt

Carl Freytag · Wolfgang W. Osterhage

# Wie man Elementarteilchen entdeckt

Vom Zyklotron zum LHC – ein Streifzug  
durch die Welt der Teilchenbeschleuniger



Springer

Carl Freytag  
Berlin, Deutschland

Wolfgang W. Osterhage  
Wachtberg-Niederbachem, Deutschland

ISBN 978-3-662-49955-9  
DOI 10.1007/978-3-662-49956-6

ISBN 978-3-662-49956-6 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Teile des vorliegenden Buches sind aus dem Lehrbuch W. Osterhage, „Studium Generale Quantenphysik“ übernommen.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

*Planung:* Dr. Lisa Edelhäuser

*Grafiken:* 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, 8.7, 9.2, 9.3, 9.4, 9.5, 9.6, 9.7, 11.4 von Markus Perner

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer ist Teil von Springer Nature  
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg

# Vorwort

Der Nachweis der Gravitationswellen und die Entdeckung des Higgs-Teilchens haben neuerdings das Interesse der Öffentlichkeit an Makrokosmos und Mikrokosmos, an den Kräften, die unsere Welt zusammenhalten und an den kleinsten Teilchen, aus denen sie besteht, in den Mittelpunkt gerückt – und damit auch die Laboratorien, die in diese Reiche der Physik vorstoßen: Neben dem Universum, dem größten Experimentierfeld, das wir haben, sind es die gigantischen Maschinen der Elementarteilchenphysik in Großforschungseinrichtungen wie CERN und DESY. Mit ihnen versuchen weltweit Forscher unter dem Einsatz extrem hoher Energien Zustände zu simulieren, wie sie zum Beginn unseres Universums nach dem „Big Bang“ herrschten.

Dieses Buch erklärt die physikalischen Grundlagen und die Technologien der Elementarteilchenforschung und beschreibt die Teilchenbeschleuniger, die Detektoren und ihr Zusammenspiel. An einigen Meilensteinen der Forschung – von der Erzeugung von Transuranen über die Entdeckung exotischer Mesonen bis zum Higgs-Teilchen – wird der Weg von der Theorie über das Experiment zum Forschungsergebnis gezeigt.

## VI      Wie man Elementarteilchen entdeckt

Die Autoren danken dem Springer-Verlag für die Möglichkeit, zu diesen aufregenden Entwicklungen publizieren zu dürfen. Ein ganz besonderer Dank geht an die Springer-Redaktion, und hier an Lisa Edelhäuser und Stella Schmoll für ihre ausgezeichnete Unterstützung bei unserem Vorhaben und große Geduld bei der Entstehung des Werkes.

April 2016

Berlin

Wachtberg-Niederbachem

Carl Freytag

Wolfgang W. Osterhage

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Strahlung</b> .....	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Teilchen und Wellen</b> .....	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>Atommodelle: die Hülle</b> .....	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>Atommodelle: der Kern</b> .....	<b>71</b>
<b>6</b>	<b>Auf dem Weg zum Standardmodell</b> .....	<b>89</b>
<b>7</b>	<b>Quarks, Flavor, Color und die Weltformel</b> .....	<b>103</b>
<b>8</b>	<b>Teilchenbeschleuniger</b> .....	<b>129</b>
<b>9</b>	<b>Detektoren</b> .....	<b>151</b>

## VIII Wie man Elementarteilchen entdeckt

<b>10</b>	<b>Die großen Laboratorien</b> .....	173
<b>11</b>	<b>Meilensteine</b> .....	227
	<b>Anhang: Zusammenstellung weiterer wichtiger Teilchen- beschleuniger</b> .....	241
	<b>Literatur</b> .....	247
	<b>Sachverzeichnis</b> .....	249

# 1

## Einleitung

### Steinkreise, Kreisgräben und andere Wunderbauten

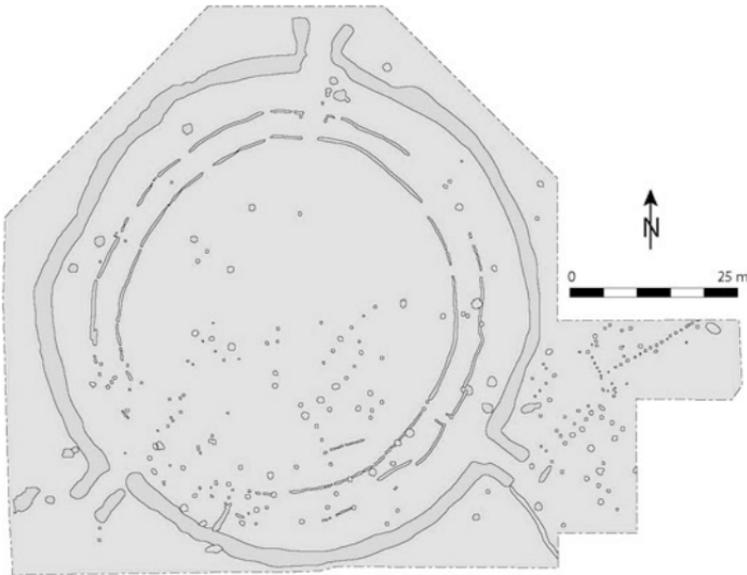
Wenn wir heute als Touristen nach Südengland fahren und bei Stonehenge (Abb. 1.1) die Überreste uralter Trümmerfelder sehen, die offensichtlich keine Reste von Kirchen, Palästen oder Gräbern sind, stehen wir vor einem Rätsel. Wir wissen nicht, ob diese Kreisringe aus Riesensteinen eine Kultstätte bildeten und suchen nach einer Erklärung für den ungeheuren Aufwand, der bei dem Bau dieses Monuments getrieben worden war.

Es gibt viele Spekulationen. Eine davon zielt in die Richtung eines astronomischen Observatoriums, das vielleicht dazu dienen sollte, die Tag- und Nachtgleiche eindeutig festzulegen. Lohnte sich dafür der Aufwand? Bei der Beantwortung dieser Frage sollte bedacht werden, dass zur damaligen Zeit wahrscheinlich die uns heute geläufigen kosmischen Rhythmen noch nicht bekannt waren, dass es aber von enormer Tragweite für die Vorausberechnung von Aussaat- und Erntezeiten war, gewisse zeitliche Fixpunkte im Jahreslauf zu kennen.



**Abb. 1.1** Stonehenge im Juli 2008. © Operarius; Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0

Der Steinkreis von Stonehenge ist der berühmteste unter vielen ähnlichen Steinkreisen in Deutschland, Großbritannien, Frankreich und sogar in Afrika, die man heute noch besichtigen kann, und es gibt eine ganze Reihe weiterer großer Bauwerke und Beispiele von „gebautem Wissen“, die seinerzeit der Erforschung des Himmels dienten, sei es aus religiösen Gründen, sei es auch aus ganz nüchternen Gründen, um Aussaat und Ernte optimal zu gestalten. Zu diesen Bauwerken zählen auch die sogenannten Kalenderbauten, wie der Sonnentempel von Teotihuacan (Mexiko), der um das Jahr 100 entstand, und der von Konark (Indien) aus dem 13. Jahrhundert.



**Abb. 1.2** Kreisgrabenanlage von Goseck. Aus Bertemes und Northe (2012), Abb. 4

In Deutschland gibt es seit einigen Jahren eine „Kreisgrabenanlage“ zu besichtigen, die 1991 entdeckt wurde. Sie liegt bei Goseck in Sachsen-Anhalt und besteht aus einem Grabenring mit einem Durchmesser von ca. 75 m, in den Sichtöffnungen eingelassen sind, die auf Sonnenaufgang und Sonnenuntergang zur Zeit der Wintersonnwende abgestimmt sind (s. Abb. 1.2, vgl. Abb. 8.6, die ein Synchrotron zeigt, das ganz ähnliche Eingänge für die Injektion und Ejektion der Teilchen aufweist). Die Entstehungszeit wird auf 4900–4700 v. Chr. geschätzt, sie liegt also deutlich vor der Entstehungszeit von Stonehenge, das man auf das 2. oder 3. vorchristliche Jahrtausend datiert

(2000–2500 v. Chr.). Eine 10.000 Jahre alte Kalenderanlage mit 12 Gruben für die Monate vermutet man in Warren Field (Schottland). Goseck ist derzeit das älteste bekannte Sonnenobservatorium der Welt. Bei zahlreichen anderen ähnlichen Rundbauten (Hopferstedt, Quedlinburg u. v. a.) ist der Zweck (Himmelsbeobachtung oder kultische Verwendung?) nicht so klar bewiesen, wie bei Goseck.

## Jahrtausende später: Large Hadron Collider

Lassen Sie uns nun nach diesem Ausflug zu den kreisförmigen Großforschungsanlagen der Vergangenheit in die Zukunft aufbrechen: Wir schreiben das Jahr 3500. Vieles, was vor gut 1500 Jahren – also heute – aufgeschrieben oder elektronisch gespeichert worden ist, blieb auf irgendeine Weise erhalten. Anderes ist dem Zeitenwandel zum Opfer gefallen und in Vergessenheit geraten. Über so eine lange Zeitspanne kann viel passieren, wie wir aus der Geschichte wissen. Im Jahr 3500 begibt sich also ein Archäologenteam in die Gegend des alten Genf, weil sich hartnäckig Gerüchte halten, dass es dort einmal geheimnisvolle Tunnelsysteme gab, die zu einer riesigen Forschungsanlage gehörten, einem „Teilchenbeschleuniger“ mit dem Namen „Large Hadron Collider“, wie man in alten Schriften lesen kann.

Die Archäologen wollen das Geheimnis lüften und stoßen nach mehreren vergeblichen Versuchen an unterschiedlichen Grabungsorten tatsächlich auf Relikte einer gewaltigen Anlage. Sie finden Magnete und verrostete Metalltei-

le, von Ratten zernagte Kabel und Teile eines eingestürzten Tunnelsystems. Angesichts des Ausmaßes des uralten Komplexes stehen die Archäologen vor einem Rätsel. Was hat das alles zu bedeuten? Was wollten die Menschen vor 1500 Jahren damit erreichen? Handelt es sich um Überreste einer religiösen Kultstätte? Oder war es eine astronomische Forschungsanlage wie Stonehenge und die Sonnentempel?

Und was bedeutet „Large Hadron Collider“? „Large“ ist leicht verständlich, denn die Tunnel erstrecken sich wirklich über viele Kilometer. Aber was ist ein „Hadron“? Das altgriechische „ἄδρος“ bedeutet dick und stark – es ging also um gewichtige Dinge. Und warum hat man einen „Collider“ gebaut, also eine Anlage, um Zusammenstöße zu produzieren? Wo man doch sonst eher darauf bedacht ist, Zusammenstöße zu vermeiden?

Vielleicht wird es den Menschen im Jahre 3500 mit den Überresten des LHC wirklich so ähnlich gehen wie uns mit den Relikten jener frühen Großforschungsanlagen. Vielleicht ist auch das, was heute für uns mühsame Forschung ist, in ferner Zukunft banale Selbstverständlichkeit.

## Was das Buch bringen wird

Stonehenge ist kein Teilchenbeschleuniger, und die Kalenderbauten sind keine Detektoren für physikalische Prozesse. Von den Bauwerken aus alter Zeit führt also kein direkter Weg zu den großen Forschungsanlagen, um die es in diesem Buch gehen wird. Deren Geschichte fängt viel später an: als zum ersten Mal in der Geschichte der Wissenschaft „Teilchen“ beschleunigt wurden. Bevor wir uns aber

der Geschichte der Teilchenbeschleuniger zuwenden können, müssen wir zunächst zwei Fragenkomplexe beantworten, die zwei Begriffe betreffen: „Teilchen“ und „Beschleuniger“.

### **Elementarteilchenphysik**

Bei dem ersten großen Fragenkomplex geht es also um „Teilchen“: Was sind diese Teilchen? Und welche von ihnen sind besonders interessant? Wir müssen dazu etwas tiefer in die Elementarteilchenphysik einsteigen und einen Besuch im „Elementarteilchenzoo“ machen. Wie sieht das Standardmodell aus, das diesen Zoo erklären will? Wie hat es sich aus den ersten Anfängen bis zu den allerneuesten Entdeckungen um das Higgs-Teilchen entwickelt?

### **Beschleunigung der Teilchen**

Der zweite Fragenkomplex knüpft an den ersten an und betrifft die „Beschleunigung“: Warum will man überhaupt Teilchen beschleunigen? Und welche? Was will man damit herausfinden? Welche Experimente muss man durchführen, und welche Erkenntnisse kann man aus ihnen gewinnen?

In der experimentellen Teilchenphysik, die auf Beschleunigerexperimenten aufbaut, unterscheiden wir also zwei Wissenschaftsbereiche mit einem je eigenen Expertenwissen. Da ist zum einen die Teilchenphysik, zum anderen die Beschleunigerphysik und -technologie. Beide wirken zwar eng zusammen, erfordern aber unterschiedliche Detailkenntnisse. Im Laufe der Wissenschaftsgeschichte hat sich auch die Reihen- und Rangfolge geändert. War es in den Anfängen so, dass Experimente den Takt vorgaben und die Theoretiker herausforderten, nach Erklärungen zu suchen,

so hat sich der Trend ziemlich schnell umgekehrt: Nun stellen die Theoretiker Postulate, Hypothesen und Theorien auf, die durch Experimente verifiziert (oder widerlegt) werden sollen.

### **Geschichte der Teilchenbeschleuniger**

Wenn wir nun wissen, was Teilchen sind und warum man sie beschleunigt, können wir daran gehen, die Technologien der Teilchenbeschleuniger zu untersuchen, also zu fragen, wie diese Anlagen funktionieren. Dazu werfen wir einen Blick in ihre Geschichte, die aber keineswegs abgeschlossen ist. Sie wird derzeit von zwei Trends geprägt: Erstens werden immer größere Anlagen gebaut, und zweitens nimmt die Verbreitung von Teilchenbeschleunigern weltweit rasant zu, in Krankenhäusern finden sich heute beispielsweise Tausende von ihnen.

### **Geschichte der Detektoren**

Wichtige Bestandteile aller Beschleuniger sind die Detektoren. Ohne sie könnte man beschleunigen so viel man wollte, ohne ein Ergebnis zu erhalten. Die Detektoren sind sozusagen die Schnittstelle zwischen dem Geschehen im Allerkleinsten, das unseren natürlichen Sinnen verborgen bleibt, und unseren eigenen Erkenntnismöglichkeiten.

### **Laboratorien**

Beschleuniger und Detektoren gehören also zusammen. Damit ist der Zeitpunkt gekommen, uns den Laboratorien zuzuwenden, die all diese Geräte zusammenfügen und einsetzen, um uns letztlich die Ergebnisse zu liefern, auf die wir aus sind und die unsere Weltansicht so stark verändern.

Dazu gehören so bekannte Großforschungseinrichtungen wie CERN in Genf, DESY in Hamburg, die Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt, das FermiLab und das LAC in Stanford, aber auch die ELSA-Anlage am Physikalischen Institut in Bonn.

Die eingehende Beschreibung dieser Großanlagen wird noch durch ein Verzeichnis wichtiger Beschleuniger auf der ganzen Welt mit ihren Leistungsmerkmalen und Forschungsgegenständen ergänzt.

### **Meilensteine**

Damit die Theorie und die beschriebenen Geräte und Laboratorien etwas plastischer werden, soll schließlich anhand einiger Beispiele von Meilensteinen der Wissenschaftsgeschichte gezeigt werden, wie der Weg vom theoretischen Ansatz über das Experiment zum Ergebnis verläuft. Wir wollen dazu Meilensteine wählen, die zu einer neuen Sicht auf den Mikrokosmos geführt haben, aber auch unsere Kenntnisse des Universums und seiner Entstehung erweitert haben. Dazu gehören die Entdeckung des  $J/\psi$ -Mesons, die Erzeugung von Transuranen, die Entdeckung des Top-Quarks und der Nachweis des Higgs-Teilchens.

# 2

## Strahlung

*Dieses Kapitel führt in die Grundbegriffe der Elektrodynamik ein, die wir später bei der Diskussion der Teilchenbeschleuniger brauchen: Von den „klassischen“ Vorstellungen des Lichts – seiner Wellen- und Teilchenstruktur – über die Maxwell'schen Gleichungen bis zu den Folgen der Relativitätstheorie, zur konstanten Lichtgeschwindigkeit und zu Einsteins berühmtester Gleichung  $E = mc^2$ .*

### **Die Natur des Lichts: Welle oder Teilchen?**

Es waren Untersuchungen der Strahlungsprozesse von sichtbarem Licht und der Wärmestrahlung, die die Entwicklung der Quantenphysik auslösten, der Basis für die Teilchenbeschleuniger, denen dieses Buch gewidmet ist. Tatsächlich aber ist die Frage nach der Natur des Lichts viel älter und hat schon in früheren Zeiten zu großen Kontroversen geführt. Daher lohnt hier in kurzer Blick zurück: Was ist Licht? Und wie hat sich die physikalische Vorstellung vom Licht im Laufe der Geschichte gewandelt?

Bereits im Altertum haben sich Forscher und Philosophen mit diesen Fragen beschäftigt und sehr moderne

Ideen entwickelt. Für den Vorsokratiker Demokrit (460–370 v. Chr.), den ersten Vertreter des Atomismus, bestand das Licht aus Teilchen, die sich von den Gegenständen, die wir sehen, als „Eidola“ auf den Weg in unsere Augen machen: „Denn von jedem Ding gibt es immer eine Art Ausströmung“, zitiert ihn Theophrast aus einer verloren gegangenen Schrift. Für Platon (428–348 v. Chr.) und Euklid (360–280 v. Chr.) ging dagegen das Licht in Form von Sehstrahlen vom Auge aus. Aristoteles (384–322 v. Chr.) wiederum sah im Licht immaterielle Strahlen, die von leuchtenden Körpern wie der Sonne ausgehen: Trifft ein solcher Strahl ein Objekt, wird er reflektiert, und der reflektierte Strahl wird vom Auge wahrgenommen. Der Dualismus Welle-Teilchen bestand also schon seit der Antike – ganz ähnlich wie die Vorstellung von der Erde als Scheibe oder als Kugel und die Vorstellung von Sonne oder Erde als Mittelpunkt des Himmelssystems.

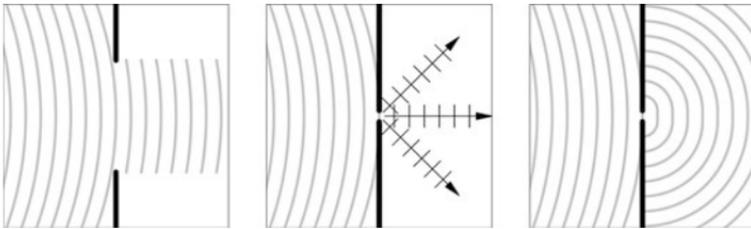
Ein großer Zeitsprung führt uns zu dem holländischen Physiker Christiaan Huygens (1629–1695), für den in seiner *Traité de la lumière* von 1690 (deutsch: *Abhandlung über das Licht*, 1890) eine Lichtquelle kugelförmige Fronten von Lichtwellen ausstrahlte. Ganz anders bestand für Isaac Newton (1643–1727) nur wenige Jahre später in seinem Buch *Opticks* von 1704 (deutsch: *Optik*, 1898) das Licht aus winzigen Partikeln oder Korpuskeln, mit deren Bewegungen er die Ausbreitung des Lichts erklärte. Damit schuf Newton die Grundlagen für die moderne wissenschaftliche Optik. Huygens' Ansicht setzte sich gegen Newtons Bild im 19. Jahrhundert durch, unter anderem aufgrund der Entdeckung von Interferenzerscheinungen durch überlagerte Lichtwellen.

## Wellenoptik: Beugung und Interferenz

Die Interferenz ist das Paradebeispiel eines Wellenphänomens. Erstmals wurde 1802 von Thomas Young (1773–1829) beobachtet, dass eine Lichtwelle wie jede andere Welle die Möglichkeit besitzt, andere Wellen zu überlagern und sie dabei auszulöschen oder zu verstärken.

In homogenen Medien breiten sich Wellen normalerweise geradlinig aus – daher auch die Modellvorstellung vom geraden Lichtstrahl. Wenn aber Hindernisse auftauchen, wie beispielsweise eine Blende mit einem Spalt, ist dies nicht mehr unbedingt der Fall: Das Licht wird gebeugt (Abb. 2.1).

Der Versuchsaufbau von Young verdient näheres Hinsehen, da ähnliche Versuche in der Quantenmechanik eine große Rolle spielen werden. Young ließ Licht durch einen

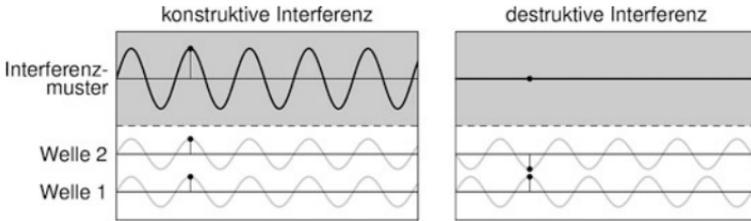


**Abb. 2.1** Beugung. Eine Lichtwelle bewegt sich von links nach rechts auf eine Blende zu. Im *linken Bild* hat die Blende eine relativ große Öffnung, sodass ein einfacher Schattenwurf des Hindernisses entsteht. Im *mittleren Bild* ist die Öffnung kleiner, und die Wellen werden hinter dem Hindernis gebeugt. *Rechts* ist der Durchmesser der Öffnung so klein, dass die Anordnung wie eine Lichtquelle wirkt, die ihre eigenen Kugelwellen aussendet. Aus Osterhage (2012)

sehr engen Doppelspalt treten. Dieser wirkt wie zwei separate Lichtquellen, die bei genügend kleinen Abmessungen annähernd in Phase strahlen. Das von den beiden Spalten ausgehende Licht überlagert sich dann auf dem Weg zu einem Beobachtungsschirm, sodass entsprechend der Differenz ihrer jeweiligen Phasen, also der „Phasenverschiebung“, das überlagerte Licht entweder geschwächt oder verstärkt wird.

Die physikalische Erklärung der Interferenz ist im Wellenbild nicht sehr schwer, bereits Huygens hatte eine anschauliche Erklärung: Von jedem Spalt geht eine „Elementarwelle“ aus, d. h. eine Kreis- oder Kugelwelle, die sich hinter der Blende gleichmäßig ausbreitet (Abb. 2.1, rechts). Offensichtlich addiert sich die Auslenkung, wenn sich bei einem Doppelspalt zwei Wellenberge (oder -täler) überlagern, zu einem Maximum (konstruktive Interferenz). In diesem Fall schwingen beide Wellen im Takt, man sagt, sie sind „in Phase“. Umgekehrt schwächen sich Wellenberge und -täler gegenseitig ab (destruktive Interferenz), wenn immer ein Berg der einen auf ein Tal der anderen Welle trifft und die Wellen somit „außer Phase“ sind. Im Extremfall löschen sich beide Wellen komplett aus (Abb. 2.2).

Die ersten Beugungsversuche führten zu Zweifeln an Newtons Korpuskeltheorie des Lichts, die Interferenzerscheinungen beim Young'schen Doppelspaltversuch zu ihrer Widerlegung: Zwei Partikel, die sich im gleichen Raumbereich zusammenfinden, können nicht abwechselnd verschwinden und mit „doppelter Kraft“ wieder auftauchen!



**Abb. 2.2** Interferenz. Zwei Wellen überlagern sich, *links* sind sie in Phase (Berg auf Berg, Tal auf Tal; konstruktive Interferenz), *rechts* um  $180^\circ$  phasenverschoben (Berg auf Tal; destruktive Interferenz). Aus Osterhage (2012)

## Elektrodynamik: Maxwell'sche Gleichungen

Im nächsten Schritt wird es theoretischer. Wir springen vom Beginn des 19. Jahrhunderts in seine zweite Hälfte, als James Clerk Maxwell (1831–1879) die Theorien von Elektrizität, Magnetismus und Optik mit seinen berühmten vier Gleichungen von 1864 vereinheitlichte, die die Beziehungen zwischen elektrischen Ladungen und einem elektrischen und magnetischen Feld beschreiben.

Auch die Geschichte der elektrischen Ladung geht in die Antike zurück. 550 v. Chr. machte der Vorsokratiker Thales von Milet (624–547 v. Chr.) Versuche mit Bernstein (griech.  $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\nu$  – der Begriff Elektrizität hat hier seinen Ursprung) und der von ihm verursachten statischen elektrischen Aufladung. Nach dem Mittelalter kam die Idee eines Fluidums auf (William Gilbert, 1544–1603), das die Körper umgab und Träger der Elektrizität war. Der moderne Feldbegriff, der bei Gilbert schon anklingt, wurde von

Michael Faraday (1791–1867) entwickelt. Er und Maxwell gingen von einem elektromagnetischen Feld aus, das vom Äther getragen wird, einem geheimnisvollen Stoff, der uns später noch begegnen wird.

Die Stärke eines Felds ist grundsätzlich durch die Kraft definiert, die es auf einen Körper ausübt, mit dem es in Wechselwirkung steht. Nach Maxwells Vorstellungen ist das Licht in einem Feld eine Welle, die „transversal“, also senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingt und gebeugt oder gebrochen werden kann.

Maxwell beschrieb das Verhalten der Welle im Feld in vier berühmten Gleichungen, die wir hier nicht im Einzelnen diskutieren können, deren Sinn aber grob dargestellt werden muss, da sie letztlich einem Großteil der physikalischen Prozesse in Teilchenbeschleunigern zugrunde liegen:

$$\nabla E = \rho/\varepsilon_0 \quad (2.1)$$

$$\nabla B = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times E = -\partial B/\partial t \quad (2.3)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 j + \mu_0 \varepsilon_0 \partial E/\partial t \quad (2.4)$$

Der Nabla-Operator  $\nabla$ , der nach einer phönizischen Harfe benannt ist, die diese Form hat, ist ein Vektor aus den partiellen räumlichen Ableitungen  $\partial/\partial x$  etc. und gibt das räumliche Gefälle des Feldes an,  $\times$  bezeichnet ein Vektorprodukt. Die erste Gleichung besagt, dass elektrische Ladungen  $\rho/\varepsilon_0$  ( $\rho$  ist die Materiedichte,  $\varepsilon_0$  die elektrische Feldkonstante, eine Materialkonstante) ein elektrisches Feld  $E$  erzeugen: Von jeder elektrischen Ladung gehen je nach Vorzeichen der Ladung entweder Feldlinien aus oder sie münden in ihr.

Die zweite Gleichung behandelt die Quelle von Magnetfeldern. Die einfache Aussage lautet: Es gibt keine! Genauer gesagt: Es gibt zwar isolierte elektrische Ladungen, aber keine einzelne, isolierte magnetische Nord- oder Südpole. Vielmehr sind alle magnetischen Feldlinien in sich geschlossen.

Die dritte und vierte Maxwell-Gleichung behandeln den Fall eines elektrischen und/oder magnetischen Felds, das sich zeitlich ändert (was sich durch  $\partial/\partial t$  ausdrückt), daher nennt man Maxwells Theorie auch „Elektrodynamik“. Nach Maxwells dritter Gleichung erzeugt jede zeitliche Magnetfeldänderung  $\partial B/\partial t$  ein elektrisches Feld und induziert damit eine elektrische Spannung. Die vierte Maxwell-Gleichung besagt, dass umgekehrt zeitlich veränderliche elektrische Felder  $\partial E/\partial t$  magnetische Wirbelfelder induzieren ( $j$  ist die Stromdichte,  $\mu_0$  die magnetische Feldkonstante oder Permeabilität, wieder eine Materialkonstante).

Die Frage ist nun, was dieses Feld mit elektrischen Ladungen bzw. geladenen Teilchen anstellt.

Elektrische und magnetische Felder sind untrennbar miteinander verbunden, und die Veränderungen des einen Felds beeinflussen jeweils das andere Feld. Deshalb spricht man auch meist einfach vom „elektromagnetischen Feld“.

## Geladene Teilchen im elektromagnetischen Feld

### Elektrisches Feld

Die Feldstärke ist wie die Kraft ein Vektor, hat also Größe und Richtung. In einem elektrischen Feld der Feldstärke  $E$ , das sich beispielsweise zwischen zwei Leiterplatten im Abstand  $d$  aufbaut, an denen die Spannung  $U$  liegt, wirkt auf eine Probeladung  $q$  die (Lorentz-)Kraft  $F$ . Es gilt:

$$E = F/q \text{ bzw. } F = qE = qU/d \text{ und } E = U/d \quad (2.5)$$

In anderen Worten: Die Feldstärke wird durch das Spannungsgefälle definiert, also die Spannung, die angelegt ist, bezogen auf die Distanz der beiden Pole. Die Einheit der elektrischen Feldstärke ist V/m. Eine Spannung  $U = 1$  V, deren Pole 1 m voneinander entfernt sind, bewirkt eine Feldstärke von  $E = 1$  V/m.

In unserer Alltagswelt liegt die elektrische Feldstärke in der Atmosphäre in Bodennähe bei 100–300 V/m, bei einem Gewitter wächst sie auf einige 10.000 V/m an. Blitze entstehen ab einer Feldstärke von mehr als 150.000–200.000 V/m. Die vom Material abhängige „Durchschlagsfestigkeit“, die in der trockenen Luft bei mehr als 1 Million V/m liegt und im Vakuum noch zehnmal höher ist, setzt bei Teilchenbeschleunigern eine Grenze für die Feldstärke: Ein Funke schlägt über, und das Feld bricht zusammen.

Die Kraft  $F$  beschleunigt die Probeladung  $q$  mit der Masse  $m$  mit  $A$ :

$$A = F/m = qE/m \quad (2.6)$$

Den Zuwachs an kinetischer Energie

$$\Delta E_{\text{kin}} = qU \quad (2.7)$$

den das Teilchen erfährt, wenn es eine Spannungsdifferenz  $U$  durchläuft, ist für Teilchenbeschleuniger eine besonders wichtige Größe. Die Energiedifferenz wird in eV (Elektronenvolt) angegeben, sie kann Werte bis zu einigen TeV annehmen, wobei der Rekord derzeit (2015) bei 14 TeV liegt.

Die Messung von Energie und Masse: Die Energie wird in Joule (J) gemessen ( $1 \text{ J} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2 = 1 \text{ CV}$ ). Im Bereich der Teilchenphysik wird die Energie in Elektronenvolt (eV) gemessen:  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$ , das ist die Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen einer Spannung von 1 Volt aufnimmt – von daher auch der Name. Vorsilben: M = Mega =  $10^6$ , G = Giga =  $10^9$ , T = Tera =  $10^{12}$ , P = Peta  $10^{15}$ , Y = Yotta =  $10^{24}$ . In der Teilchenphysik wird Elektronenvolt auch als Masseneinheit verwendet, die Masse eines Teilchens ist seine Ruheenergie dividiert durch das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit nach  $E = mc^2$ . Wird im Folgenden die Masse in MeV angegeben, ist damit  $E/c^2$  gemeint, die Einheit ist also eigentlich  $\text{MeV}/c^2$ .  $1 \text{ eV}/c^2 = 1,78 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$ .

## Magnetfeld

Für geladene, bewegte Teilchen gilt in einem Magnetfeld mit der Flussdichte  $B$  (die Flussdichte ist die mit  $\mu_0$  multiplizierte Feldstärke) und dem magnetischen Teil der Lorentz-Kraft  $F_B$

$$F_B = qv \times B \text{ und } B = F_B/(|qv|) \quad (2.8)$$

Dabei ist  $q$  wieder die Ladung des Teilchens und  $v$  seine Geschwindigkeit, das  $\times$  bezeichnet ein Vektorprodukt. Die magnetische Flussdichte wird in Tesla angegeben ( $1 \text{ T} = 1 \text{ Vs/m}^2$ ), das Erdfeld weist ca.  $10^{-5} \text{ T}$  auf, künstlich werden einige  $10.000 \text{ T}$  erzeugt, in bestimmten Sternen, den Magnetaren, werden  $10^8$  bis  $10^{11} \text{ T}$  erreicht. Es gilt für negative Ladungen die „Linke-Hand-Regel“: Bewegt sich das Teilchen mit  $v$  in Richtung des Daumens und laufen die Feldlinien von  $B$  längs des ausgestreckten Zeigefingers, wirkt die Kraft in Richtung des abgewinkelten Mittelfingers und führt zu einer Kreisbahn. Die zugehörige Gleichung sieht für die Zentripetalkraft so aus:

$$qv_s \times B = mv_s^2/R \quad (2.9)$$

Für den Radius der Kreisbahn  $R$  gilt

$$R = mv_s/qB \quad (2.10)$$

Die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  dieser Kreisbewegung beträgt

$$\omega = v_s/R = qB/m \quad (2.11)$$

Daraus ergibt sich die sogenannte „Zyklotronfrequenz“  $f$ , die wir später noch brauchen werden:

$$f = \omega/2\pi = qB/(2\pi m) \quad (2.12)$$

Wir wollen das nun alles am Beispiel eines Elektrons mit der Ladung  $q$  (der sogenannten „Elementarladung“) und der Masse  $m$  durchrechnen, einem Teilchen, das wir später