

# 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.

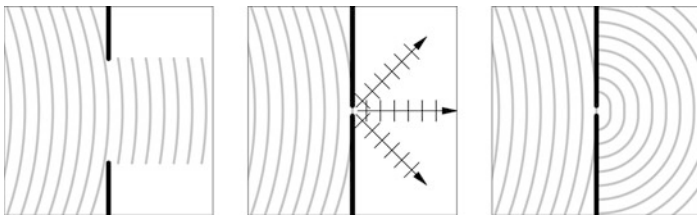
Ein großer Zeitsprung führt uns zu dem holländischen Physiker Christiaan Huygens (1629–1695), für den in seiner *Traité de la lumière* von 1690 (deutsch: *Abhandlung über das Licht*, 1890) eine Lichtquelle kugelförmige Fronten von Lichtwellen ausstrahlte. Ganz anders bestand für Isaac Newton (1643–1727) 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

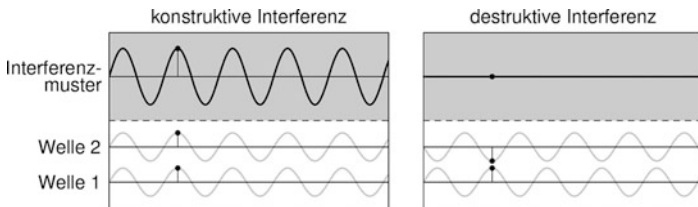


**Abb. 2.1** Beugung. Eine Lichtwelle bewegt sich von links nach rechts auf eine Blende zu. Im *linken Bild* hat die Blende eine relativ große Öffnung, sodass ein einfacher Schattenwurf des Hindernisses entsteht. Im *mittleren Bild* ist die Öffnung kleiner, und die Wellen werden hinter dem Hindernis 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

Wie man Elementarteilchen entdeckt  
Vom Zyklotron zum LHC - ein Streifzug durch die Welt  
der Teilchenbeschleuniger  
Freytag, C.; Osterhage, W.W.  
2016, VIII, 256 S. 66 Abb., Softcover  
ISBN: 978-3-662-49955-9