

## Die elektromagnetische Kraft

Das vorausgegangene Tutorial „Standardmodell der Teilchenphysik“ ist eine zusammenfassende Darstellung der Elementarteilchen und der zwischen ihnen wirkenden fundamentalen Kräfte. In diesem Tutorial soll nun die elektromagnetische Kraft, auch elektromagnetische Wechselwirkung genannt, näher untersucht werden.

Die elektromagnetische Wechselwirkung ist verantwortlich für die abstoßende bzw. anziehende Kraft zwischen Ladungen und für die Kraftwirkung von Magnetfeldern auf bewegte Ladungen. Im Alltag zeigt sich die elektromagnetische Kraft im Magnetismus, bei den Phänomenen der Elektrizität und beim Licht. Darüber hinaus ist sie verantwortlich für den Zusammenhalt der Atome und für die chemische Bindung der Atome in den Molekülen.

In der klassischen, nicht quantifizierten Elektrodynamik lässt sich der Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Feldern – wobei die Felder mathematisch als Dreiervektoren behandelt werden – mit Hilfe von vier nach James Clerk Maxwell benannten Gleichungen beschreiben. In differentieller Form lauten die sogenannten „Maxwell-Gleichungen“:

$$\nabla \vec{E} = \rho \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4)$$

Bei dem vor die Feldvektoren  $\vec{E}$  (elektrische Feldstärke) und  $\vec{B}$  (magnetische Flussdichte) gestellten Zeichen  $\nabla$ , auch Nabla genannt, handelt es sich um einen Differentialoperator. Er verfügt, dass die nachgestellten Vektoren der mathematischen Operation Divergenz bzw. Rotation zu unterziehen sind.

Was bedeuten diese Gleichungen? Gleichung (1) und Gleichung (3) machen eine Aussage über die Quellen elektrischer bzw. magnetischer Felder. So besagt Gleichung (1), dass eine elektrische Ladung Quelle eines elektrischen Feldes ist. Mit

anderen Worten: Elektrische Ladungen sind Ausgangspunkt elektrischer Felder um diese Ladungen. Im Gegensatz dazu gibt es für magnetische Felder keine mit den elektrischen Ladungen vergleichbare Quellen: Es existieren keine magnetischen Monopole. Folglich ist in Gleichung (3) die Divergenz der magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$  gleich Null. In den Gleichungen (2) und (4) wird die Rotation der Vektoren des Magnetfeldes  $\vec{B}$  bzw. des elektrischen Feldes  $\vec{E}$  gebildet. Vereinfacht ausgedrückt besagt Gleichung (2), dass ein stromdurchflossener Leiter mit der Stromdichte  $j$  ein Magnetfeld induziert. Den gleichen Effekt ruft auch ein sich zeitlich änderndes elektrisches Feld hervor. Gleichung (4) ist das sogenannte Faradaysche Induktionsgesetz: Ein zeitlich variierendes Magnetfeld verursacht in einem Leiter einen elektrischen Strom.

Des Weiteren lässt sich aus den Maxwell-Gleichungen eine Wellengleichung ableiten, welche die Bewegung einer elektromagnetischen Welle beschreibt, die sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzt. Im klassischen Sinne ist Licht eine elektromagnetische Welle.

Für das elektrische Feld  $E$  (Dimension: Volt / Meter) einer Punktladung  $q$  (Dimension: C = Coulomb = Ampere x Sekunden) gilt der Ausdruck:

$$E = \frac{k q}{r^2} \left[ \frac{V}{m} \right] \quad (5)$$

mit der Coulomb-Konstanten

$$k = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} = 8,988 \times 10^9 \left[ \frac{N m^2}{C^2} \right] \quad (6)$$

und der Dielektrizitätskonstanten des Vakuums bzw. der elektrischen Feldkonstanten

$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \left[ \frac{A s}{V m} \right] \quad (7)$$

N ist das Symbol für die Kraft in Newton = (Meter x Kilogramm) / (Sekunden im Quadrat).

Eine zu Gleichung (5) ähnliche Formel beschreibt das Magnetfeld  $B$  einer Punktladung, mit dem Unterschied, dass sich die Ladung  $q$  mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegen muss. Es gilt:

$$B \text{ [T]} = \frac{\mu_0}{4 \pi} \times \frac{q \times v}{r^2} \quad (8)$$

Die magnetische Flussdichte B hat die Dimension T = Tesla = Newton / (Ampere Meter). Die Größe  $\mu_0$  wird als magnetische Feldkonstante des Vakuums bezeichnet. Sie hat den Wert:

$$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \left[ \frac{\text{N s}^2}{\text{C}^2} \right] \quad (9)$$

Wie den Gleichungen (5) und (8) zu entnehmen ist, nimmt die Feldstärke umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung r ab.

Kommen wir zu den Kräften. Zwischen zwei Ladungen  $q_1$  und  $q_2$  wirkt die sogenannte „Coulomb-Kraft“  $F_C$ . Sie berechnet sich zu:

$$F_C \text{ [N]} = \frac{k \times q_1 \times q_2}{r^2} \quad (10)$$

Gleichung (10) ist das bekannte „Coulomb-Gesetz“. Sind beide Ladungen von gleicher Polarität, so ist  $F_C$  abstoßend, bei Ladungen entgegengesetzter Polarität anziehend.

Eine elektrische Ladung q erfährt im elektrischen Feld E eine Kraft  $F_E$ . Sie berechnet sich zu:

$$F_E \text{ [N]} = E \times q \quad (11)$$

Neben der Dimension Volt pro Meter für die Feldstärke E hat E, entsprechend Gleichung (11), auch die Dimension Newton pro Coulomb. Zur Umrechnung von Newton pro Coulomb in Volt pro Meter berücksichtigt man, dass Kraft gleich Energie (Joule) pro Meter und Joule gleich Watt (Volt mal Ampere) mal Sekunde ist. Damit erhält man:

$$\frac{\text{N}}{\text{C}} = \frac{\text{J}}{\text{A s m}} = \frac{\text{W s}}{\text{A s m}} = \frac{\text{V A s}}{\text{A s m}} = \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (12)$$

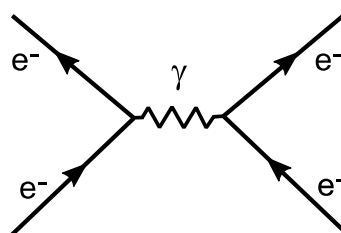
Eine bewegte Ladung  $q$  erfährt in einem Magnetfeld die sogenannte „Lorentz-Kraft“  $F_L$ , die senkrecht zur Bewegungsrichtung der Ladung und zu den Magnetfeldlinien wirkt. Sie berechnet sich zu:

$$F_L \text{ [N]} = q \times v \times B \times \sin\alpha \quad (13)$$

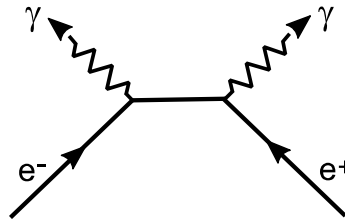
mit den Größen  $v$  gleich der Geschwindigkeit der bewegten Ladung und  $B$  gleich der magnetischen Flussdichte.  $\alpha$  ist der Winkel zwischen der Bewegungsrichtung der Ladung und der Richtung des Magnetfeldes. Ist  $\alpha$  gleich Null, d.h. die Ladung bewegt sich parallel zu den Magnetfeldlinien, so wird  $F_L$  gleich Null. Ladungen gleicher Polarität erfahren eine Lorentz-Kraft in die gleiche Richtung, ungleiche Ladungen in zueinander entgegengesetzte Richtungen. Die Kräfte  $F_E$  und  $F_L$  tragen im sogenannten „Lorentz-Kraft-Gesetz“ zur Gesamtelektromagnetischen Kraft  $F$  bei. Es gilt:

$$F \text{ [N]} = F_E + F_L = E \times q + q \times v \times B \times \sin\alpha \quad (14)$$

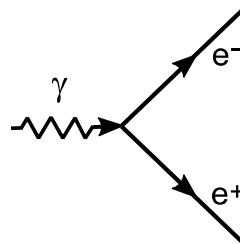
Die klassische Quantenmechanik beschreibt vornehmlich die wechselseitige Verflechtung elektrischer und magnetischer Felder sowie die damit zusammenhängenden Kräfte. Ein darüber hinausgehendes, vertieftes Verständnis des Elektromagnetismus ermöglicht jedoch erst die Quantenfeldtheorie. So erklärt die Quantenelektrodynamik die Wechselwirkung zwischen Ladungen mit dem Austausch von Feldquanten, sogenannten Eichbosonen. Bei der elektromagnetischen Wechselwirkung fungieren virtuelle Photonen als Austauschteilchen. Sie übertragen sowohl Energie als auch Impuls. Das folgende Feynman-Diagramm veranschaulicht, wie bei der Elektron-Elektron-Streuung, bei der zwei Elektronen aufeinander zu und dann wieder auseinander fliegen, ein Photon ausgetauscht wird:



Photonen entstehen auch bei der Zerstrahlung eines Elektrons mit seinem Antiteilchen, dem Positron. Man bezeichnet diesen Prozess auch als „Paarvernichtung“:



Schließlich kann ein Photon mit einer Mindestenergie von 1,022 MeV in ein Elektron-Positron-Paar zerfallen:



Neben den aufgezeigten Prozessen gibt es noch eine Vielzahl weiterer Prozesse, bei denen ein Austausch von Photonen stattfindet, so z.B. die elastische Elektron-Myon-Streuung oder den Zerfall des neutralen Pions in zwei Gamma-Quanten bzw. in ein Elektron-Positron-Paar und ein Gamma-Quant.

Die Stärke, mit der Ladungen mittels elektromagnetischer Kräfte miteinander wechselwirken, wird bestimmt von der von dem Physiker Arnold Sommerfeld 1916 eingeführten dimensionslosen Feinstrukturkonstanten  $\alpha$ . Ihr Wert berechnet sich zu:

$$\alpha = \frac{1}{2c\epsilon_0} \times \frac{e^2}{h}$$

wobei  $c$  die Vakuumlichtgeschwindigkeit,  $e$  die Elementarladung,  $\epsilon_0$  die elektrische Feldkonstante des Vakuums und  $h$  das Plancksche Wirkungsquantum bedeuten. Damit ergibt sich für  $\alpha$  der Wert:  $7,297\ 352\ 5698 \cdot 10^{-3} \approx 1/137$ . Im Vergleich zur Starken Wechselwirkung ist die elektromagnetische Kraft demnach um den Faktor 1/137 schwächer.

Da der Wert von  $\alpha$  ganz entscheidend für die Physik und die Erscheinung der Welt als Ganzes ist, wird immer wieder diskutiert, ob  $\alpha$  eine Konstante ist oder in der Frühzeit des Universums einen anderen Wert hatte. Eine eindeutige Antwort steht

bislang noch aus. In erster Näherung gilt: Im Rahmen der Messgenauigkeit ist  $\alpha$  konstant. Bei näherer Betrachtung könnte sich  $\alpha$  aber doch geändert haben. So wird von Untersuchungen berichtet, die nahelegen, dass die „Konstante“ vor einigen Milliarden Jahren um den Faktor  $7 \times 10^{-6}$  kleiner war. Allerdings konnte anhand von Laborexperimenten und der Vermessung von Quasar-Absorptionslinien die relative zeitliche Veränderung auf maximal  $10^{-15}$  bis  $10^{-17}$  pro Jahr eingeschränkt werden. Eine Änderung von  $\alpha$  wäre vornehmlich an einer Verschiebung der Spektrallinien der Elemente zu erkennen.

Photonen besitzen keine Ruhemasse. Infolgedessen ist die Reichweite der elektromagnetischen Kraft unendlich. In den meisten Fällen wird jedoch die von einer Ladung auf andere Ladungen wirkende Kraft durch den Einfluss benachbarter Ladungen entgegengesetzter Polarität neutralisiert, sodass nach außen keine Kraftwirkung zu beobachten ist (Beispiel: Atom mit positiv geladenem Kern und einer Elektronenhülle mit gleich großer, aber entgegengesetzter Ladung).