

## Maxwellgleichungen und die Lorentz-Kraft

Fast alle Wirkungen von Elektrizität und Magnetismus können durch einige wenige Grundaussagen beschrieben werden: Die Maxwell-Gleichungen und die Lorentz-Kraft. Diese Gleichungen zeigen die Beziehungen zwischen dem elektrischen Feld, dem Magnetfeld, elektrischen Ladungen und elektrischen Strömen.

### a) Maxwell-Gleichungen:

- 1) Ein zunehmendes Magnetfeld ist wird von einem elektrischen Feld umgeben.
- 2) Ein zunehmendes elektrisches Feld wird von einem Magnetfeld umgeben.
- 3) Ein elektrischer Strom wird von einem Magnetfeld umgeben.
- 4) Elektrische Feldlinien gehen von positiven elektrischen Ladungen aus und enden in negativen elektrischen Ladungen. Es gibt elektrische Feldlinien ohne Anfang und Ende. sie sind entweder geschlossen oder unendlich ausgedehnt.
- 5) Magnetische Feldlinien sind immer geschlossen oder unendlich ausgedehnt.

### b) Lorentz-Kraft

- 6) Eine positive elektrische Ladung wird von einem elektrischen Feld mitgezogen.
- 7) Eine bewegte positive elektrische Ladung wird von einem Magnetfeld seitlich abgelenkt.

## Handbewegungen illustrieren diese Gleichungen

Handbewegungen symbolisieren dies Gleichungen und helfen, sie zu lernen, und geben die richtigen Richtungen an..

Dabei gilt folgendes:

Elektrisches Feld: flache rechte Hand, Feldrichtung in Richtung der Fingerspitzen

Magnetfeld: flache linke Hand, Feldrichtung in Richtung der Fingerspitzen

zunehmendes Feld: Die Hand bewegt sich vorwärts.

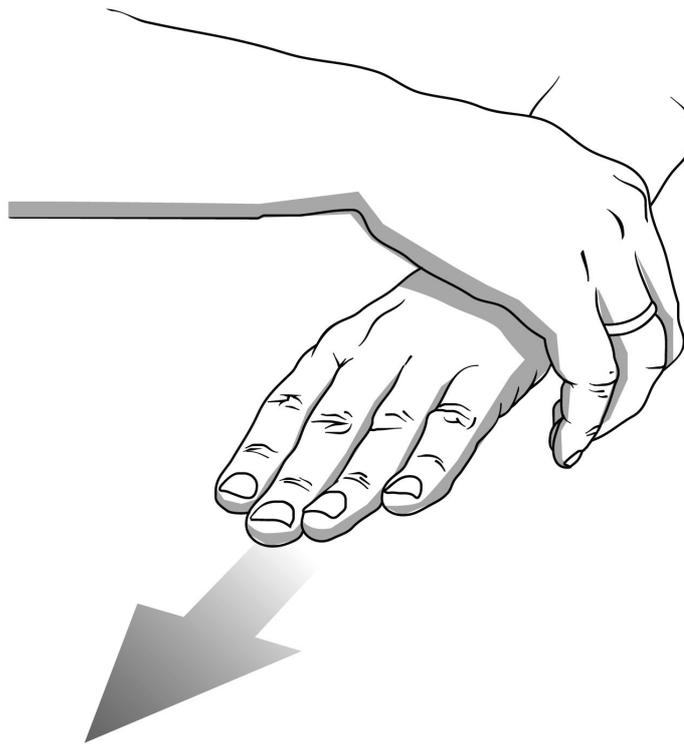
positive elektrische Ladung: Die Finger der rechten Hand sind ausgestreckt und laufen zusammen.

negative elektrische Ladung: Die Finger der rechten Hand sind nach innen gebogen und laufen zusammen.

elektrischer Strom: der ausgestreckte Zeigefinger der rechten Hand, technische Stromrichtung zur Fingerspitze

Diese Handbewegungen wurden gezeichnet von Herrn Olaf Zwätz (früher: Abtsgäßchen 14, 60594 Frankfurt am Main, heute: Kiesstraße 5, 60486 Frankfurt am Main, Deutschland), Tel. Nr. 069/96741380

1) Ein zunehmendes Magnetfeld wird von einem elektrischen Feld umgeben.



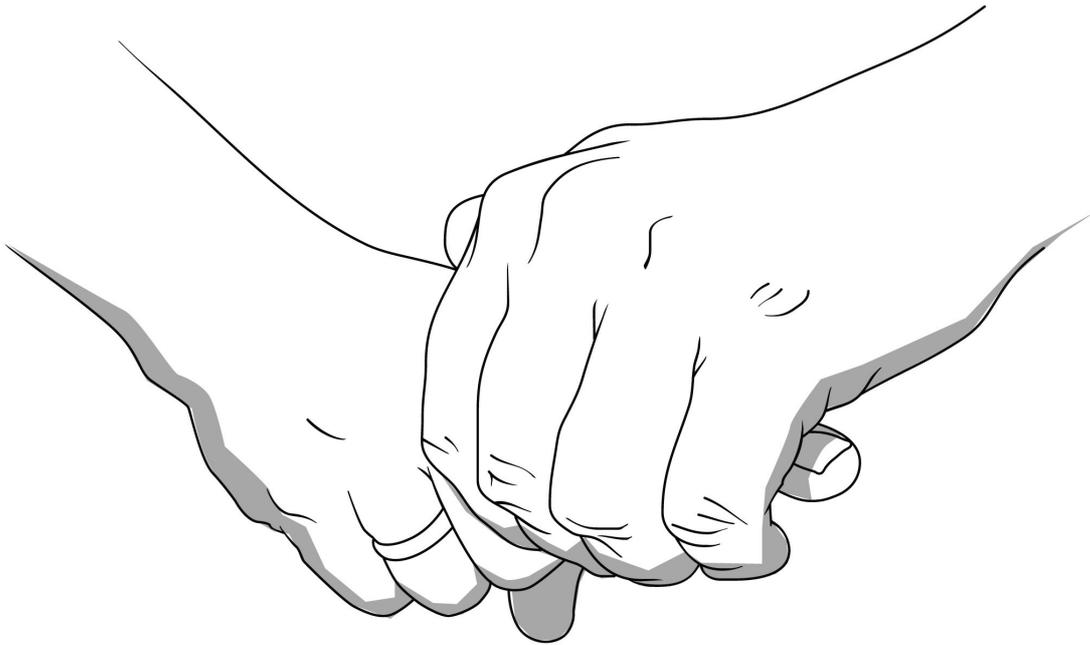
Die flache linke Hand (Magnetfeld) geht nach vorne (*nimmt zu*), während sie die rechte Hand (*elektrisches Feld*) mit der Handfläche nach innen umfasst.

2) Ein zunehmendes elektrisches Feld wird von einem Magnetfeld umgeben.



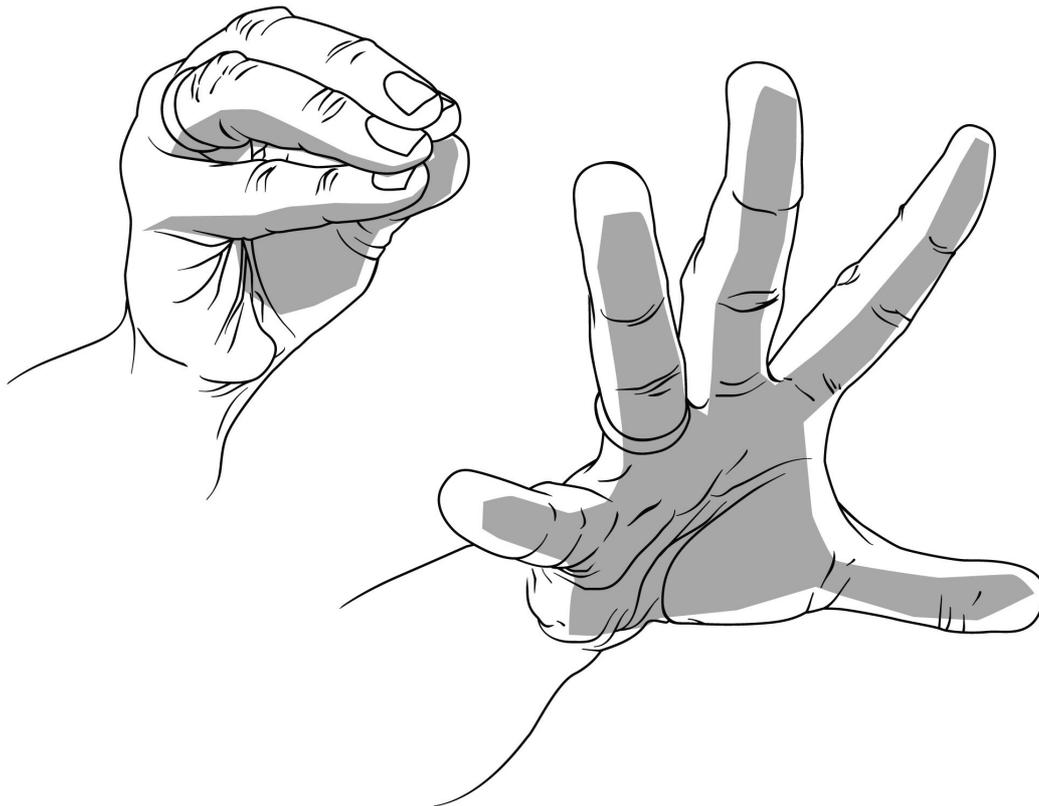
Die ausgestreckte flache rechte Hand (*elektrisches Feld*) geht vorwärts (*nimmt zu*), während sie die linke Hand (*Magnetfeld*) mit der Handfläche nach innen umfasst.

3) Ein elektrischer Strom wird von einem Magnetfeld umgeben.



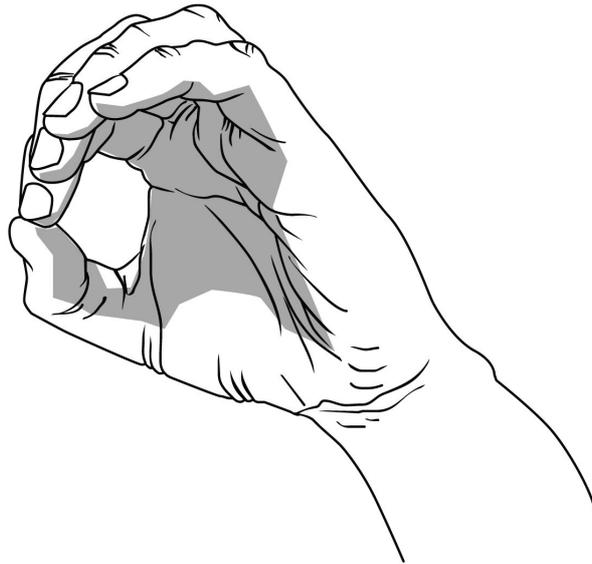
Die linke Hand (*Magnetfeld*) umfasst den ausgestreckten Zeigefinger der rechten Hand (*elektrischer Strom*).

4) Elektrische Feldlinien gehen aus von positiven elektrischen Ladungen und enden in negativen elektrischen Ladungen. Es gibt elektrische Feldlinien ohne Anfang und Ende; sie sind entweder geschlossen oder unendlich ausgedehnt.



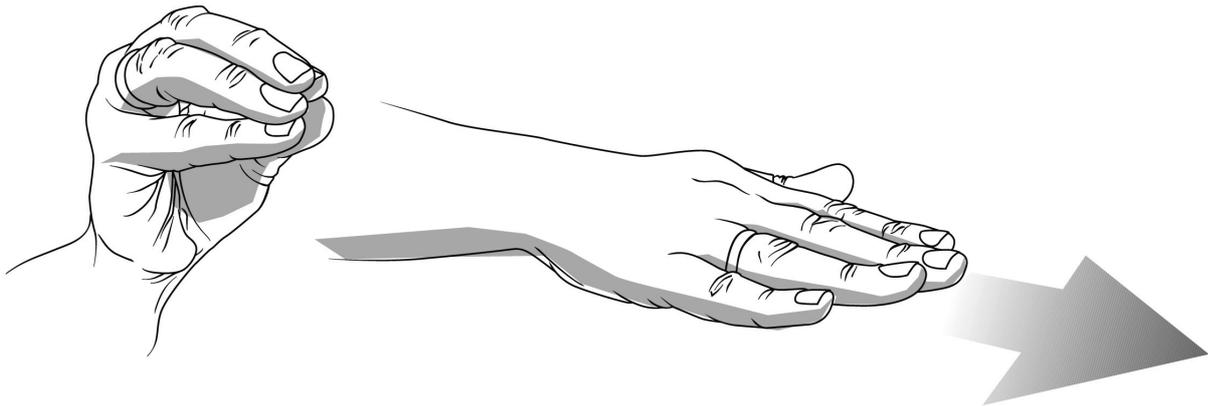
Die gespitzte und geschlossene rechte Hand (*positive elektrische Ladung*) öffnet und spreizt sich (*Die elektrischen Feldlinien gehen von der Ladung aus.*). Dann kommen die Finger wieder zusammen, aber diesmal eingebogen (*Die elektrischen Feldlinien enden in negativen elektrischen Ladungen.*). Danach bilden Daumen und Zeigefinger der rechten Hand einen Kreis (*elektrische Feldlinien können geschlossen sein ...*) und beide Arme werden zur Seite gestreckt (*... oder unendlich*).

5) Magnetische Feldlinien sind immer geschlossen oder unendlich ausgedehnt.



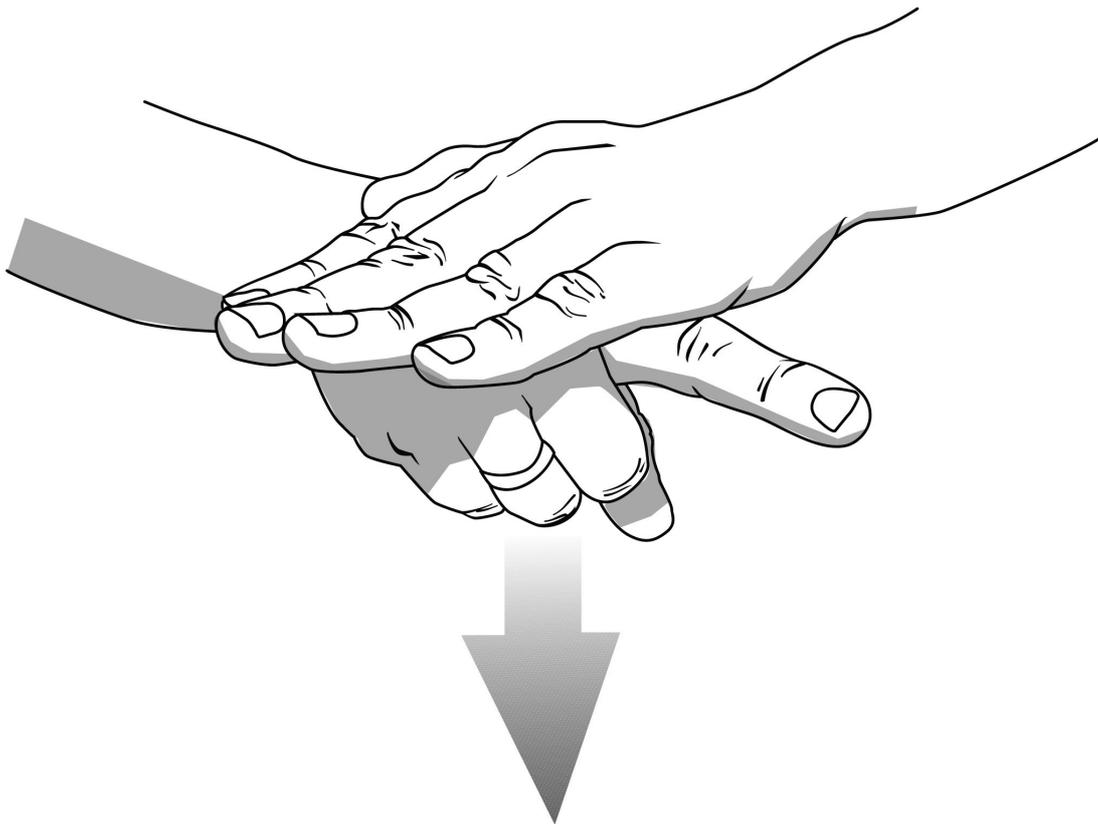
Zeigefinger und Daumen der linken Hand (*magnetische Feldlinien*) bilden einen Kreis (*sind geschlossen ...*), und dann werden beide Arme seitlich ausgestreckt (*... oder sind unendlich*).

6) Eine positive elektrische Ladung wird mit dem elektrischen Feld mitgezogen.



Die geschlossene gespitzte rechte Hand (*positive elektrische Ladung*) bewegt sich vorwärts (*wird mitgezogen ...*) und wird zur flachen Hand (*... vom elektrischen Feld*). Diese Bewegung sollte vor der Brust seitlich erfolgen, damit sie nicht als Hitlergruß missverstanden werden kann.

7) Eine bewegte Ladung wird seitlich abgelenkt.



Der ausgestreckte Zeigefinger der rechten Hand (*elektrischer Strom oder eine positive elektrische Ladung, die sich in Richtung des Zeigefingers bewegt*) wird von der flachen rechten Hand (*Magnetfeld*) senkrecht zu ihr nach unten weggedrückt (*seitlich abgelenkt*).

Diese Handbewegung dürfte deutlich anschaulicher sein als die bekannte 3-Finger-Regel, die denselben Tatbestand beschreibt.

### Beispiele für diese 7 Aussagen

Diese sieben Aussagen erfassen nahezu alles in Bereich von Elektrizität und Magnetismus.

Aussage 3) bedeutet, dass wir ein Magnetfeld durch einen Draht erzeugen können, durch den ein elektrischer Strom fließt. dies ist besonders wirksam, wenn dieser Draht zur Spule aufgewickelt ist. Wir haben so einen elektrischen Magneten oder Elektromagnet.

Aussage 1) wird als Induktion bezeichnet. Sie wird in einem Transformator verwendet, um die Stromstärke und die Spannung eines elektrischen Stroms umzuwandeln, z. B. in einem Netzteil, das elektrische Ströme von 230 V umwandelt in Ströme von 9 V.

Die Aussagen 1) and 2) bewirken zusammen die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen: Ein sich änderndes elektrisches Feld erzeugt um sich her ein sich änderndes Magnetfeld. Dieses sich ändernde Magnetfeld erzeugt seinerseits um sich her wieder ein sich änderndes elektrisches Feld, das seinerseits um sich her wieder ein sich änderndes Magnetfeld erzeugt, u. s. w.. Auf diese Weise erhalten wir gekoppelte elektrische und magnetische Felder, die mit nahezu 300 000 km/s durch den Raum rasen. Dies sind Radiowellen, Mikrowellen, Infrarot-Strahlung, sichtbares Licht, UV-Strahlung, Röntgenstrahlung und Gamma-Strahlung. Sie werden verwendet für die Ausbreitung von Radio- und Fernsehsendungen, und sie enthalten sehr wenig oder viel Energie, z. B. in der Mikrowelle oder in der Strahlung, die von der Sonne durch den Weltraum auf unsere Erde gelangt.

Zwei einander gegenüberliegende parallele Metallplatten, die gegeneinander isoliert sind, speichern Energie, wenn die eine Platte positiv, und die andere negativ geladen ist. Diese Vorrichtung wird als Kondensator bezeichnet. Werden beide Platten durch einen Draht elektrisch leitend verbunden, fließen die überzähligen Elektronen der einen Platte zur anderen Platte, und der Kondensator verliert Energie. Ist der Draht jedoch als Spule aufgewickelt, erzeugt die Bewegung der geladenen Elektronen ein Magnetfeld um die Spule, das Energie trägt. Dieses Magnetfeld bewirkt jedoch eine weitere Bewegung der Elektronen, die dann wieder zur Aufladung des Kondensators führt. bis die Energie im Magnetfeld aufgebraucht ist. Diese Ladung des Kondensators führt dann wieder zu einer Entladung durch die Spule hindurch und zu einer Übertragung von Energie an das Magnetfeld u.s.w.. Somit wechselt die Energie ständig ihren Platz. Man nennt dies einen Schwingkreis.

Aussage 7) erklärt, warum uns das Magnetfeld der Erde vor gefährlichen geladenen Teilchen mit hoher Energie aus dem Weltraum schützt. Im Weltraum fliegen viele Teilchen mit hoher Energie, die u. a. von der Sonne kommen. Durch das Magnetfeld der Erde werden sie zu Spiralbahnen um die Feldlinien der Erde herum gezwungen und können so nicht die Erde erreichen.

### Einige Gedanken zur Verwendung von Maxwell-Gleichungen und Lorentz-Kraft in dieser Form in Physikunterricht.

Üblicherweise werden Elektrizität und Magnetismus im Physikunterricht durch Lehrerversuche oder Schülerversuche demonstriert, aus denen dann aus den Messungen ein Gesetz nach dem anderen hergeleitet wird. Der Nachteil dabei ist, dass die Schüler auf diese Weise eine Vielzahl unverbundener Informationen lernen müssen. In vielen Fällen führen Zeitmangel und die begrenzte Messgenauigkeit der schulischen Messgeräte den Beweis eines bestimmten Gesetzes schwer oder kaum glaubhaft. Meist wird Aussage 2) überhaupt nicht gelehrt. Meiner Erfahrung nach dürfte sich ein Physiklehrer oft Illusionen machen, wenn er meint, durch Experimente im Unterricht

## Physik verständlich erklärt: 11 Maxwell-Gleichungen und die Lorentz-Kraft 10

physikalische Gesetze bewiesen zu haben. Die Schüler haben vieles einfach „zu glauben“.

Als der Nobelpreisträger Richard P. Feynman am California Institute of Technology 1962 - 1963 an Studenten im 2. Studienjahr Elektrizität und Magnetismus unterrichten musste, beschritt er einen neuen Weg. Nach einer kurzen Einführung in die elektrischen und magnetischen Felder und die dafür nötige Mathematik begann er damit, dass er die Maxwell-Gleichungen in differentieller Form und die Lorentz-Kraft darstellte. Diese Gleichungen benutzte er dann als Ausgangspunkt und Grundlage für alle seine Ausführungen zum Thema. Als ich an der Universität Erlangen-Nürnberg Mathematik und Physik studierte, folgte Prof. Wegener in seiner Einführung in die Physik im 2. Semester (1970) diesem Vorbild, allerdings in mathematisch einfacherer Form (integrale Form der Maxwell-Gleichungen). Für mich wurde dies ein phantastischer und sehr hilfreicher Einstieg, um einen wesentlichen Anteil der Physik wirklich zu verstehen. Als ich mich dann 1993 entschloß, Physiklehrer zu werden und die entsprechende Ausbildung mit Studium und Referendariat nachzuholen, dachte ich darüber nach, wie die Maxwell-Gleichungen Oberschülern helfen könnten, Physik zu verstehen. Ich entwickelte einen entsprechenden Physikkurs für die Sekundarstufe II. Wir begannen mit der Einführung von elektrischen und magnetischen Feldern und führten dann Maxwell-Gleichung und Lorentz-Kraft in der hier dargestellten qualitativen Form ein. Danach wurde jede Stunde im Kurs mit einem Stundeneingangsritual begonnen, bei dem die Klasse aufstand und im Chor die Sätze aufsagte und dazu die begleiteten Handbewegungen machte. Danach wurde der Kurs in Elektrizität und Magnetismus in der traditionellen Form mit Versuchen weitergeführt. Nach einigen Stunden fragte ich die Schüler, ob sie das Eingangsritual nicht satt hatten, aber sie wollten es gerne weitermachen.

Meines Erachtens hat dieser Ansatz folgende Vorteile: Die qualitativen Aussagen sind leicht zu verstehen, sobald die Schüler verstanden haben, was ein Feld ist. Die Schüler haben eine zentrale Struktur, für alles, was sie in Elektrizität und Magnetismus zu lernen haben. Dies macht es wesentlich leichter, die Einzelheiten zu lernen. Und diese Struktur ist die wirkliche Struktur des Gegenstandes. Die Schüler können sehen, dass eine sehr beschränkte Anzahl von Aussagen ein gewaltiges Feld von Wissen erschließt. Dies ist ein zentrales Merkmal von Physik, das die Schülern wohl in den allermeisten Fällen kaum erlebt und verstanden haben. In meinen Augen überwiegen damit die Vorteile dieses Ansatzes bei weitem das, was für den traditionellen Ansatz spricht.

### Literature:

Feynman, Richard P., Leighton, Robert B., Sands, Matthew: The Feynman Lectures on Physics. Vol. II. Mainly Electromagnetism and Matter. Addison-Wesley Publishing Company Reading Massachusetts, Menlo Park California, London, Sidney, Manila 1963.