Der Karlsruher Physikkurs

für die Sekundarstufe II

Neuauflage 2019

Elektrodynamik

Der Karlsruher Physikkurs

Ein Lehrbuch für den Unterricht in der Sekundarstufe II

- **Elektrodynamik**
- Thermodynamik
- Schwingungen, Wellen, Daten
- Mechanik
- Atomphysik, Kernphysik, Teilchenphysik

Herrmann

Der Karlsruher Physikkurs

Auflage 2019

Bearbeitet von Prof. Dr. *Friedrich Herrmann* und *Dr. Holger Hauptmann*

Abbildungen: *F. Herrmann* und *H. Schwarze*

Layout: *H. Schwarze*

INHALT

1 Das elektrische Feld

2 Das magnetische Feld

3 Das Zusammenspiel von elektrischen und magnetischen Feldern

Anhang

1 DAS ELEKTRISCHE FELD

1.1 Wiederholung: der elektrische Stromkreis

Wir beginnen damit, uns einiges ins Gedächtnis zurückzurufen. Nur ab und zu wirst du in diesem Abschnitt etwas antreffen, was du nicht schon von früher her kennst.

Abb. 1.1a. zeigt eine Glühlampe, die über einen Schalter an eine Batterie angeschlossen ist. Von der Batterie gelangt die Energie mit dem Träger Elektrizität zur Lampe. Sie wird dort auf den Energieträger Licht umgeladen. Die Energie kommt aus der Batterie, sie gelangt zur Lampe und verlässt die Lampe mit dem Licht. Die Batterie wird dabei langsam leer, d.h. ihr Energieinhalt nimmt ab.

Der Träger der Energie, die Elektrizität, nimmt einen anderen Weg: Sie fließt „im Kreis herum". Sie kommt an einem der beiden Kontakte, dem Pluskontakt, aus der Batterie heraus, fließt durch den einen Draht zur Lampe, dann durch den Glühfaden hindurch, weiter durch den zweiten Draht über den Schalter zum Minuskontakt der Batterie, und durch die Batterie hindurch wieder zum Pluskontakt. Weil sich die Elektrizität hier auf einem geschlossenen Weg bewegt, ohne sich irgendwo anzuhäufen, nennt man die ganze Anordnung einen elektrischen Stromkreis. Den Strom der Elektrizität nennt man auch kurz den elektrischen Strom.

Ein elektrischer Stromkreis hat viel Ähnlichkeit mit einem Hydraulikstromkreis, wie er zum Beispiel bei einem Bagger anzutreffen ist, Abb. 1.2a. Auch hier fließt der Energieträger, nämlich das Hydrauliköl, in einem geschlossenen Stromkreis. Die Flussbilder, Abb. 1.1b und 1.2b lassen die Ähnlichkeit erkennen.

Wie beim Hydraulikstromkreis die Pumpe dafür sorgt, dass die Flüssigkeit strömt, so ist in unserem elektrischen Stromkreis die Batterie die Ursache für das Fließen der Elektrizität. Wir können die Batterie daher als *Elektrizitätspumpe* betrachten.

Es gibt noch andere Quellen, die Energie mit dem Träger Elektrizität abgeben, d.h. andere Elektrizitäts-

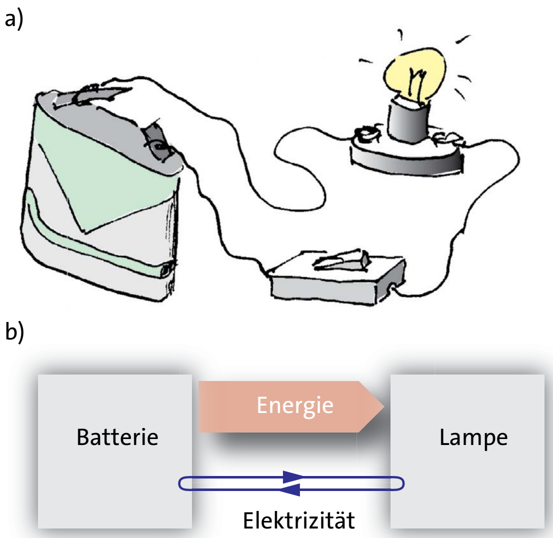


Abb. 1.1 Elektrischer Stromkreis mit Flussbild

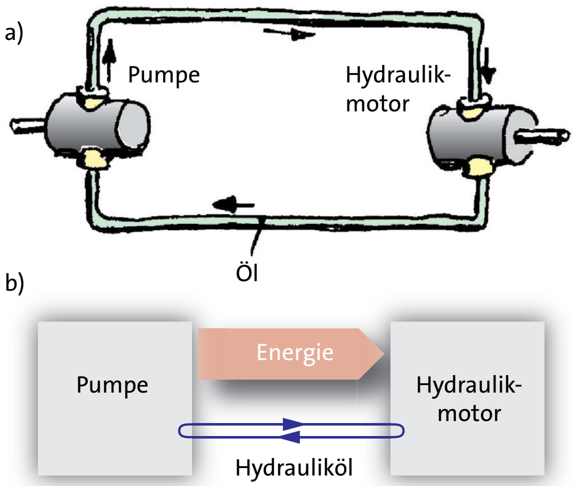


Abb. 1.2 Hydraulikstromkreis mit Flussbild

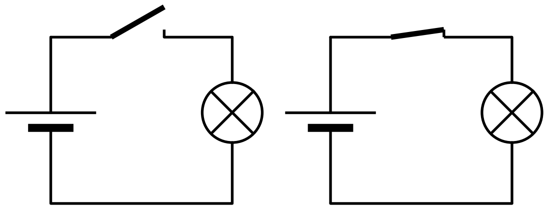


Abb. 1.3 Der Stromkreis von Abb. 1.1 mit offenem und geschlossenen Schalter in symbolischer Darstellung

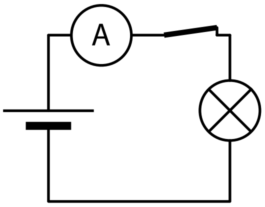


Abb. 1.4 Stromstärkemessung: Man trennt den Stromkreis durch und verbindet die beiden neu entstandenen Drahtenden mit dem Amperemeter.

pumpen. Eine ist der Fahrraddynamo. Sehr große Dynamos, wie sie in Elektrizitätswerken stehen, nennt man Generatoren. Weitere Arten von Elektrizitätspumpen sind Solarzellen und Thermoelemente. Während ein Generator seine Energie mit dem Drehimpuls bekommt, empfängt die Solarzelle ihre Energie mit dem Licht, und das Thermoelement mit der Entropie.

> Batterie, Generator, Solarzelle und Thermoelement sind Elektrizitätspumpen.

Wenn man es viel mit elektrischen Stromkreisen zu tun hat, ist es zweckmäßig, die verschiedenen Bauteile symbolisch darzustellen. Abb. 1.3 zeigt den Stromkreis von Abb. 1.1 in symbolischer Darstellung.

Die Elektrizität oder *elektrische Ladung*, wie man auch sagt, ist eine physikalische Größe. Ihr Symbol ist Q, die Maßeinheit Coulomb, abgekürzt C.
Unter der elektrischen Stromstärke I an irgendeiner Stelle eines Stromkreises versteht man die Elektrizitätsmenge (Ladungsmenge) ΔQ, die dort durch eine Querschnittsfläche des Leiters in einer bestimmten Zeitspanne Δt hindurchfließt, dividiert durch diese Zeitspanne:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Die Maßeinheit der elektrischen Stromstärke ist das Ampere (A). Es ist

$$\mathrm{A} = \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{s}}.$$

Man misst die elektrische Stromstärke mit einem Amperemeter. Ein Amperemeter wird so in einen Stromkreis eingebaut, dass der Strom durch das Messgerät hindurch fließen muss, Abb. 1.4.

Der Stromkreis von Abb. 1.3 sei zunächst unterbrochen. Wir schließen den Schalter. Es fließt elektrische Ladung durch die Lampe. Woher kommt diese Ladung? Aus der Batterie, könnte man denken, genauso wie die Energie. Tatsächlich ist es anders. Wie eine Wasserpumpe an ihrem Ausgang nur so viel Wasser abgeben kann, wie sie am Eingang aufnimmt, so kann eine Elektrizitätspumpe an ihrem Ausgang, d.h. am Pluskontakt, nur so viel Elektrizität abgeben, wie sie am Minuskontakt aufnimmt. Woher kommt also die Elektrizität?

Sie ist von vornherein in den Bauteilen des Stromkreises enthalten: in der Batterie, in der Lampe und in den Drähten. Diese Elektrizität wird aber nicht etwa vom Hersteller in diese Geräte hineingebracht; sie ist schon von Natur aus darin. Jedes Stück Draht, ja jedes Stück Metall enthält Elektrizität. Sie beginnt zu fließen, sobald man den Draht oder das Metallstück in einen Stromkreis einbaut.

1.2 Das elektrische Potenzial

Eine Wasserpumpe sorgt dafür, dass das Wasser an ihrem Ausgang einen höheren Druck hat als am Eingang, Abb. 1.5. Sie erzeugt einen Druckunterschied. Dieser Druckunterschied kann einen Wasserstrom verursachen.

Auch eine Batterie, d.h. eine Elektrizitätspumpe, erzeugt einen Antrieb: einen Antrieb für einen elektrischen Strom. Und auch hier gibt es eine Größe, die an dem einen Anschluss, dem Pluskontakt, einen höheren Wert hat als am anderen, dem Minuskontakt,

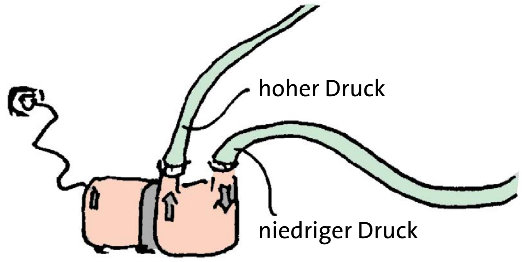


Abb. 1.5 Am Ausgang der Wasserpumpe ist der Druck höher als am Eingang.

Abb. 1.6. Diese Größe heißt elektrisches Potenzial. Das elektrische Potenzial in einem elektrischen Stromkreis entspricht dem Druck in einem Hydraulikstromkreis.

Eine Batterie erzeugt einen Potenzialunterschied, und dieser Potenzialunterschied stellt den Antrieb für einen Elektrizitätsstrom dar. Einen Potenzialunterschied nennt man auch elektrische Spannung.

> Eine Elektrizitätspumpe (Batterie, Generator) erzeugt einen Potenzialunterschied (= elektrische Spannung). Der Potenzialunterschied ist ein Antrieb für den elektrischen Strom.
>
> Der Kontakt mit dem höheren Potenzial ist mit einem Pluszeichen, der mit dem niedrigeren mit einem Minuszeichen gekennzeichnet.

Die Maßeinheit des Potenzials, und damit auch der elektrischen Spannung, ist das Volt. So erzeugt eine Monozelle einen Potenzialunterschied von 1,5 V, eine Flachbatterie macht eine Potenzialdifferenz von 4,5 V und eine Autobatterie 12 V.

Als Symbol für das Potenzial benutzt man den griechischen Buchstaben φ (sprich: fi), als Symbol der Spannung U. Für unsere Flachbatterie haben wir damit

$$\varphi_+ - \varphi_- = 4{,}5\ \text{V, oder } U = 4{,}5\ \text{V.}$$

Man misst eine Spannung mit einem Voltmeter. Man verbindet dazu die beiden Anschlüsse des Voltmeters mit den beiden Stellen verschiedenen Potenzials, Abb. 1.7. Stellen, die durch ein Kabel miteinander verbunden sind, befinden sich auf gleichem Potenzial.

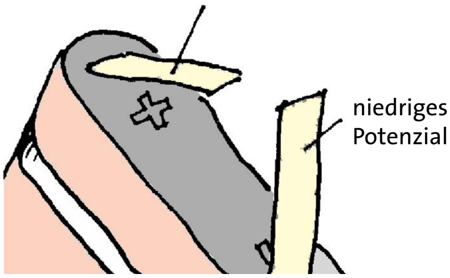


Abb. 1.6 Das elektrische Potenzial ist am Pluskontakt der Batterie (Ausgang) höher als am Minuskontakt (Eingang).

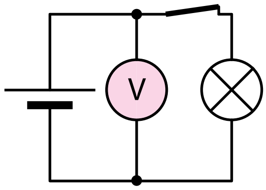


Abb. 1.7 Spannungsmessung: Man verbindet die Anschlüsse des Voltmeters mit den beiden Stellen verschiedenen Potenzials.

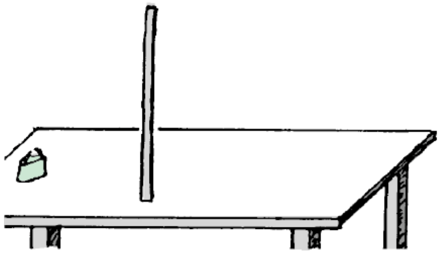


Abb. 1.8 Auf welchem Potenzial befindet sich der Pluskontakt der Batterie? In welcher Höhe befindet sich das obere Ende des Meterstabes?

1.3 Der Potenzialnullpunkt

Vor dir auf dem Tisch steht eine volle Flachbatterie. Der Potenzialunterschied zwischen ihren Anschlüssen ist 4,5 V, das Potenzial am Pluskontakt ist also um 4,5 V höher als am Minusanschluss. Wie groß ist aber das Potenzial des Minuskontakts selbst? Und wie groß ist das Potenzial des Pluskontakts?

Diese Fragen sind nicht leicht zu beantworten. Die Lösung des Problems wird uns aber leichter fallen, wenn wir zunächst eine andere Frage klären. Abb. 1.8 zeigt einen Meterstab, der senkrecht auf einem Tisch steht; wir stellen die Frage: In welcher Höhe befindet sich das obere Ende des Meterstabes?

Alles, was wir im Augenblick sagen können ist, dass sich das obere Ende 1 m über dem unteren befindet. Aber in welcher Höhe befindet sich das untere Ende?

Die Antwort auf diese Frage hängt davon ab, worauf wir uns beziehen: auf den Fußboden des Zimmers, auf das Niveau der Erde außerhalb des Hauses oder auf noch irgendein anderes Niveau. Du weißt sicher, dass es üblich ist, Höhenangaben eines Geländes auf die Meeresoberfläche zu beziehen. Man setzt die Höhe der Meeresoberfläche willkürlich gleich 0 m. Wir könnten nun im Prinzip die Höhe des oberen Endes unseres Stabes in Bezug auf die Meeresoberfläche angeben. Tatsächlich ist aber der Abstand zum Meeresniveau im Allgemeinen nicht leicht festzustellen.

Mit dem Potenzial verhält es sich ganz ähnlich wie mit der Höhe. Wir müssen als Erstes festlegen, welchem elektrischen Leiter wir den Potenzialwert 0 V zuschreiben. Von diesem ausgehend, kann man dann die Potenzialwerte aller anderen Drähte, elektrischen

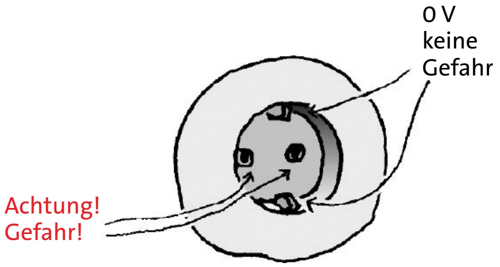


Abb. 1.9 Der Schutzkontakt der Steckdose befindet sich auf Erdpotenzial.

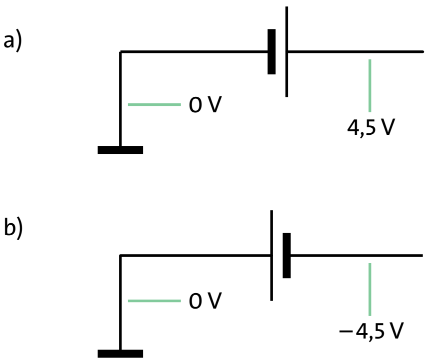


Abb. 1.10 (a) Minuskontakt der Batterie geerdet; Pluskontakt auf + 4,5 V. (b) Pluskontakt geerdet; Minuskontakt auf – 4,5 V.

Anschlüsse usw. angeben. Der Leiter, dessen Potenzial wir zum Bezugspotenzial erklären, soll natürlich jedem zugänglich sein. Ein Leiter, der diese Bedingung erfüllt, ist die Erde. Man hat daher festgelegt:

> Das Potenzial der Erde beträgt 0 V.

Verbindet man irgendeinen Punkt eines elektrischen Stromkreises über einen Draht mit der Erde, so ist sichergestellt, dass sich dieser Punkt auf 0 Volt befindet. Man sagt, man hat den Punkt *geerdet*.

Um etwas zu erden, braucht man aber nicht einmal eine Leitung zur Erde zu legen. Der Schutzkontakt der Steckdose ist mit dem so genannten Nullleiter des elektrischen Netzes verbunden, und dieser Nullleiter ist geerdet. Auch der Schutzkontakt der Steckdose befindet sich also auf 0 V, Abb. 1.9.

Nun zurück zu der Batterie, die vor dir auf dem Tisch steht. Wir kennen nach dem bisher Gesagten die Potenzialwerte von Plus- und Minuskontakt einzeln nicht, genauso wie wir die Höhenlagen der Enden des Meterstabes nicht kennen. Wir können aber bei der Batterie leicht klare Verhältnisse schaffen: Wir erden einfach einen der beiden Anschlüsse. Abb. 1.10a zeigt eine Flachbatterie, deren Minuskontakt geerdet ist,

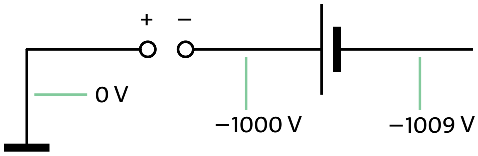


Abb. 1.11 Der Pluskontakt der Batterie hat ein Potenzial von –1000 V.

d.h. es ist

$$\varphi_- = 0 \text{ V.}$$

Für den Plusanschluss ist daher

$$\varphi_+ = 4{,}5 \text{ V.}$$

In Abb. 1.10b ist der Pluskontakt geerdet. Daher ist hier

$$\varphi_+ = 0 \text{ V}$$

und

$$\varphi_- = -\,4{,}5 \text{ V.}$$

Das Potenzial des Minuskontakts ist jetzt also negativ. In beiden Fällen, d.h. in den Abbildungen 1.10a und 1.10b ist natürlich

$$\varphi_+ - \varphi_- = 4{,}5 \text{ V.}$$

Die Wörter Pluskontakt und Minuskontakt (oder Pluspol und Minuspol) haben sich eingebürgert, sind aber etwas irreführend. Sie legen nahe, dass sich der Pluskontakt auf positivem und der Minuskontakt auf negativem Potenzial befindet. Dass das nicht der Fall zu sein braucht, zeigt schon Abb. 1.10. In Abb. 1.10a hat der Minuskontakt das Potenzial 0 V, sein Potenzial ist also nicht negativ; und in Abb. 1.10b ist der Pluskontakt nicht positiv. In Abb. 1.11 sieht man es noch deutlicher.

Hier sind eine 9V-Batterie und ein 1000V-Netzgerät miteinander verbunden. Der Pluskontakt des Netzgeräts ist geerdet. Sein Potenzial ist also 0 V. Der Minuskontakt des Netzgeräts liegt um 1000 V tiefer, d.h. bei –1000 V. Da der Pluskontakt der Batterie mit dem Minusanschluss des Netzgeräts verbunden ist, hat auch der Pluskontakt der Batterie das Potenzial –1000 V. Das Potenzial des Pluskontakts der Batterie ist also negativ.

Abb. 1.12 zeigt einen Stromkreis, der an einer Stelle geerdet ist.

Aufgaben

1. Jede der Batterien in Abb. 1.13a erzeugt eine Spannung von 4,5 V. Auf welchen Potenzialen befinden sich die Punkte 1, 2 und 3?
2. Jede der Batterien in Abb. 1.13b erzeugt eine Potenzialdifferenz von 12 V. Auf welchen Potenzialen befinden sich die Punkte 1, 2 und 3?
3. Jede der beiden Batterien in Abbildung 1.14a erzeugt 9 V. Welche Spannung zeigen die drei Voltmeter an?
4. Zeichne in Abb. 1.14b ein Voltmeter ein, das die Spannung zwischen den Anschlüssen der Lampe misst. Zeichne ein Voltmeter ein, das die Batteriespannung misst.
5. Nenne Beispiele für Stromkreise, die man nicht erden kann.

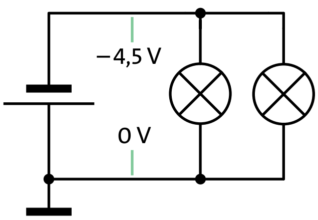


Abb. 1.12 Stromkreis, der an einer Stelle geerdet ist

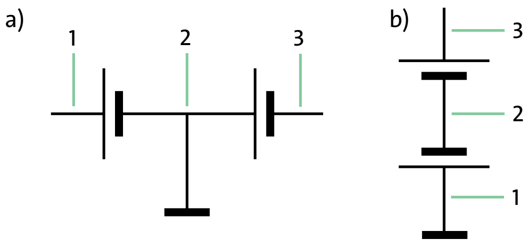


Abb. 1.13 Zu den Aufgaben 1 und 2

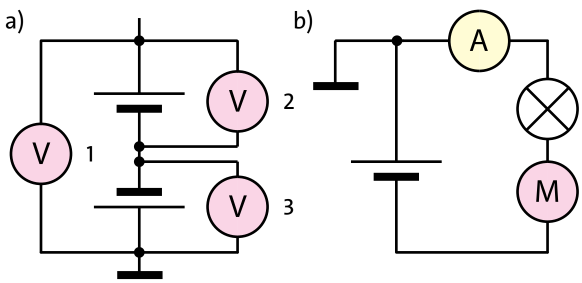


Abb. 1.14 Zu den Aufgaben 3 und 4

1.4 Elektrotechnische Probleme

Es geht um eine Methode, die einem das Lösen elektrotechnischer Probleme erleichtert.

Immer wenn der Plan einer elektrischen Anordnung (der „Schaltplan") vorgegeben ist, werden als erstes die Leitungen farbig nachgezeichnet, und zwar so, dass alle Leitungen, die dasselbe Potenzial haben, auch mit derselben Farbe nachgezeichnet werden. Es ist klar, dass dabei ein durchgehender Draht eine einheitliche Farbe bekommt. Beim Durchgang durch ein elektrisches Gerät (Lampe, Motor, Batterie, Generator etc.) ändert sich gewöhnlich die Farbe.

Die Abbildungen 1.15 bis 1.17 zeigen einige Beispiele.

In Abb. 1.15 ist die Batterie von Abb. 1.10 mit ihren Zuleitungen nach der neuen Methode dargestellt.

Abb. 1.16 zeigt noch einmal die Lampen von Abb. 1.12, und Abb. 1.17 zeigt einen Stromkreis, in dem vier verschiedene Potenzialwerte vorkommen.

Wir wollen das farbige Kennzeichnen der Leitungen auf zwei Probleme anwenden:

1. Die Lampen L1 und L2 in Abb. 1.16 sind gleich gebaut. An der Stelle P fließt ein Strom von 3 A. Wie groß ist die Stromstärke in Lampe L1 und wie groß in Lampe L2?

Da für die Verzweigungspunkte die Knotenregel gilt, ist $I_{L1} + I_{L2} = 3$ A. (I_{L1} und I_{L2} sind die Stromstärken in den Lampen.) Wir sehen an der farbigen Kennzeichnung, dass an beiden Lampen dieselbe Spannung liegt (nämlich dieselbe wie an der Batterie). Der elektrische Strom hat also in beiden Lampen denselben Antrieb. Da die Lampen gleich gebaut sind, müssen die Ströme in beiden Lampen dieselbe Stromstärke haben, also $I_{L1} + I_{L2} = 1{,}5$ A.

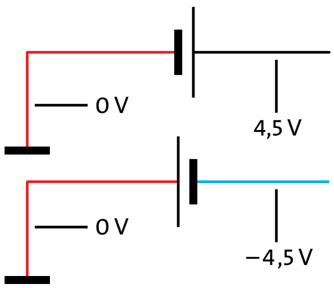


Abb. 1.15 Unterschiedliche Farben der Leitungen stehen für unterschiedliche Potenziale.

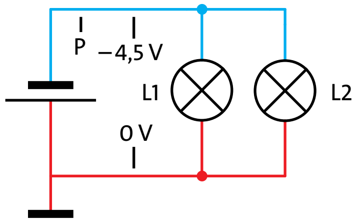


Abb. 1.16 Wie Abb. 1.12. Die Potenziale sind durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet.

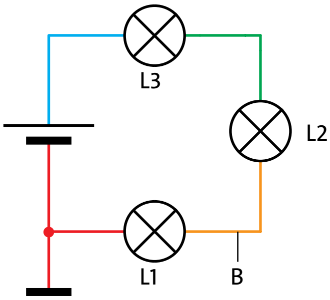


Abb. 1.17 Hier kommen vier verschiedene Potenziale vor.

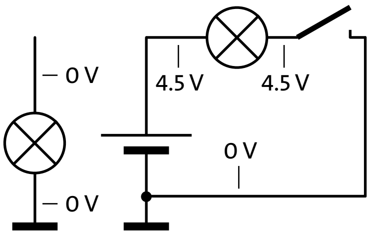


Abb. 1.18 Da durch die Lampe kein elektrischer Strom fließt, müssen sich ihre Anschlüsse auf gleichem Potenzial befinden.

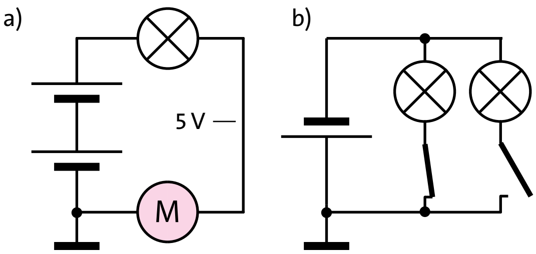


Abb. 1.19 Zu den Aufgaben 1 und 2

2. Der Leitungsabschnitt B in Abb. 1.17 befindet sich auf einem Potenzial von 6 V. Die Lampen L1, L2 und L3 sind gleichartig gebaut. Welche Spannung erzeugt die Batterie?

Da der Stromkreis nicht verzweigt ist, ist die Stromstärke überall dieselbe. Die Spannung an Lampe L1 beträgt 6 V. Sie stellt den Antrieb für den Strom durch L1 dar. Da derselbe Strom durch die Lampen L2 und L3 fließt, und diese Lampen genauso gebaut sind wie L1, braucht die Elektrizität, um durch diese Lampen hindurch zu kommen denselben Antrieb wie in Lampe L1, nämlich jeweils 6 V. Wenn man sich also vom Pluskontakt der Batterie über die drei Lampen zum Minuskontakt bewegt, geht es in drei 6V-Schritten auf 0 V hinunter. Der Pluskontakt muss daher auf 18 V liegen.

In den beiden Beispielen war das Potenzial am Eingang einer Lampe anders als am Ausgang. Diese Regel gilt aber nicht immer. Eine Lampe, durch die kein elektrischer Strom fließt, muss an Eingang und Ausgang dasselbe Potenzial haben, andernfalls flösse ja ein Strom. Abb. 1.18 zeigt zwei Beispiele.

Aufgaben

1. Die Batterien in Abb. 1.19a sind 4,5 V-Flachbatterien. Kennzeichne die Stellen gleichen Potenzials, und gib die Potenzialwerte für alle Leitungsabschnitte an.
2. Die Stärke des elektrischen Stroms, der durch die Batterie in Abb. 1.19b fließt, beträgt 1,6 A. Kennzeichne Stellen gleichen Potenzials. Wie ist die elektrische Stromstärke in den Lampen?
3. Das elektrische Potenzial an der Stelle C in Abb. 1.20 ist 20 V. Die drei Lampen sind gleichartig gebaut. Kennzeichne die Stellen gleichen Potenzials. Gib die Potenzialwerte für die Leitungsabschnitte A, B und D an. Welche Spannung liefert die Batterie? Was passiert mit den Potenzialen, wenn der Schalter geöffnet wird?
4. Die Batteriespannung in Abb. 1.21a und 1.21b beträgt 12 V. Die Lampen sind gleich gebaut. Kennzeichne die Stellen gleichen Potenzials. Welchen Wert hat das Potenzial im Punkt P? Wie groß sind die Potenzialunterschiede an den Lampen L1 und L2? Ist die Stärke des Stroms durch Lampe L1 größer wenn der Schalter geschlossen ist (Abb. 1.21a) oder wenn er offen ist (Abb. 1.21b)? Wann hat der Strom durch die Lampe L2 eine größere Stromstärke: wenn der Schalter offen ist oder wenn er geschlossen ist?
5. Die Spannung am Netzgerät in Abb. 1.22a und 1.22b beträgt 150 V, die Lampen sind gleichartig gebaut. Kennzeichne die Stellen gleichen Potenzials. Gib die Potenzialwerte aller Leitungsabschnitte an. Welche Lampe leuchtet noch wenn der Schalter geöffnet ist?

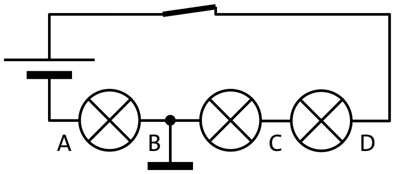


Abb. 1.20 Zu Aufgabe 3

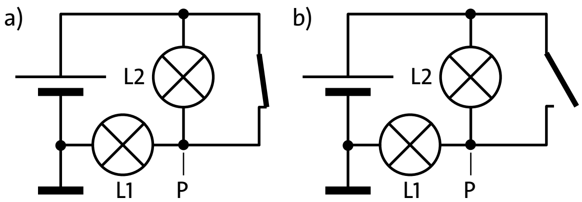


Abb. 1.21 Zu Aufgabe 4

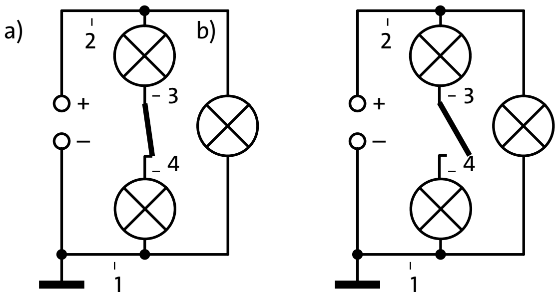


Abb. 1.22 Zu Aufgabe 5

1.5 Kennlinien – der elektrische Widerstand

Wenn man möchte, dass Elektrizität durch einen Gegenstand fließt, legt man eine Spannung an; man sorgt für einen Antrieb. Jeder Gegenstand neigt dazu, die Strömung zu behindern. Er setzt der fließenden Elektrizität einen Widerstand entgegen. Man sagt auch: Er *hat* einen Widerstand.

Manche Gegenstände haben einen großen Widerstand, sie leiten den elektrischen Strom schlecht oder gar nicht. Andere haben einen geringen Widerstand, sie leiten die Elektrizität gut.

Elektrische Kabel zum Beispiel haben einen kleinen Widerstand. Das heißt aber nicht, dass sie gar keinen Widerstand haben.

Wie der elektrische Strom, der durch einen Gegenstand hindurchfließt, auf die angelegte Spannung reagiert, kann eine komplizierte Sache sein. Wenn man die Spannung erhöht, nimmt die Stromstärke gewöhnlich zu – aber nicht immer.

Wir wollen den Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke für verschiedene elektrische Geräte untersuchen. Abb. 1.23 zeigt, wie man es macht: Man schließt den zu untersuchenden Gegenstand an ein Netzgerät an, dessen Spannung man verändern kann. Die Spannung liest man am Netzgerät ab. Die Stärke des elektrischen Stroms, den die Spannung verursacht, misst man mit einem Amperemeter. Trägt man die Stromstärkewerte über der Spannung auf, so erhält man die *Kennlinie* des untersuchten Geräts.

Abb. 1.24 zeigt die Kennlinie einer Glühlampe (oben) und einer Diode (unten). Falls du nicht weißt, wozu man eine Diode verwendet, kannst du es dir jetzt mithilfe der Kennlinie klar machen: Die Kennlinie zeigt, dass die Diode den elektrischen Strom nur in einer Richtung durchlässt. Sie ist daher für den elektrischen Strom dasselbe wie ein Fahrradventil für den Luftstrom.

Für manche Gegenstände oder Geräte ist die Stromstärke zur Spannung proportional

$$I \sim U.$$

Dieser einfache Zusammenhang gilt zum Beispiel für einen gewöhnlichen Draht – vorausgesetzt, die Stromstärke ist nicht so groß, dass sich der Draht erwärmt. Man sagt, der Draht befolge das Ohmsche Gesetz. Abb. 1.25 zeigt solche Kennlinien für zwei verschiedene, lange Drähte. Bei gleichem Antrieb ist der Strom in dem einen Draht stärker als im anderen. Der mit dem

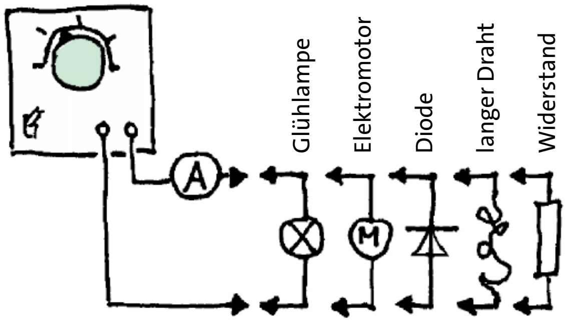


Abb. 1.23 Aufnahme von Kennlinien: Man gibt verschiedene Spannungswerte vor und misst jeweils die Stärke des durch die Spannung verursachten elektrischen Stroms.

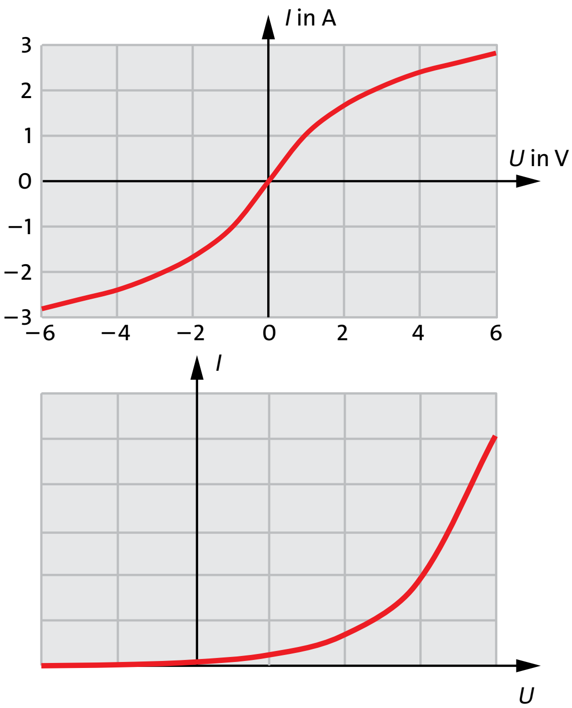


Abb. 1.24 Kennlinien einer Glühlampe (oben) und einer Diode (unten)

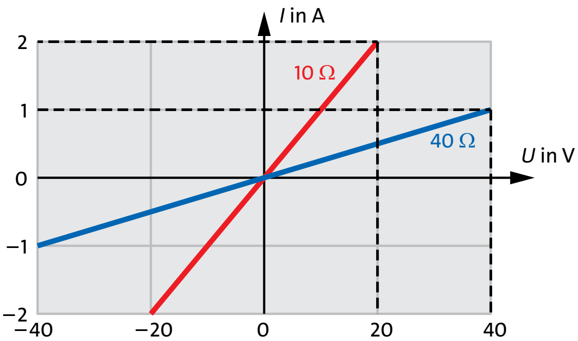


Abb. 1.25 Kennlinien von zwei langen Drähten. Sie befolgen das Ohmsche Gesetz.

stärkeren Strom hat einen kleineren Widerstand.

> Für normale elektrische Leiter ist die Spannung zwischen den Enden des Leiters proportional zur Stärke des Stroms, der durch den Leiter fließt:
>
> $I \sim U$ Ohmsches Gesetz

Man kann den Widerstand charakterisieren, indem man den Quotienten aus Spannung und Stromstärke bildet. Je größer der Widerstand des Drahtes ist, desto größer ist dieser Quotient. Wir nennen daher auch den Quotienten selbst den *Widerstand* des Drahtes, und wir bezeichnen ihn mit dem Buchstaben R. Es ist also

> Elektrischer Widerstand: $R = \dfrac{U}{I}$.

Der Widerstand R ist eine physikalische Größe. Als Maßeinheit ergibt sich Volt/Ampere (V/A). Statt der zusammengesetzten Maßeinheit Volt/Ampere benutzt man gewöhnlich das *Ohm*, abgekürzt durch den griechischen Buchstaben Ω (sprich Omega). Es ist also

$$\Omega = \text{V/A}\,.$$

Wir können damit den Widerstand unserer beiden Drähte angeben. Es ergeben sich die Widerstandswerte 10 Ω und 40 Ω.

Ist die Kennlinie eines Geräts keine Gerade, so hat es keinen Sinn, einen Quotienten U/I zu bilden. Dieser Quotient hat ja in diesem Fall für jeden Punkt der Kennlinie einen anderen Wert. Es kommt in der Elektrotechnik und in der Elektronik vor, dass man einen elektrischen Strom absichtlich „behindern" möchte. Ein Widerstand ist also erwünscht. Man stellt deshalb Geräte oder „Bauelemente" her, die keine andere Funktion haben, als einem Strom einen Widerstand entgegenzusetzen. Man nennt diese Bauelemente Widerstände. Widerstände sind so gebaut, dass sie eine lineare Kennlinie haben. Sie befolgen also das Ohmsche Gesetz, und man kann sie durch die Angabe eines Widerstandswertes, d.h. einer Ohmzahl, charakterisieren. (Im Deutschen kann man daher den etwas unschönen Satz formulieren: „Der Widerstand hat einen Widerstand von 100 Ω." Die englische Sprache ist hier etwas genauer, denn man würde sagen: „The *resistor* has a *resistance* of 100 Ω.")

Das Symbol eines technischen Widerstandes ist ein Rechteck wie in den Abbildungen 1.23 und 1.26.

Aufgaben

1. An einen unbekannten technischen Widerstand wird eine Spannung von 20 V gelegt. Man misst eine elektrische Stromstärke von 4 mA. Wie viel Ω hat der Widerstand?
2. An einen 2kΩ-Widerstand wird eine Spannung von 120 V gelegt. Wie stark ist der elektrische Strom, der durch den Widerstand fließt?
3. Durch einen 1MΩ-Widerstand fließt ein elektrischer Strom von 0,1 mA. Welche Spannung liegt am Widerstand?
4. Das Netzgerät in Abb. 1.26a erzeugt eine Spannung von 35 V. Das Amperemeter zeigt 5 A an und das Voltmeter 10 V. Wie groß ist der Widerstand R1? Wie groß ist die Spannung an Widerstand R2? Wie groß ist der Widerstand R2?
5. Die Spannung der Batterie in Abb. 1.26b beträgt 12 V. Jeder der Widerstände hat 100 Ω. Gib die Potentialwerte aller Leitungsabschnitte an. Welche Spannungen liegen an den drei Widerständen R1, R2 und R3? Wie stark sind die elektrischen Ströme, die durch die drei Widerstände fließen? Wie stark ist der elektrische Strom, der durch die Batterie fließt?
6. (a) Zwei 100Ω-Widerstände werden parallel geschaltet, Abb. 1.27a. Wie groß ist der Widerstand der gesamten Anordnung. Formuliere eine Regel.
(b) Zwei 100Ω-Widerstände werden hintereinander geschaltet, Abb. 1.27b. Wie groß ist der Widerstand der gesamten Anordnung? Formuliere eine Regel.
Kommen dir die Regeln bekannt vor?

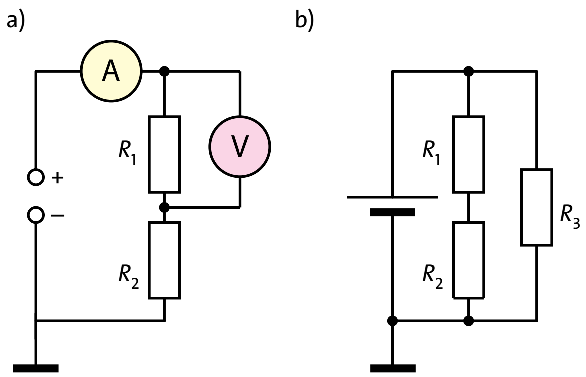


Abb. 1.26 (a) Zu Aufgabe 4; (b) zu Aufgabe 5

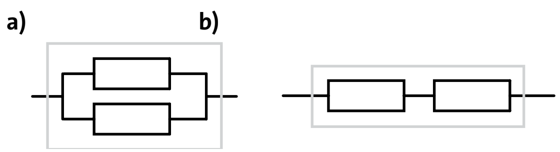


Abb. 1.27 Zu Aufgabe 6

1.6 Der Widerstand von Volt- und Amperemeter

Wir müssen uns noch einmal mit der Frage befassen, wie man mit den Messgeräten für Stromstärke und Spannung umgeht, oder genauer: Welchen Widerstand hat ein Amperemeter und welchen Widerstand hat ein Voltmeter?

Das Amperemeter wird in eine Leitung eingebaut, in der ein elektrischer Strom fließt. Durch das Einbauen soll sich an der Stromstärke nichts ändern, Abb. 1.28. Das bedeutet: Der Widerstand des Amperemeter soll möglichst klein sein. Tatsächlich ist der Widerstand auch so klein, dass man ihn in den meisten Fällen vernachlässigen kann, d.h. man kann annehmen, dass er gleich null ist.

Zum Voltmeter: Der elektrische Strom soll im Kreis fließen, d.h. durch die Batterie und die Lampe und die entsprechenden Leitungen. Es soll keine „Lecks” geben. Damit das Voltmeter nicht als Leck wirkt, muss sein Widerstand möglichst hoch sein. Tatsächlich haben Voltmeter auch einen Widerstand, der so hoch ist, dass man den Leckstrom gegen den Strom der durch die Lampe fließt, vernachlässigen kann, d.h. man kann annehmen, dass der Widerstand unendlich hoch ist.

> Amperemeter haben einen sehr niedrigen, Voltmeter einen sehr hohen Widerstand.

Aufgabe

1. Kommentiere Abbildung 1.29.

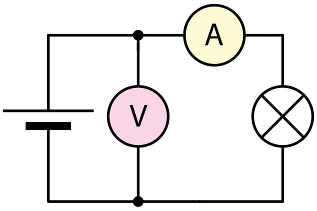


Abb. 1.28 Der Widerstand eines Amperemeters ist sehr klein, der eines Voltmeters sehr groß.

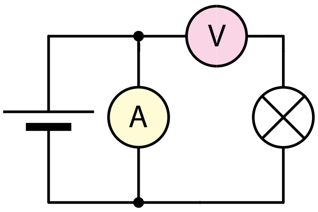


Abb. 1.29 Zur Aufgabe

1.7 Die elektrische Leitfähigkeit

Von welchen Eigenschaften eines Drahtes hängt sein Widerstand ab?

Wir schließen zunächst einen Draht mit dem Widerstand R an ein Netzgerät an, Abb. 1.30a. Es fließt ein elektrischer Strom der Stromstärke I. Wir schließen dann parallel zum ersten Draht einen zweiten an, Abb. 1.30b. Jetzt fließt in jedem der beiden Drähte ein Strom der Stromstärke I. Die Gesamtstromstärke ist also

$$I' = 2I\,.$$

Das bedeutet, dass der Widerstand R' der beiden parallelen Drähte zusammen genommen halb so groß ist wie der eines einzelnen Drahtes:

$$R' = R/2.$$

Wir können nun die beiden Drähte zusammen auch als einen einzigen mit der doppelten Querschnittsfläche auffassen, und es folgt: *Verdoppelt man die Querschnittsfläche eines Drahtes, so nimmt der Widerstand auf die Hälfte ab.*

Statt den zweiten Draht parallel anzuschließen, verbinden wir ihn nun mit dem ersten „in Reihe“, Abb. 1.30c. Beide Drähte müssen sich jetzt die Potenzialdifferenz U teilen, d.h. an jedem Draht einzeln liegt

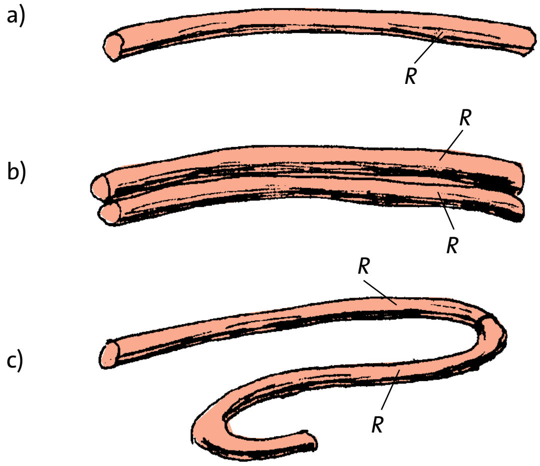


Abb. 1.30 (a) Durch den Draht mit dem Widerstand R fließt ein Strom der Stärke I. (b) Zwei parallele Drähte sind gleichwertig zu einem Draht mit der doppelten Querschnittsfläche. Der Widerstand ist halb so groß, die Stromstärke doppelt so groß wie bei a. (c) Zwei Drähte in Reihe sind gleichwertig zu einem Draht der doppelten Länge. Der Widerstand ist doppelt so groß, die Stromstärke halb so groß wie bei a.

nur noch eine Spannung $U' = U/2$. Die Stromstärke hat daher auch nur noch den halben Wert:

$$I' = I/2.$$

Das bedeutet, dass der Gesamtwiderstand R' der beiden in Reihe verbundenen Drähte, doppelt so groß ist wie der eines einzelnen Drahtes:

$$R' = 2R.$$

Wieder können wir die beiden Drähte als einen einzigen auffassen, diesmal mit der doppelten Länge, und es folgt: *Verdoppelt man die Länge eines Drahtes, so nimmt der Widerstand auf das Doppelte zu.*

Beide Ergebnisse lassen sich zusammenfassen:

$$R \sim \frac{d}{A}.$$

Hier ist d die Länge, und A die Querschnittsfläche des Leiters.

Nun hängt der Widerstand außerdem noch davon ab, aus welchem Material der Leiter besteht. Dies berücksichtigt man durch einen weiteren Faktor, die elektrische Leitfähigkeit σ:

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{d}{A}$$

d = Länge
A = Querschnittsfläche
σ = Leitfähigkeit

Je größer die Leitfähigkeit eines Materials, desto kleiner sein Widerstand. Daher steht die Leitfähigkeit im Nenner der Formel.

In Tabelle 1.1 ist die Leitfähigkeit einiger Stoffe aufgeführt. Es ist bemerkenswert, dass sich die besten Leiter von den schlechtesten um einen sehr großen Faktor unterscheiden, nämlich um etwa 10^{24}.

Material	σ in $1/(\Omega \cdot m)$
Kupfer	$5{,}59 \cdot 10^{7}$
Aluminium	$3{,}7 \cdot 10^{7}$
Eisen	$1{,}02 \cdot 10^{7}$
destilliertes Wasser	$3{,}33 \cdot 10^{-5}$
Plexiglas	10^{-13}
PVC	10^{-13}
Quarzglas	$2 \cdot 10^{-17}$

Tab. 1.1

Aufgaben

1. Schätze den Widerstand des Kabels einer 50-m-Kabeltrommel ab..
2. Wie lang ist ein Kupferdraht, der denselben Widerstand hat, wie ein gleich dicker, 1 m langer PVC-Stab. Wie weit würde der Draht von hier aus reichen?
3. Die Leitfähigkeit eines Materials ist um so größer, je mehr bewegliche Ladungsträger es enthält. Wie kann man die Leitfähigkeit einer Salzlösung verbessern?

1.8 Elektrisches Potenzial und Energie

Wir verfolgen den Weg einer kleinen Elektrizitätsportion ΔQ in einem elektrischen Stromkreis. Wir beginnen am Minusanschluss der elektrischen Energiequelle (der „Elektrizitätspumpe“), d.h. an ihrem Eingang. Die Elektrizitätsportion ΔQ geht innerhalb der Quelle vom niedrigen Potenzial φ_1 zum hohen Potenzial φ_2. Damit sie von φ_1 nach φ_2 kommt, muss ihr in der Quelle Energie zugeführt werden. (Falls die Quelle ein Generator ist, kommt diese Energie über die Antriebswelle.) Wir nennen diesen Energiebetrag ΔE. Die Elektrizitätsportion geht dann durch die Leitung auf dem hohen Potenzial φ_2 weiter, bis sie zum Energieempfänger kommt. Im Empfänger (ein Elektromotor, oder eine Glühlampe zum Beispiel) bewegt sie sich vom hohen Potenzial φ_2 wieder hinunter auf φ_1. Dabei gibt sie die Energie ΔE wieder ab. (Falls der Empfänger ein Elektromotor ist, durch die Motorwelle, falls es eine Glühlampe ist, mit dem Licht.) Danach fließt ΔQ durch die Rückleitung auf dem niedrigen Potenzial wieder zum Eingang der Quelle.

Unsere Elektrizitätsportion ΔQ nimmt also in der Quelle die Energieportion ΔE auf, und im Empfänger gibt sie sie wieder ab.

Du erinnerst dich an die Beziehung

$$P = U \cdot I = (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot I$$

Sie gestattet uns, zu berechnen, wie viel Energie pro Zeit von der Quelle zum Empfänger transportiert wird.

Wenn wir

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

(d.h. Energiestromstärke gleich Energie pro Zeit) und

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

(d.h. elektrische Stromstärke gleich Elektrizitätsmenge pro Zeit) einsetzen, und mit Δt multiplizieren, erhalten wir

$$\Delta E = (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot \Delta Q,$$

die Energie, die eine Elektrizitätsportion ΔQ in der Quelle aufnimmt und im Empfänger wieder abgibt. Wie sie diese Energie auf dem Weg zwischen Quelle und Empfänger aufbewahrt, wo genau diese Energie während dieser Zeit steckt, die die Elektrizitätsportion zwischen Quelle und Empfänger verbringt, werden wir später sehen. Es sieht so aus, als befände sich die Energie dort wo sich auch die Elektrizitätsportion befindet. Schließlich wurde ihr ja die Energie zugeführt. Du kannst dir im Augenblick ruhig vorstellen, dass es so ist. Wir werden aber später sehen, dass der eigentliche Energiespeicher nicht die Elektrizität selbst ist. (Vielleicht kannst du schon jetzt erraten, wo sich die Energie befindet, wenn du dich an einen anderen Energiespeicher erinnerst: Wo wird die Energie gespeichert, die man einem Körper zuführt, wenn man ihn hochhebt?)

> Um Elektrizität vom niedrigen zum hohen Potenzial zu bringen, muss man Energie zuführen. Wenn sich Elektrizität vom hohen zum niedrigen Potenzial bewegt, wird Energie abgegeben. Es gilt
>
> $$\Delta E = (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot \Delta Q.$$

1.9 Ladung und Ladungsträger

Wenn sich in einem Draht Elektrizität von der einen Seite zur anderen bewegt, sprechen wir von einem elektrischen Strom. Wir haben uns bisher mit den Wirkungen von Elektrizitätsströmen befasst und mit dem Zusammenhang zwischen der elektrischen Stromstärke und anderen Größen. Wir haben aber nie nach den Wirkungen und Eigenschaften der Elektrizität selbst gefragt. Man müsste diese am besten untersuchen können, wenn sich die Elektrizität nicht bewegt, wenn also kein elektrischer Strom fließt.

Nun muss man zugeben, dass man von der Elektrizität in einem Kupferdraht, der in keinen elektrischen Stromkreis eingebaut ist, nichts merkt. Woran liegt das? Eine mögliche Antwort wäre: Die ruhende Elektrizität hat eben keine Eigenschaften, durch die sie sich bemerkbar machen kann. Diese Antwort ist aber nicht richtig. Elektrizität macht sich sehr deutlich bemerkbar, und zwar schon dann, wenn sie in kleinsten Mengen vorliegt. Mit ihrer Beschreibung befasst sich die Elektrostatik. Dass man von ihr nichts merkt, wenn man ein Stück Kupferdraht vor sich hat, liegt an einer Eigenschaft, in der sich die Elektrizität von manchen anderen Größen unterscheidet: Sie kann positive und negative Werte annehmen.

Alle materiellen Stoffe enthalten Elektrizität, aber sie enthalten fast immer gleich große Mengen positiver wie negativer Elektrizität, sodass die Gesamtmenge null ist. So enthält 1 g Kupfer an positiver Elektrizität 44 032 C. Es enthält aber denselben Betrag an negativer Elektrizität; die Gesamtmenge beträgt also 0 C. (Zum Vergleich: die Masse, d.h. die Größe, die man in kg misst, kann nur positive Werte haben).

> Die Elektrizität kann positive und negative Werte annehmen.

Was für einen Sinn hat es aber überhaupt zu sagen, ein Körper, der die Elektrizitätsmenge 0 C hat, habe in Wirklichkeit eine ganz bestimmte Menge positiver und eine gleich große Menge negativer Elektrizität? 0 C heißt doch nichts anderes, als dass er eben keine Elektrizität hat. Dass es einen Sinn hat, zu sagen, Kupfer (oder irgendein anderer Stoff) enthalte sowohl positive als auch negative Elektrizität, erkennt man, wenn man die mikroskopische Struktur der Materie betrachtet.

Alle Stoffe bestehen aus Atomen und Atomgruppen, den Molekülen, und jedes Atom besteht aus den im Atomkern vereinigten Protonen und Neutronen, und der Elektronenhülle. Zwei dieser Bestandteile des Atoms tragen Elektrizität. Das Proton trägt positive Elektrizität, und zwar ist

$$Q_{\text{Proton}} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{C}.$$

Das Elektron trägt negative Elektrizität, nämlich

$$Q_{\text{Elektron}} = -\ 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{C}.$$

Neutronen tragen keine Elektrizität. Es ist also

$$Q_{\text{Neutron}} = 0\ \text{C}.$$

Da ein Atom genauso viele Protonen wie Elektronen hat, ist die Elektrizitätsmenge, die das ganze Atom trägt, 0 C.

Es kommt vor, dass ein Atom ein Elektron oder mehrere Elektronen zu viel oder zu wenig hat. Man nennt ein solches Gebilde ein *Ion*. Die Elektrizitätsmenge der Ionen ist also nicht null.

Wir haben damit eine weitere wichtige Eigenschaft der Elektrizität kennen gelernt: Die Elektrizität sitzt immer auf irgendwelchen Teilchen. Neben Protonen und Elektronen gibt es noch eine ganze Reihe anderer elektrisch geladener Teilchen: Positronen, Myonen, Antiprotonen und andere. Diese kommen unter normalen Bedingungen nicht vor; man erzeugt sie künstlich, und sie haben nur eine sehr kurze Lebensdauer.

Von Teilchen, auf denen Elektrizität sitzt, sagt man, sie seien *elektrisch geladen*. Es hat sich daher eingebürgert, die Elektrizität *elektrische Ladung* zu nennen. Und elektrisch geladene Teilchen, also Elektronen, Protonen, Ionen usw. nennt man *Ladungsträger*.

Elektrische Ladung (= Elektrizität) sitzt immer auf Teilchen, den Ladungsträgern.

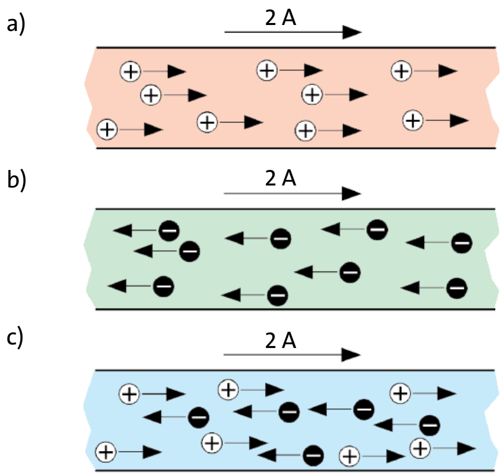


Abb. 1.31 Ein nach rechts fließender elektrischer Strom kommt zustande durch Ladungsträger, die sich (a) nach rechts, (b) nach links und (c) in beide Richtungen bewegen.

1.10 Ladungsstrom und Ladungsträgerstrom

Wir können nun verstehen, worin sich elektrische Leiter von Nichtleitern unterscheiden: Leiter sind Stoffe, die *bewegliche* Ladungsträger enthalten; in Nichtleitern sind alle Ladungsträger *unbeweglich*. Welches die beweglichen Ladungsträger in einem elektrischen Leiter sind, ist von Fall zu Fall verschieden. In manchen Leitern bewegen sich nur Träger positiver Ladung, in manchen nur Träger negativer und in wieder anderen sowohl positiver als auch negativer Ladung.

In Metallen sind die beweglichen Ladungsträger Elektronen. Allerdings können sich längst nicht alle Elektronen der Metallatome bewegen, sondern pro Atom nur ungefähr eines. In Säuren, Basen und Salzlösungen gibt es keine beweglichen Elektronen. Hier kommt die elektrische Leitfähigkeit durch die Beweglichkeit von Ionen zustande. Da es sowohl positive als auch negative Ionen gibt, haben wir hier auch Ladungsträger mit Ladungen beiderlei Vorzeichens.

Fließt nun in einem elektrischen Stromkreis ein elektrischer Strom, so schieben sich die beweglichen Ladungsträger an dem entgegengesetzt geladenen Rest vorbei, so dass der Stromkreis überall neutral bleibt. Alle Leitungen, Energiequellen und Energieempfänger bleiben ungeladen.

Wir sehen, dass ein elektrischer Strom auf verschiedene Arten zustande kommen kann. In allen drei Teilbildern von Abb. 1.31 haben wir einen elektrischen Strom von 2 A, der von links nach rechts fließt. In Teil (a) der Abbildung kommt er dadurch zustande, dass sich positiv geladene Träger nach rechts bewegen, in (b) fließen Träger negativer Ladung nach links. In Teil (c) bewegen sich gleichzeitig positive Teilchen nach rechts und negative nach links; beide Ladungsträgersorten tragen zum Gesamtstrom bei.

Es wird dich überraschen, wie langsam sich die Ladungsträger in einem Leiter bewegen: Fließt in einem Kupferdraht von 1 mm^2 Querschnittsfläche ein elektrischer Strom von 1 A, so beträgt die Geschwindigkeit der beweglichen Ladungsträger (der beweglichen Elektronen) 0,07 mm/s.

Aufgaben

1. In einer Salzlösung, in die zwei Elektroden eingetaucht sind, fließen positive Ionen von links nach rechts. Sie transportieren 0,5 Coulomb pro Sekunde. Gleichzeitig fließen negative Ionen von rechts nach links. Sie bringen pro Sekunde minus 0,3 Coulomb von rechts nach links. In welche Richtung fließt der elektrische Strom? Wie groß ist die elektrische Stromstärke?
2. In einem Kupferdraht fließt ein elektrischer Strom von 2 A. Wie viele Elektronen bewegen sich pro Sekunde durch einen Querschnitt der Leitung?

1.11 Die Anhäufung elektrischer Ladung

Unser ursprüngliches Anliegen war es, etwas über die Eigenschaften der Elektrizität zu erfahren. Wir haben uns dann aber klargemacht, warum ein normaler

Stromkreis überall elektrisch neutral ist, warum man also von der elektrischen Ladung normalerweise gar nichts merken kann. Wir wollen nun versuchen, die Neutralität eines elektrischen Leiters zu stören. Wir wollen versuchen, Ladung auf ihm anzuhäufen, sodass seine Gesamtladung von null verschieden ist. Wir werden sehen, dass das recht schwierig ist.

Um das Problem, das uns dabei begegnet, besser zu verstehen, betrachten wir Abb. 1.32.

Der linke Behälter ist mit Luft unter Normaldruck gefüllt. Wir möchten die Luftmenge in diesem Behälter vergrößern. Dazu pumpen wir einfach mit einer Pumpe Luft von außen in den Behälter hinein. Der Druck nimmt bei diesem Vorgang zu. Der rechte Behälter in der Abbildung ist mit Wasser gefüllt, und wir möchten die Wassermenge im Behälter vergrößern. Das geht aber längst nicht so leicht wie im Fall der Luft. Auch mit einer Pumpe, die einen sehr hohen Druck erzeugen kann, lässt sich die Wassermenge nur wenig vergrößern. Der Grund ist, dass sich Wasser nicht so leicht zusammendrücken lässt wie Luft.

Mit der Elektrizität verhält es sich ähnlich wie mit dem Wasser: Es ist sehr schwer, in einem Gegenstand eine Abweichung von der Normalmenge an Elektrizität, nämlich 0 Coulomb, zu erzeugen.

Wie würden wir es denn überhaupt anstellen, Elektrizität in einem Gegenstand anzuhäufen? Mit einer „Elektrizitätspumpe“ natürlich, d.h. mit einer Batterie oder einem Netzgerät. Abb. 1.33 zeigt einen Versuch, der fehlschlägt: Der Pluskontakt einer Batterie ist mit einem Draht verbunden, der Minuskontakt mit der Erde. Die Batterie sollte nun Elektrizität aus der Erde herausziehen und in den Draht hineindrücken. Der Draht sollte sich elektrisch aufladen und auch geladen bleiben, wenn man ihn von der Batterie löst. Berührt man ihn dann mit dem einen Anschluss eines Lämpchens, dessen anderer Anschluss geerdet ist, so sollte das Lämpchen aufleuchten, denn die angehäufte Elektrizität sollte über das Lämpchen zurück in die Erde fließen. Das Lämpchen leuchtet aber nicht auf. Warum nicht? Weil die Elektrizitätsmenge, die wir auf den Draht gepumpt haben, viel zu klein ist.

Um eine Ladungsanhäufung auf dem Draht nachzuweisen, müssen wir das Experiment in zweierlei Hinsicht verbessern:

(1) Wir benutzen eine Elektrizitätspumpe, die „viel stärker drückt“, d.h. ein Netzgerät, das eine viel höhere Spannung erzeugt. In Frage kommt ein gewöhnliches Hochspannungsnetzgerät (mit einem Transformator) oder ein Bandgenerator, Abb. 1.34.

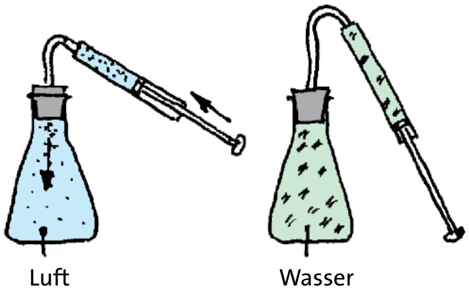


Abb. 1.32 Die Luftmenge im linken Behälter lässt sich leicht verändern, die Wassermenge im rechten nur sehr schwer.

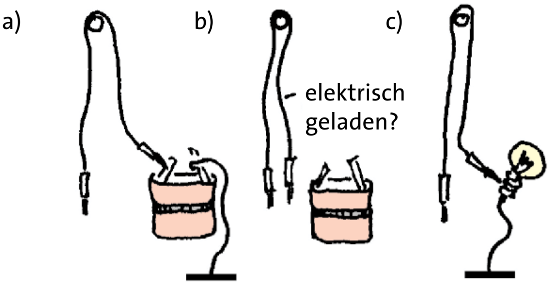


Abb. 1.33 (a) Die Batterie pumpt Elektrizität aus der Erde in den Draht. (b) Der Draht ist elektrisch geladen. (c) Das Lämpchen leuchtet nicht auf, weil die Ladung des Drahtes viel zu gering ist.

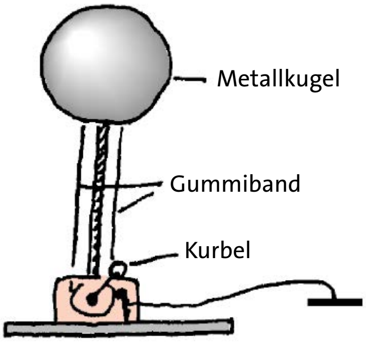


Abb. 1.34 Bandgenerator

Der Bandgenerator erzeugt Spannungen bis zu etwa 50 kV.

(2) Zum Nachweis der Ladung des Drahtes benutzen wir ein Gerät, das empfindlicher ist, das auf kleinere Ladungsmengen reagiert, als das Glühlämpchen: eine Glimmlampe. Die Glimmlampe hat für unseren Versuch den zusätzlichen Vorteil, dass man erkennt, in welcher Richtung der Strom durch sie hindurchfließt: Sie leuchtet immer an der Seite auf, die auf dem niedrigeren Potenzial liegt.

Nachdem wir diese Maßnahmen getroffen haben, gelingt unser Versuch der Ladungsanhäufung. Je nachdem, welchen der beiden Anschlüsse des Hochspannungsnetzgerätes man erdet, erhöht oder vermindert man die Elektrizitätsmenge des Drahtes. Wird der Minuskontakt des Netzgerätes geerdet, so wird der Draht positiv geladen. Da die beweglichen Ladungsträger des Drahtes Elektronen sind, bedeutet das, dass dem Draht Elektronen entzogen werden. Er hat weniger Elektronen als im ungeladenen Zustand. Wird der Pluskontakt geerdet und der Minuskontakt mit dem Draht verbunden, so wird der Draht negativ. Er hat einen Elektronenüberschuss.

Die Ladungsmenge, die wir im Draht anhäufen, ist um so größer, je höher das Potenzial ist, auf das wir den Draht bringen. Ein hohes positives Potenzial ist mit einer (relativ) großen positiven Landungsmenge verbunden, ein hohes negatives Potenzial mit einer (relativ) großen negativen Ladungsmenge. Wir fassen dieses Ergebnis zusammen:

> Je höher das elektrische Potenzial eines Körpers ist, desto mehr elektrische Ladung enthält er.

Und es gilt auch die Umkehrung:

> Je größer die elektrische Ladung ist, die auf einem Körper sitzt, desto höher ist das elektrische Potenzial des Körpers.

Diese einfachen Regeln gelten nur so lange, wie sich keine weiteren geladenen Körper in der Nähe befinden. Wir werden später sehen, dass sich elektrisch geladene Körper gegenseitig beeinflussen.

Vergiss nicht, dass die Elektrizitätsmenge, die wir in unserem Experiment schließlich angehäuft hatten, immer noch sehr, sehr gering ist. Sie beträgt nicht mehr als einige µC. (Man sagt auch, sie ist „von der Größenordnung“ Mikrocoulomb.) Vergleiche das mit der gesamten positiven Ladung, die sich in den entsprechenden Metallteilen befindet, die aber durch die fast gleiche Menge negativer Ladung kompensiert ist: Es waren etwa 44 000 C in 1 g Kupfer (siehe Abschnitt 1.9).

1.12 Das elektrische Feld

Wir haben es nun erreicht, Ladung anzuhäufen und die angehäufte Ladung auch nachzuweisen. Wir haben aber noch keine besonderen Eigenschaften der elektrischen Ladung bemerkt. Um die Eigenschaften der Elektrizität zu untersuchen, führen wir das in Abb. 1.35 skizzierte Experiment aus.

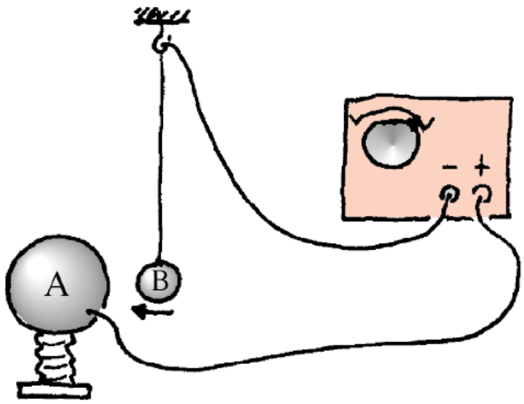


Abb. 1.35 Durch das elektrische Feld wird Kugel B zu Kugel A hingezogen.

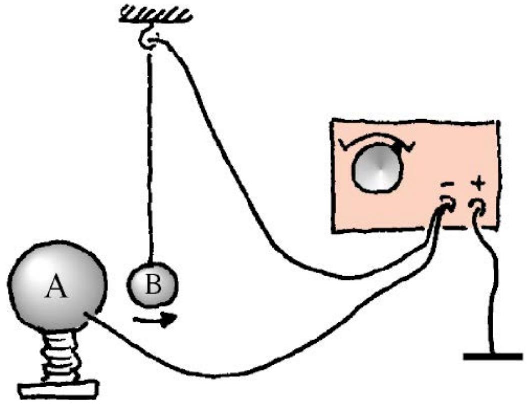


Abb. 1.36 Das elektrische Feld drückt Kugel B von Kugel A weg.

Zwei hohle Metallkugeln A und B werden an das Hochspannungsnetzgerät angeschlossen. Kugel B ist sehr leicht. Sie ist an einem dünnen Draht aufgehängt, so dass sie sich bewegen kann. Schaltet man nun das Netzgerät ein, so dass sich die eine Kugel positiv, die andere negativ auflädt, so wird B zu A hingezogen. Wenn wir die vorher positive Kugel negativ und die vorher negative positiv aufladen, so ändert sich nichts: Wieder wird B zu A hingezogen.

Wir schließen nun die Kugeln so an das Netzgerät an, dass ihre Ladungen dasselbe Vorzeichen haben, Abb. 1.36. Jetzt wird B von A weggedrückt. Dabei ist es egal, ob beide Kugeln positiv oder beide negativ geladen sind.

Aus der Tatsache, dass die eine Kugel zur anderen hingezogen, bzw. die eine von der anderen weggedrückt wird, schließen wir, dass sich zwischen den Kugeln eine Verbindung befindet.

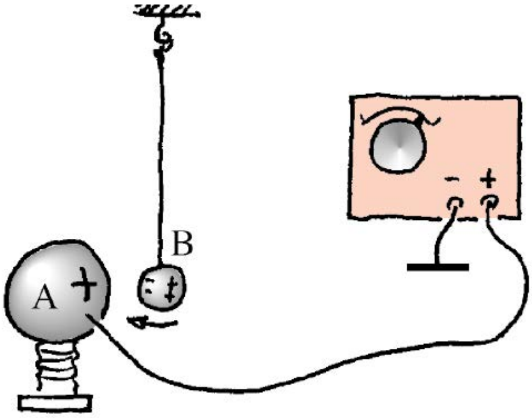


Abb. 1.37 Die beweglichen Ladungsträger auf B werden durch das elektrische Feld verschoben. An der Oberfläche von B bilden sich elektrisch geladene Bereiche.

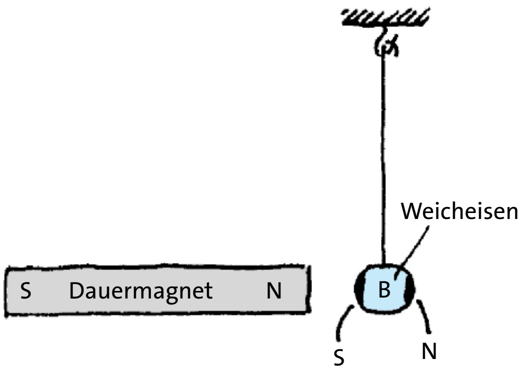


Abb. 1.38 B wird durch das Feld des Dauermagneten magnetisiert. An der Oberfläche von B bilden sich Magnetpole.B.

Man nennt diese Verbindung elektrisches Feld. Den unsichtbaren Stoff, aus dem das Feld besteht, nennen wir Feldstoff.

> An elektrisch geladenen Gegenständen hängt ein unsichtbares Gebilde. Man nennt es elektrisches Feld. Haben die Ladungen von zwei Gegenständen dasselbe Vorzeichen, so drückt das Feld die Gegenstände voneinander weg, haben sie verschiedene Vorzeichen, so zieht sie das Feld aufeinander zu.

Dass Gegenstände über das elektrische Feld aneinander ziehen und aufeinander drücken, bedeutet, dass Impuls vom einen zum anderen Körper fließt. Das elektrische Feld transportiert also Impuls; im elektrischen Feld fließen Impulsströme. Diese Aussage ist gleichbedeutend damit, dass der Feldstoff unter mechanischer Spannung steht.

Durch das Feld zwischen zwei Körpern kann nun Impuls sowohl nach rechts, als auch nach links fließen. Das bedeutet, dass im elektrischen Feld sowohl Druck- als auch Zugspannungen herrschen. Wir werden uns später genauer mit dieser Frage befassen.

Wir machen zunächst noch ein Experiment, das noch einfacher ist als die vorangehenden, Abb. 1.37: Nur die feststehende Kugel A wird elektrisch geladen, Kugel B wird einfach isoliert aufgehängt. Überraschenderweise wird B auch diesmal zu A hingezogen. Dabei ist es egal, ob A positiv oder negativ geladen ist. Wie ist das zu erklären? Da die bewegliche Kugel nicht ans Netzgerät angeschlossen ist, sollte an ihr ja auch kein Feld hängen.

Wir finden die Erklärung, wenn wir uns an eine ähnliche Erscheinung beim Magnetismus erinnern: Ein Stück Weicheisen, d.h. ein zunächst unmagnetischer Gegenstand, wird zu einem Magnetpol hingezogen, und zwar sowohl zu einem Nordpol als auch zu einem Südpol. Hier war die Erklärung so: Das Weicheisen bildet selbst Pole, sobald es in die Nähe eines Magnetpols kommt. In der Nähe eines Nordpols bildet es auf der diesem Nordpol zugewandten Seite einen Südpol, und auf der entgegengesetzten Seite einen Nordpol, Abb. 1.38.

Ganz ähnlich ist es bei unserem letzten Experiment. Das elektrische Feld zieht an den Ladungsträgern von B und verschiebt sie etwas, sodass sich B auf der einen Seite positiv und auf der gegenüberliegenden negativ lädt. Die Gesamtladung von B bleibt dabei null. Ist A positiv geladen, so wird B auf der A zugewandten Seite negativ und auf der A abgewandten Seite positiv. Da die negative Seite von B einen geringeren Abstand von A hat als die positive, wird die Kugel B zu A hingezogen.

Ist A negativ, so verschieben sich die Ladungen auf B in die andere Richtung, und wieder haben die Ladungen von A und der A zugewandten Seite von B entgegengesetztes Vorzeichen, sodass B zu A hingezogen wird.

Diesen Vorgang der Ladungsverschiebung unter dem Einfluss des elektrischen Feldes eines anderen Körpers nennt man *Influenz*.

Um nachzuweisen, dass ein Gegenstand elektrisch geladen ist, hatten wir früher ein Glimmlämpchen verwendet. Ein anderes Nachweisgerät für die Elektrizität ist das *Elektroskop*. Wir können jetzt verstehen, wie es funktioniert.

Im Innern des Metallringes, Abb. 1.39, befindet sich ein senkrechter Stab. Der Stab ist vom Ring elektrisch isoliert. An diesem Stab befindet sich drehbar gelagert ein weiterer Stab. Dieser drehbare Stab ist sehr leicht, und er ist mit dem festen Stab leitend verbunden. Beide

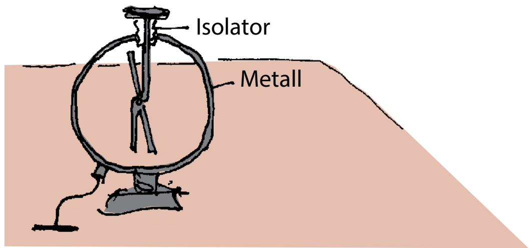


Abb. 1.39 Elektroskop. Der bewegliche Stab trägt Ladung desselben Vorzeichens wie der feste.

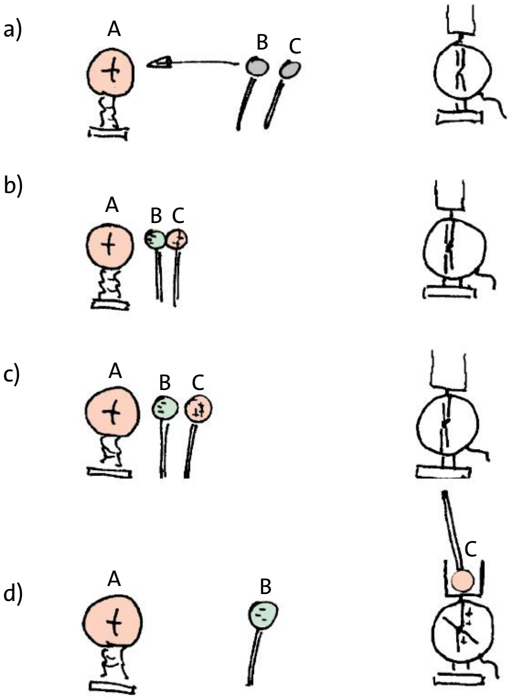


Abb. 1.40 (a) Die neutralen Kugeln B und C werden in die Nähe von A gebracht. Sie werden zur Berührung gebracht. (b) Die Ladung auf B und C verschiebt sich (Influenz). (c) Der Kontakt zwischen B und C wird unterbrochen. (d) Die Ladungen von B und C werden mit dem Elektroskop nachgewiesen.

Stäbe sind mit dem oberen Anschluss des Elektroskops elektrisch leitend verbunden. Der Ring wird geerdet.

Wir wollen das Elektroskop benutzen, um die auf einer Kugel sitzende Ladung nachzuweisen. Dazu wird der obere Anschluss des Elektroskops mit der Kugel berührt. Es fließt elektrische Ladung von der Kugel zu den beiden Stäben. Diese sind jetzt gleichartig geladen, und der drehbare Stab wird durch das elektrische Feld vom festen Stab weggedrückt. Je mehr Ladung auf dem Elektroskop sitzt, desto stärker spreizt sich der drehbare Stab vom festen weg.

Wir benutzen das Elektroskop, um in einem einfachen Versuch noch einmal die Erscheinung der Influenz zu zeigen, Abb. 1.40.

Die große Kugel wurde positiv geladen. Wir bringen zwei kleine neutrale Kugeln B und C in den Bereich des Feldes der großen, Abb. 1.40a. B und C werden zur Berührung gebracht, sie berühren aber nicht A, Abb. 1.40b. Durch das Feld von Kugel A werden nun Ladungen auf B und C getrennt, durch „Influenz". Links, d.h. auf B, häuft sich negative Ladung an. Rechts, auf Kugel C, konzentriert sich positive Ladung. Wir trennen nun B und C voneinander, und zwar noch während sie sich in der Nähe von A befinden, Abb. 1.40c, und wir führen sie dann aus dem Bereich der großen Kugel heraus, Abb. 1.40d. Eigentlich möchten sich die Ladungen auf B und C jetzt wieder ausgleichen. Sie können es aber nicht, denn die Verbindung ist unterbrochen.

Um die Ladungen auf B und auf C nachzuweisen, benutzen wir das Elektroskop. Wir berühren das Elektroskop mit einer der beiden Kugeln, mit B zum Beispiel. Von B fließt negative Ladung auf das Elektroskop, das Elektroskop schlägt aus. Wir berühren dann das Elektroskop mit Kugel C. Jetzt fließt positive Elektrizität auf das Elektroskop und neutralisiert die negative, so dass der Ausschlag wieder zurückgeht.

Aufgaben

1. Auf Kugel B in Abb. 1.37 werden Träger positiver und negativer Ladung durch Influenz getrennt. Die Kugel wird vom Feld zu A hingezogen. Sobald sie aber A berührt hat, wird sie von A weggedrückt. Wie ist das zu erklären?
2. Wie könnte man zeigen, dass es sich bei dem Gebilde, das sich in der Umgebung elektrisch geladener Gegenstände befindet, nicht um ein magnetisches Feld handelt?
3. Eine leichte Metallkugel A ist zwischen zwei fest stehenden Kugeln B und C aufgehängt, Abb. 1.41. Man bringt Kugel A kurz zur Berührung mit C und lässt sie dann los. Was passiert?

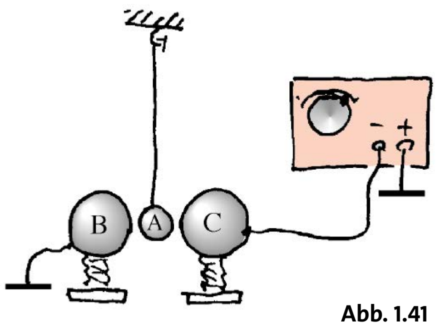


Abb. 1.41 Zu Aufgabe 3

1.13 Die elektrische Feldstärke

In einem Raumgebiet befinde sich ein elektrisches Feld (weil zum Beispiel gerade eine Gewitterwolke darüber schwebt). Stell dir vor, du möchtest jemandem mitteilen, wie viel und was für Feldstoff sich an einer bestimmten Stelle des Gebiets befindet. Du brauchst dazu ein Maß, eine physikalische Größe. Ein solches Maß ist die *elektrische Feldstärke*.

Man würde wahrscheinlich zunächst erwarten, dass die elektrische Feldstärke einfach in der Nähe eines geladenen Körpers einen großen Wert hat und in größerer Entfernung einen kleinen. Nun kann man aber das Feld so noch nicht eindeutig beschreiben.

Wir hatten festgestellt, dass im elektrischen Feld sowohl Druck- als auch Zugspannungen herrschen können. Tatsächlich ist es so, dass in einem Feld Zug und Druck *an jedem Ort gleichzeitig* herrschen. Wie ist das möglich?

Für jedes Stückchen Feldstoff gibt es eine ausgezeichnete Richtung, in der das Feld unter Zugspannung steht. Wir nennen sie die *Zugrichtung*. In allen Richtungen quer dazu steht es unter Druckspannung. Abb. 1.42 zeigt einen kleinen Zylinder, den wir in Gedanken aus einem Feld herausgeschnitten haben, und zwar so, dass die Zylinderachse in der Zugrichtung des Feldes liegt. In den Richtungen quer dazu herrscht Druckspannung. (Dass ein Material an jeder Stelle eine ausgezeichnete Richtung hat, ist keine seltene Eigenschaft. So hat die Maserung eines Holzstücks an jeder Stelle eine bestimmte Richtung. Welche Eigenschaft des Holzes hängt von der Richtung der Maserung ab?)

Aus dieser Überlegung folgt: Wenn wir den Feldstoff an einer Stelle des Feldes charakterisieren wollen, so genügt es nicht, zu sagen, ob dort viel oder wenig Feldstoff ist. Wir müssen außerdem noch angeben, welches die Zugrichtung an dieser Stelle ist. (Die Druckrichtungen folgen daraus eindeutig.) In anderen Worten: *Die elektrische Feldstärke muss ein Vektor sein.* Der Betrag dieses Vektors gibt Auskunft über die Dichte des Feldes, seine Richtung stimmt mit der Zugrichtung des Feldes überein.

> Die elektrische Feldstärke ist ein Vektor.
> *Betrag des Vektors:* Maß für die Dichte des Feldstoffs.
> *Richtung des Vektors:* Zugrichtung des Feldstoffs.

Zurück zu unserem ursprünglichen Problem: Wir möchten jemandem die elektrische Feldstärke mitteilen, die ein Feld an einer bestimmten Stelle hat. Wir brauchen also ein Messverfahren für den Feldstärkevektor. Es gibt verschiedene solcher Methoden. Wir wollen ein Verfahren betrachten, das zwar so unhandlich ist, dass man es praktisch kaum anwendet, dass dafür aber besonders leicht zu durchschauen ist – und darauf kommt es uns im Augenblick an.

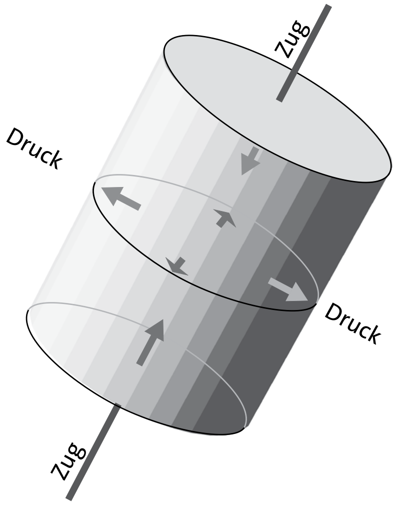


Abb. 1.42 Das Feld hat an jeder Stelle eine ausgezeichnete Richtung: die Richtung, in der es unter Zugspannung steht.

Man bringt an die Stelle, an der man die Feldstärke wissen möchte, einen kleinen elektrisch geladenen „Probekörper". In diesen fließt ein Impulsstrom hinein. Mithilfe eines Impulsstrommessers (= Kraftmessers) bestimmt man Betrag und Richtung des Impulsstromvektors. Man dividiert durch die Ladung des Körpers und erhält die elektrische Feldstärke:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$$

Wir formen die Gleichung noch um:

> $$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} \qquad (1.1)$$
> $\vec{F}$ = Stärke des Impulsstroms in den Körper
> Q = elektrische Ladung des Körpers
> $\vec{E}$ = elektrische Feldstärke

Es gilt also: Impulsstromstärke gleich elektrische Ladung mal elektrische Feldstärke. Diese Gleichung hat dieselbe Gestalt, wie eine, die wir schon kennen:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{g}$$

d.h. Impulsstromstärke gleich Masse mal Gravitationsfeldstärke.

Wenn man die Ladung des Körpers verdoppelt, so verdoppelt sich auch die Impulsstromstärke. Der Quotient aus Impulsstromstärke und Ladung bleibt daher gleich. Sein Wert ist unabhängig von der Ladung des Probekörpers, d.h. unabhängig vom Messgerät. Und so soll es ja auch sein. Obwohl der Körper das ursprünglich vorhandene Feld erheblich verändert, liefert uns die Gleichung doch die Feldstärke des Feldes ohne Körper.

Als Maßeinheit der elektrischen Feldstärke ergibt sich Newton/Coulomb. Diese Einheit lässt sich umrechnen in die gebräuchlichere Einheit Volt/Meter.

Du wirst später noch ein anderes Messverfahren für die elektrische Feldstärke kennen lernen.

Aufgaben

1. Ein Elektron wird in ein elektrisches Feld gebracht, und zwar an eine Stelle, an der die Feldstärke 80 000 V/m beträgt. Wie ändert sich der Impuls des Elektrons? (Wie ist die Änderungsrate des Impulses?)
2. Ein elektrisch geladener Körper wird an einen Ort P gebracht. Er trägt eine Ladung von 10 nC. Man misst den Impulsstrom, der in den Körper fließt und findet 0,02 N. Wie groß war die Feldstärke des Feldes an der Stelle P, bevor der geladene Körper dorthin gebracht wurde?

1.14 Grafische Darstellung elektrischer Felder

Wir haben es im Folgenden oft mit Bildern von elektrischen Feldern zu tun. Wir müssen uns daher mit den Möglichkeiten befassen, elektrische Felder grafisch darzustellen.

Wenn es einem nicht auf die Zug- und Druckspannung im Feld, d.h. auf die Richtung des Feldstärkevektors ankommt, so kommt eine besonders einfache Methode in Betracht. Man stellt die Dichte des Feldstoffs durch eine Grautönung dar: schwarz oder dunkelgrau dort, wo der Betrag des Feldstärkevektors groß ist, und hell wo er klein ist. Abb. 1.43 zeigt das Feld einer geladenen Kugel. Man sieht, dass das Feld nach außen hin keine scharfe Grenze hat – ähnlich wie die Atmosphäre über der Erdoberfläche.

Eine andere Darstellungsmethode wurde in Abb. 1.44 angewendet. Hier wurden in regelmäßigen Abständen die Feldstärkevektoren durch Pfeile dargestellt. Aus diesem Bild kann man für jede Stelle des Feldes nicht nur die Dichte, sondern auch die Zugrichtung ablesen.

Und nun das dritte und wichtigste Verfahren. Man stellt das Feld dar durch *Feldlinien* und *Feldflächen*.

Zunächst zu den Feldlinien: Man zeichnet eine Linie so, dass sie in jedem Punkt die Richtung des zu

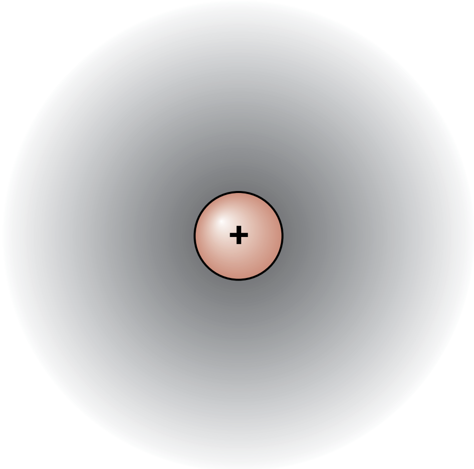


Abb. 1.43 Feldstoff in der Umgebung einer geladenen Kugel. Hohe Dichte: dunkel; niedrige Dichte: hell

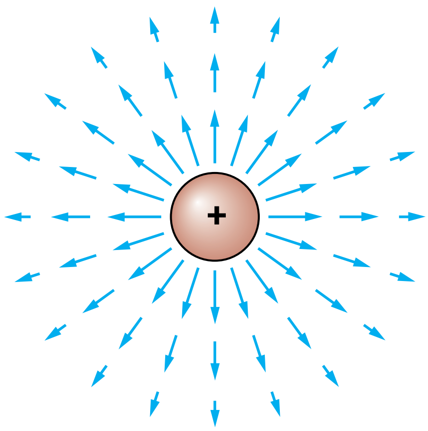


Abb. 1.44 Feld einer geladenen Kugel, dargestellt mit Feldstärkevektorpfeilen

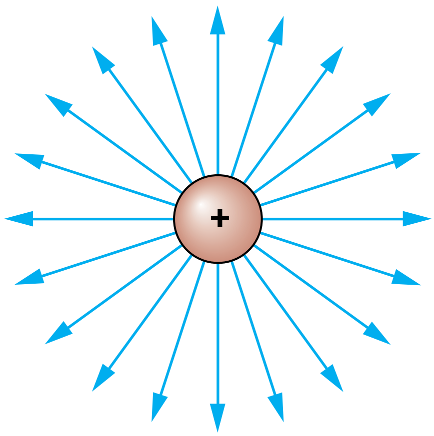


Abb. 1.45 Feld einer geladenen Kugel, dargestellt mit Feldlinien

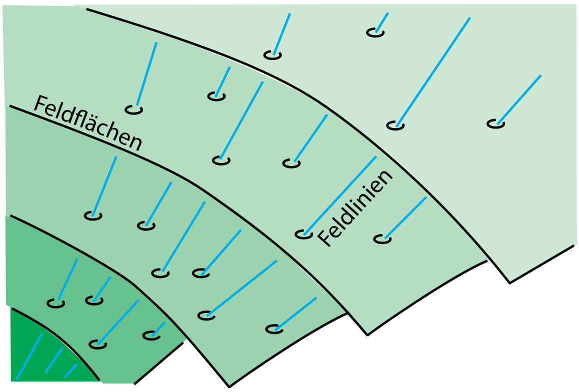


Abb. 1.46 Perspektivische Darstellung eines Feldausschnitts. Die Feldlinien durchstoßen die Feldflächen senkrecht.

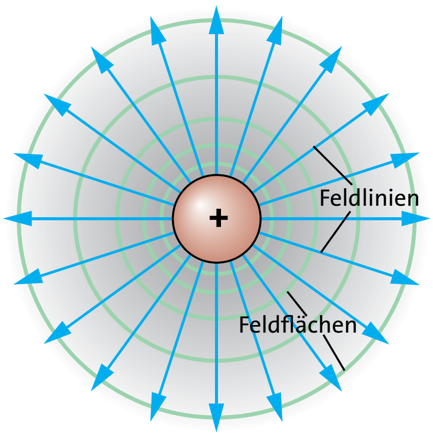


Abb. 1.47 Feld einer geladenen Kugel, dargestellt mit Feldlinien, Feldflächen und Grautönung

diesem Punkt gehörigen Feldstärkevektors hat. Was man erhält ist *eine* Feldlinie. Man zeichnet nun viele solcher Feldlinien. Was man für den Fall der geladenen Kugel erhält, zeigt Abb. 1.45.

Es ist üblich, an die Feldlinien Orientierungspfeile anzubringen. Diese weisen in dieselbe Richtung wie die Feldstärkevektoren.

Nun die Feldflächen: Wir haben Feldlinien auf unserem zweidimensionalen Papier gezeichnet. Du musst dir zunächst vorstellen, dass die Feldlinien in Wirklichkeit im dreidimensionalen Raum verlaufen. Zu diesen Feldlinien im dreidimensionalen Raum kann man nun Flächen konstruieren, die von den Feldlinien überall senkrecht durchstoßen werden, Abb. 1.46. Dies sind die Feldflächen. Wenn man davon nun wieder ein zweidimensionales Schnittbild macht, so sieht man auch von den Flächen nur noch Linien. Diese verlaufen überall senkrecht zu den Feldlinien. Wir werden im folgenden meist solche zweidimensionalen Schnitte betrachten.

Abb. 1.47 zeigt das Feld der geladenen Kugel, dargestellt mit Feldlinien und Feldflächen, und zusätzlich mit Grautönung.

Wir wissen nun, wie sich ein Feld darstellen lässt. Voraussetzung dafür ist natürlich, dass man das Feld kennt, d.h. dass man die Feldstärkevektoren an den verschiedenen Stellen des Raumes kennt.

1.15 Regeln für das Zeichnen elektrischer Felder

Es sei eine Anordnung von Körpern vorgegeben, die elektrisch geladen sind, d.h. an den Körpern hängt ein elektrisches Feld. Wie erfährt man nun, wie dieses Feld aussieht? In anderen Worten: Wie verlaufen die Feldlinien und -flächen? Auf diese Frage gibt es verschiedene Antworten.

Die erste Antwort: Die Feldstärkevektoren für die verschiedenen Punkte im Raum lassen sich aus der Verteilung der elektrischen Ladung berechnen. Das Rechenverfahren ist zwar recht schwierig, aber es gibt Computerprogramme, die einem diese Arbeit abnehmen.

Die zweite Antwort: Man kann die Feldlinien und Feldflächen experimentell sichtbar machen. Eine besonders einfache Version eines solchen Experiments hört sich fast wie ein Küchenrezept an: Zwischen die geladenen Körper, deren Feld untersucht werden soll, bringt man Rizinusöl. Auf das Öl streut man etwas Grieß. Die Grießkörner bilden kleine Ketten, die an jeder Stelle in Zugrichtung des Feldes liegen, Abb. 1.48 (Das Experiment funktioniert ähnlich wie das, bei dem man die Feldlinien eines magnetischen Feldes mit Eisenfeilspänen sichtbar macht.)

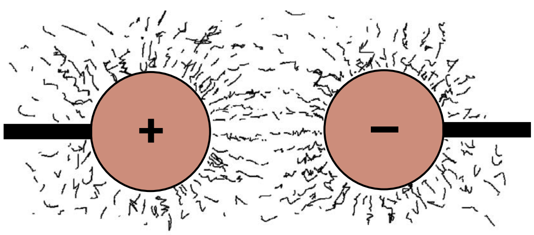


Abb. 1.48 Die Feldlinien werden mit Rizinusöl und Grießkörnern sichtbar gemacht.

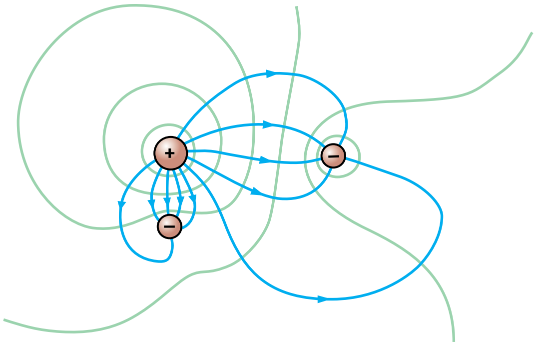


Abb. 1.49 Feldlinien beginnen an positiven und enden an negativen Ladungen. Feldflächen sind in sich geschlossen.

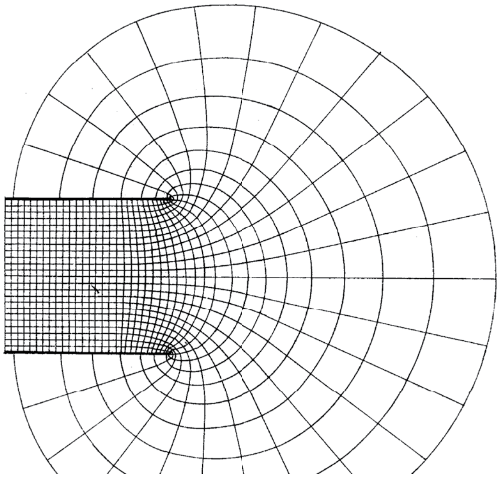


Abb. 1.50 Feldlinien und Feldflächen am Rande eines geladenen Kondensators aus Maxwells Treatise on Electricity and Magnetism

Die dritte Antwort: Wenn das Bild nicht zu genau sein muss, genügt es, einige Regeln zu kennen. Dieses Verfahren ist für uns im Augenblick das wichtigste. Jede dieser Regeln beinhaltet nämlich eine wichtige Einsicht in die Natur des Feldes. Wir wollen die Regeln hier zusammenstellen.

Die erste kennst du bereits: Die Feldlinien stehen überall senkrecht auf den Feldflächen.

Eine weitere Regel erkennt man bei näherem Betrachten von Abbildung 1.49: Feldlinien enden an elektrischen Ladungen, Feldflächen dagegen sind in sich geschlossen. Von den beiden Ladungen, die eine Feldlinie miteinander verbindet, ist immer die eine positiv, die andere negativ. Der Pfeil, mit dem wir die Feldlinien versehen, weist in die Wegrichtung von der positiven zur negativen Ladung. Man kann die Regel daher auch so formulieren: Feldlinien beginnen an positiven und enden an negativen Ladungen. (Wir werden allerdings später Felder kennen lernen, bei denen die Feldlinien geschlossen und die Feldflächen nicht geschlossen sind.):

Wenn es sich einrichten lässt, zeichnet man die Feldlinien so, dass eine Feldlinie einer bestimmten Ladungsmenge entspricht. In Abb. 1.49 zum Beispiel trägt der Körper links oben 10 positive Ladungseinheiten, die beiden anderen je 5 negative. Wenn die Gesamtladung der dargestellten Körper nicht gleich null ist, so müssen Feldlinien das Bild verlassen. Das ist zum Beispiel der Fall in Abb. 1.47. Hier ist nur ein einziger positiv geladener Körper dargestellt. Also müssen alle Feldlinien aus dem Bild hinauslaufen.

Eine weitere Regel sagt, dass sich Feldlinien nie durchkreuzen. Um das zu verstehen, brauchen wir keine Abbildung anzuschauen: In einem Punkt muss der Feldstärkevektor eine bestimmte Richtung haben. Er kann nicht zwei Richtungen gleichzeitig haben.

Noch eine einfache Regel: Außer an der Oberfläche von Körpern, haben Feldlinien und Feldflächen keine Knicke.

Schließlich noch eine sehr „starke" Regel: Wenn die Anordnung der geladenen Körper irgendwie symmetrisch ist, so zeigt das Feldlinienbild dieselbe Symmetrie.

Wir fassen zusammen:

> Die Feldlinien stehen in jedem Punkt senkrecht auf den Feldflächen.
>
> Die Feldlinien beginnen auf positiv und enden auf negativ geladenen Körpern. Je größer die Ladung, desto mehr Feldlinien beginnen oder enden auf dem Körper.
>
> Feldlinien durchkreuzen sich nicht gegenseitig. Feldflächen durchkreuzen sich nicht gegenseitig.
>
> Feldlinien und Feldflächen machen keine Knicke.
>
> Ein Feldbild hat dieselbe Symmetrie wie die elektrischen Ladungen.

Abb. 1.50 zeigt Feldlinien und Feldflächen des Feldes am Rande eines Kondensators aus der Originalveröffentlichung von *James Clerk Maxwell* von 1873. *Maxwell* hat die noch heute als gültig betrachtete Theorie der elektrischen und magnetischen Felder aufgestellt.

Aufgaben

1. Zeichne in Abb. 1.51 die Feldflächen ein. (Die Abbildung zeigt die Feldlinien.)
2. Zeichne in Abb. 1.52 die Feldlinien ein. (Die Abbildung zeigt die Feldflächen.)
3. Abb. 1.53 zeigt die Feldflächen eines Feldes. Markiere die Stellen, an denen Ladungen sitzen. Zeichne die Feldlinien ein.

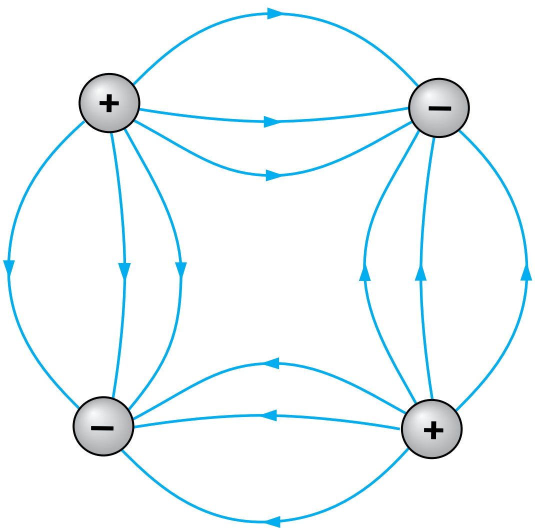


Abb. 1.51 Zu Aufgabe 1

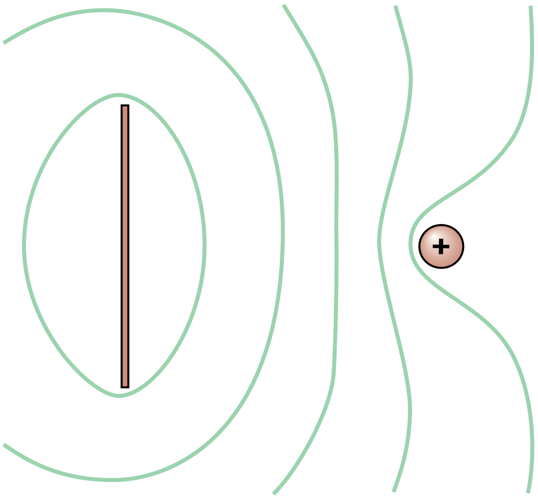


Abb. 1.52 Zu Aufgabe 2

Abb. 1.53 Zu Aufgabe 3

1.16 Vier wichtige elektrische Felder

Einige Ladungsverteilungen werden uns in Zukunft immer wieder begegnen. Es lohnt sich daher, dass du dir die Bilder der zugehörigen Felder einprägst.

1. Die geladene Kugel

Wir kennen das Feld schon. Es ist in Abb. 1.47 dargestellt. Wir wollen uns noch davon überzeugen, dass wir das Bild auch mithilfe unserer Regeln hätten zeichnen können:

Die Feldlinien müssen vom geladenen Körper aus starten. Da kein anderer Körper vorhanden ist, müssen sie alle das Bild nach außen verlassen.

Zur Symmetrie der Ladungsverteilung: Dreht man die geladene Kugel um einen beliebigen Winkel, so kann man die gedrehte Kugel von der nicht gedrehten nicht unterscheiden. Die Ladungsverteilung ist *drehsymmetrisch* für beliebige Winkel. Dieselbe Symmetrie muss auch das Feld haben.

Das Feldbild ist damit schon eindeutig bestimmt. Die Feldlinien laufen radial nach außen, die Feldflächen erscheinen als konzentrische Kreise.

2. Der elektrische Dipol

Dipol nennt man ein Gebilde, das aus zwei benachbarten Körpern besteht, die entgegengesetzt gleiche Ladungen tragen: Der eine ist positiv geladen, der andere trägt negative Ladung vom gleichen Betrag. Das Feldbild zeigt Abb. 1.54.

Da der Betrag der negativen Ladung gleich dem der positiven ist, laufen alle Feldlinien vom einen zum anderen Körper.

In Aufgabe 2 wird nach der Symmetrie der Ladungsverteilung gefragt.

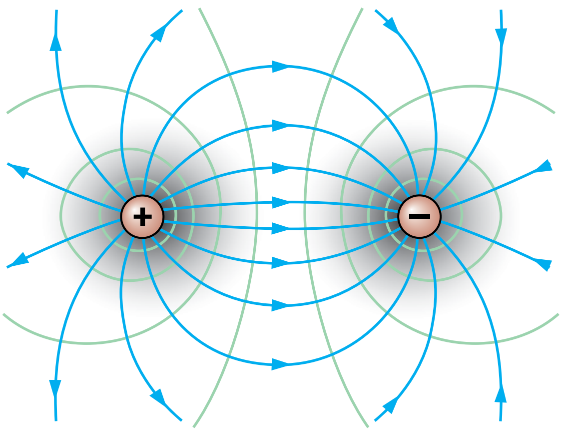


Abb. 1.54 Elektrischer Dipol mit seinem Feld

3. Zwei gleich geladene Körper

Die Ladungsverteilung ist ähnlich wie beim Dipol, nur sind hier beide Da keine negativ geladenen Körper auftreten, müssen alle Feldlinien aus dem Bild hinauslaufen.

In Aufgabe 3 wird nach der Symmetrie der Ladungsverteilung gefragt.

4. Zwei entgegengesetzt gleich geladene Platten

Die Ladung sei auch hier vom gleichen Betrag und umgekehrten Vorzeichen, und sie sei auf jeder der beiden Platten gleichmäßig verteilt. Abb. 1.56 zeigt das Bild für den Fall, dass die Länge der Platten etwa dreimal so groß ist, wie ihr Abstand.

Wie beim Dipol, so laufen auch hier alle Feldlinien vom einen zum anderen Körper, d.h. von der einen zur anderen Platte. Auffällig ist, dass sich das Feld auf den Raum zwischen den Platten konzentriert. Man erkennt auch, dass die Feldstärke im Mittelbereich sehr gleichmäßig ist: Sowohl die Richtung, als auch der Betrag der Feldstärke verändern sich hier von Ort zu Ort kaum noch. Das Feld ist nahezu *homogen*.

„Homogen" heißt ortsunabhängig, überall gleich. Wenn zum Beispiel in einem Raum die Temperatur an jeder Stelle denselben Wert hat, so ist die Temperaturverteilung homogen.

Ein homogenes Feld ist das einfachste Feld, das man sich vorstellen kann. Mit zwei Platten kann man leicht ein nahezu homogenes elektrisches Feld herstellen. Je größer die Platten im Vergleich zu ihrem Abstand sind, desto gleichmäßiger wird das Feld, desto mehr gleicht es einem homogenen Feld. Oft stellt man sich vor, die Platten hätten eine unendliche Länge und Breite. In diesem Grenzfall wäre das Feld zwischen den Platten perfekt homogen und außerhalb wäre die Feldstärke exakt null. Abb. 1.57 zeigt einen Ausschnitt eines solchen Plattenpaares, zusammen mit seinem Feld.

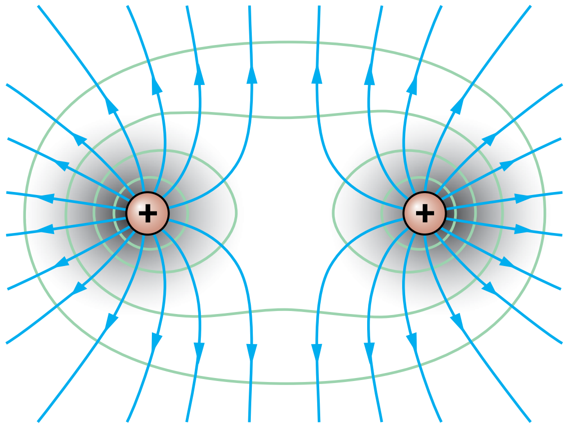


Abb. 1.55 Zwei positiv geladene Körper mit ihrem Feld

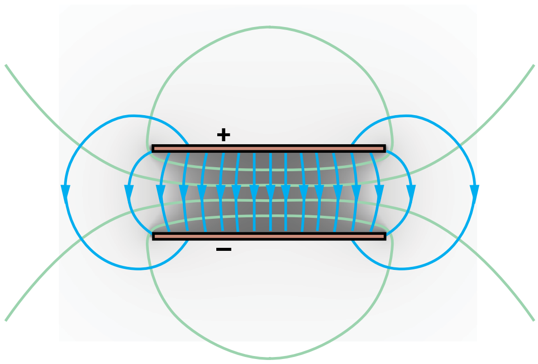


Abb. 1.56 Zwei entgegengesetzt gleich geladene Platten mit ihrem Feld

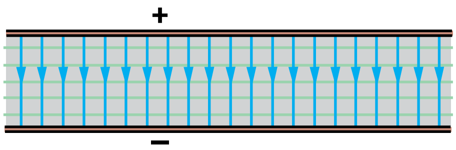


Abb. 1.57 Ausschnitt aus zwei unendlich ausgedehnten, entgegengesetzt gleich geladenen Platten

Aufgaben

1. Eine Kugel trage die Ladung Q_0. Die Ladung sitzt (a) auf der Kugeloberfläche, oder ist (b) über das Innere der Kugel gleichmäßig verteilt. Wie unterscheidet sich das Feldlinienbild außerhalb der Kugel von Fall (a) und Fall (b)? Begründe.
2. Welche Symmetrien hat die Ladungsverteilung des elektrischen Dipols in Abb. 1.54? Prüfe, ob das Feld dieselbe Symmetrie hat. Beachte die Vorzeichen der Ladung. Formuliere eine Erweiterung der Regel über den Zusammenhang der Symmetrien von Ladung und Feld.
3. Welche Symmetrien hat die Ladungsverteilung von Abb. 1.55? Hat das Feld dieselbe Symmetrie?

1.17 Berechnung elektrischer Feldstärken

Die Feldstärke aus einer Ladungsverteilung zu berechnen ist im Allgemeinen schwierig. In einigen wichtigen Fällen ist es das aber nicht – zum Beispiel wenn die Ladungsverteilung kugelsymmetrisch ist. Wir betrachten einen kugelsymmetrischen elektrisch geladenen Körper, bei dem die Ladung gleichmäßig über das ganze Innere verteilt ist. Die Ladungsdichte sei konstant. Der Betrag der Feldstärke außerhalb des Körpers wird dann durch die Gleichung

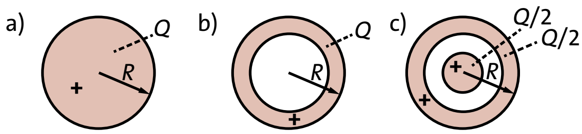


Abb. 1.58 Bei jeder der Ladungsverteilungen gilt das $1/r^2$-Gesetz außerhalb des Abstandes R vom Mittelpunkt.

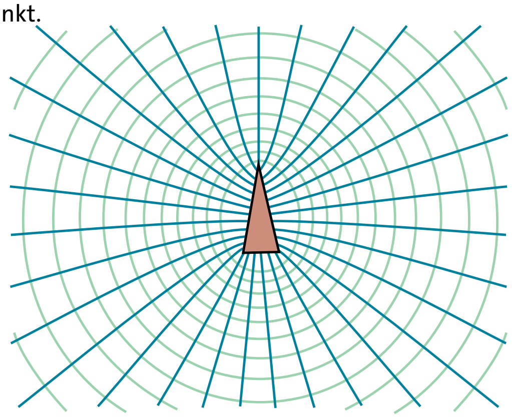


Abb. 1.59 Feldlinien (blau) und Feldflächen (grün). In großem Abstand von jeder Ladungsverteilung wird das Feld kugelsymmetrisch und es gilt das $1/r^2$-Gesetz.

$$\left|\vec{E}(r)\right| = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \tag{1.2}$$

elektrische Feldkonstante $\varepsilon_0 = 8{,}54 \cdot 10^{-12}$ C/(V·m)

beschrieben. Hier ist
Q = elektrische Ladung
r = Abstand vom Mittelpunkt der Ladungsverteilung
ε_0 = elektrische Feldkonstante.

Der ganze Vorfaktor $1/(4\pi\varepsilon_0)$ ist auch eine Konstante.

Kommt dir die Gleichung bekannt vor? Sie hat die selbe Gestalt wie die Gleichung für die Gravitationsfeldstärke kugelsymmetrischer Körper:

$$\left|\vec{g}(r)\right| = G \cdot \frac{m}{r^2}$$

Die Richtung der Feldstärkevektoren kennen wir schon: Wenn die Ladung positiv ist, weisen sie radial nach außen.

Das $1/r^2$-Gesetz von Gleichung (1.2) hat einen größeren Anwendungsbereich als man zunächst denken würde.

So gilt es nicht nur für das Feld einer homogen geladenen Kugel. Es gilt auch für jede andere kugelsymmetrische Ladungsverteilung – allerdings nur außerhalb des Raumbereichs, in dem sich die Ladung befindet. Abbildung 1.58 zeigt drei kugelsymmetrische Ladungsverteilungen. Die Gesamtladung ist bei allen die gleiche, nämlich Q. Gleichung (1.2) gilt für alle drei, aber nur für Radien, die größer sind als R.

Das $1/r^2$-Gesetz kann man aber auch benutzen, wenn die Ladungsverteilung nicht kugelsymmetrisch ist. Es gilt nämlich für beliebige Ladungsverteilungen, wenn man nur genügend weit weg ist. Abbildung 1.59 zeigt eine Ladungsverteilung, deren Querschnitt die Form eines spitzwinkligen Dreiecks hat. In einiger Entfernung sind die Feldlinien nahezu Geraden und die Äquipotenzialflächen nahezu Kugeln. Sobald das der Fall ist, kann man auch das $1/r^2$-Gesetz anwenden.

Aufgaben

1. In Abb. 1.58c wird die Ladung $Q/2$ auf der inneren Kugel durch $-Q/2$ ersetzt. Wir sieht das Feld für $r > R$ jetzt aus?
2. Setze den Ausdruck für die Feldstärke von Gleichung 1.2 in Gleichung 1.1 ein. Achte dabei gut darauf, was du tust. Welches ist die Bedeutung von Q in Gleichung 1.1 und welches ist die Bedeutung von Q in Gleichung 1.2? Welches ist die Bedeutung von r? Wenn du alles richtig gemacht hast, hast du das Coulombsche Gesetz erhalten. Suche in der Mechanik nach einem analogen Gesetz.

1.18 Mehrere geladene Körper – Vektoraddition

Wir wollen versuchen, zwei Felder an dieselbe Stelle zu bringen, etwa die Felder von zwei geladenen Kugeln A und B. A und B sollen die gleiche Ladung tragen.

Wie bringt man überhaupt ein Feld von einer Stelle zu einer anderen? Indem man den geladenen Körper, an dem es hängt, bewegt. Bewegen wir also die eine geladene Kugel in die Nähe der anderen.

Was passiert? Lässt das Feld von A vielleicht das von B gar nicht in sich eindringen? Oder können sich an einem Ort zwei Felder gleichzeitig befinden? Weder das eine, noch das andere trifft zu. Es passiert etwas anderes und überraschend einfaches. Es entsteht ein Feld, dessen Feldstärke sich durch vektorielle Addition der Feldstärken der Einzelfelder ergibt, Abb. 1.60.

Abb. 1.60a zeigt Kugel A mit ihrem Feld. Es sind keine anderen geladenen Körper in der Nähe. Abb. 1.60b zeigt Kugel B allein mit ihrem Feld. Abb. 1.60c schließlich zeigt den Fall, dass beide Kugeln da sind. Wir interessieren uns für die Feldstärke im Punkt P. Wir nehmen an, wir kennen die Feldstärkevektoren in dem Fall, dass nur eine Kugel vorhanden ist, also entweder nur A oder nur B. Diese Vektoren, sind in den Abbildungen 1.60a und 1.60b eingezeichnet. Man bekommt nun die Feldstärke in P für den Fall, dass beide Kugeln da sind, in-

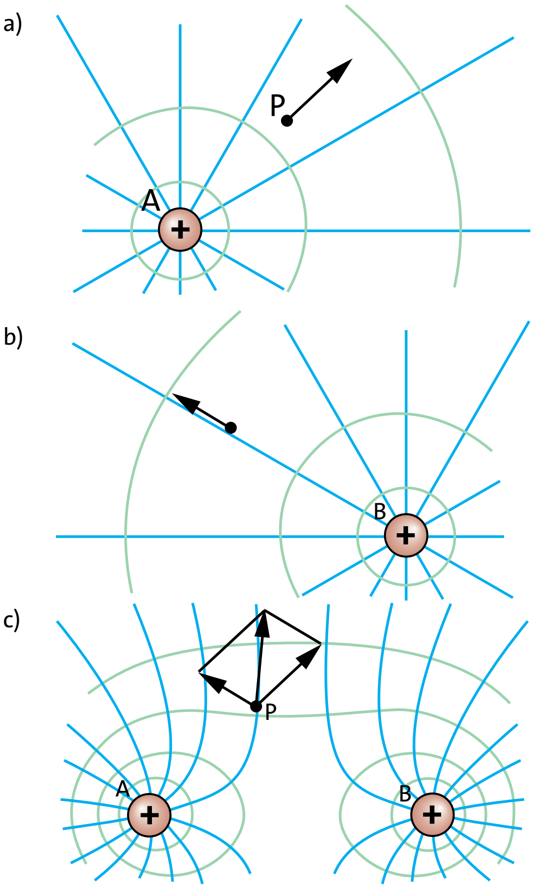


Abb. 1.60 (a) Kugel A mit ihrem Feld. (b) Kugel B mit ihrem Feld. (c) Kugeln A und B mit ihrem Feld. Die Feldstärke erhält man durch vektorielle Addition.

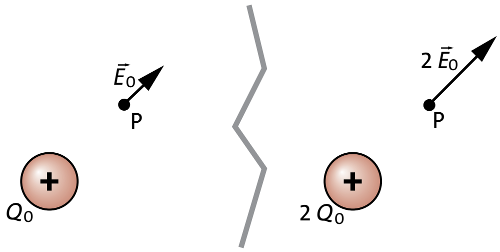


Abb. 1.61 Verdoppelt man die Ladung, so verdoppelt sich in jedem Punkt des Feldes die elektrische Feldstärke.

dem man die beiden Feldstärkevektoren addiert, Abb. 1.60c. So kann man die Feldstärke in jedem Punkt aus den Feldstärken der Einzelladungen konstruieren.

Wir wollen uns nun mithilfe unserer neuen Kenntnisse noch eine nützliche, allgemeine Regel beschaffen. Wir leiten sie her anhand eines einfachen Beispiels, werden sie dann aber verallgemeinern. Wir betrachten das Feld einer Kugel, die die elektrische Ladung Q_0 trägt. Die Feldstärke des Feldes in einem beliebig gewählten Punkt P sei $\vec{E}_0$, Abb. 1.61a.

Wir bringen nun an die Stelle, an der diese Ladung sitzt, noch einmal dieselbe Ladung Q_0, Abb. 1.61b. In anderen Worten: Die Kugel, die vorher die Ladung Q_0 hatte, trägt jetzt die Ladung $2\,Q_0$. Wie ist die neue Feldstärke? Wie verändert sich die elektrische Feldstärke in einem Punkt, wenn man die Ladung, die das Feld erzeugt, verdoppelt? Wir wissen, wie wir die neue Feldstärke berechnen können, nämlich durch vektorielle Addition der Beiträge der Einzelladungen: Feldstärke, die die erste Ladung Q_0 erzeugt plus Feldstärke, die die zweite Ladung Q_0 erzeugt. Da die beiden Vektoren gleich sind, ist das Ergebnis ein Vektor, der dieselbe Richtung hat, wie $\vec{E}_0$, aber die doppelte Länge. Die neue Feldstärke ist also einfach $2\,\vec{E}_0$.

Dieses Ergebnis können wir verallgemeinern:

> Multipliziert man alle Ladungen einer Ladungsverteilung mit einem Faktor *k*, so nehmen die Beträge aller Feldstärken um den Faktor *k* zu. Die Feldstärkerichtungen bleiben gleich.

Die Vektoraddition benutzt auch der Computer, wenn er Feldverteilungen berechnet. Man stellt sich die Ladungsverteilung vor als zusammengesetzt aus sehr vielen winzigen Punktladungen. Jede einzelne würde ein Feld erzeugen, dessen Feldstärke man nach Gleichung (1.2) berechnen kann. Der Computer berechnet nun für einen bestimmten Punkt P_1 die Feldstärkebeiträge aller Punktladungen und addiert sie vektoriell auf. Das Ergebnis ist die Feldstärke in P_1. Das wird nun für alle anderen Punkte $P_1, P_2, P_3, \ldots$ gemacht, für die man die Feldstärke haben möchte (gewöhnlich für alle Pixel des Bildschirms).

Aufgaben

1. Ein kleines Plattenpaar mit entgegengesetzt gleich geladenen Platten wird quer zwischen die Platten eines großen Plattenpaares gebracht, Abb. 1.62. Auch die großen Platten sind entgegengesetzt gleich geladen. Die Beträge der Feldstärken seien (bevor man das kleine Plattenpaar in das große setzt) gleich. Wie ist die Feldstärke in dem Raum zwischen den kleinen Platten?
2. Das Feld des unendlich ausgedehnten Plattenpaares von Abb. 1.57 kann man sich zusammengesetzt denken aus dem Feld der oberen Platte und dem der unteren. Wie sieht das Feld der oberen Platte allein aus? Wie sieht das Feld der unteren Platte allein aus? Wie entsteht daraus das Feld beider Platten?
3. Die Ladungen in Abb. 1.63a und 1.63a haben alle denselben Betrag. Bestimme die Richtung des Feldstärkevektors in den Punkten A, B, C und D.

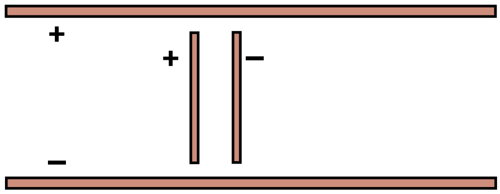


Abb. 1.62 Zu Aufgabe 1

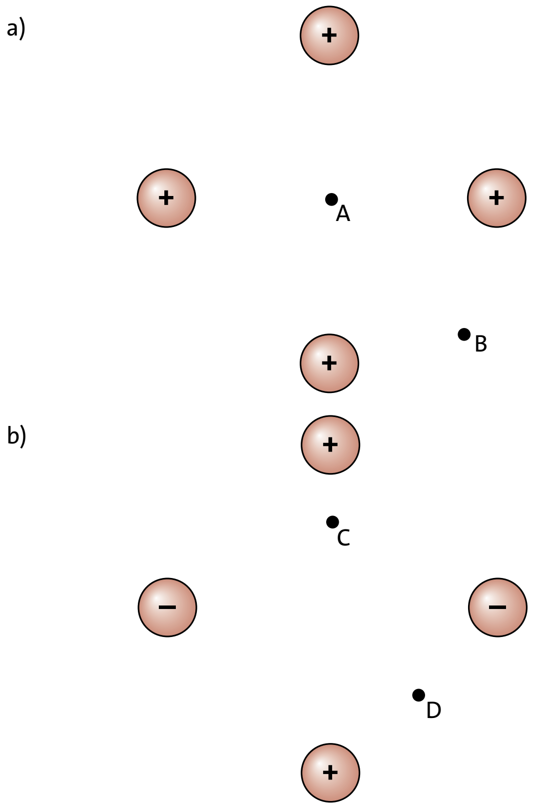


Abb. 1.63 Zu Aufgabe 3

1.19 Druck und Zug im elektrischen Feld

Wir hatten gesehen, dass das elektrische Feld unter mechanischer Spannung steht. An jeder Stelle steht es in einer Richtung unter Zug- und in den Querrichtungen unter Druckspannung. Wo die Feldstärke groß ist, d.h. wo der Feldstoff dicht ist, sind die Spannungen groß. Nun ist die mechanische Spannung eine physikalische Größe, d.h. man kann sie mit Zahlen beschreiben. Wie das geht, untersuchen wir an einem Beispiel, das etwas einfacher ist als das elektrische Feld.

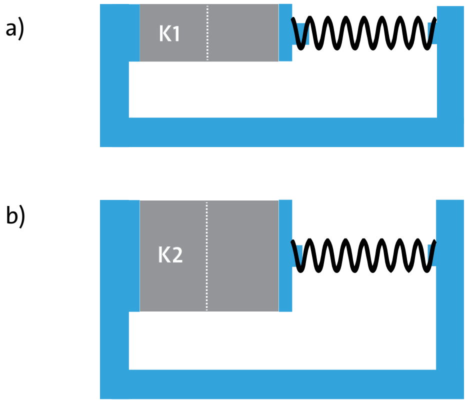


Abb. 1.64 Durch die Klötze K1 und K2 fließt der gleiche Impulsstrom. Die Impulsstromdichte (= mechanische Spannung) ist in K1 größer als in K2.

Ein Klotz K1 ist mit einer Feder zwischen zwei Wänden eingespannt, Abb. 1.64a. Durch die Anordnung fließt ein Impulsstrom. Wir vergleichen mit dem Klotz K2 in Abbildung 1.64b. Da die Federn gleich sind, fließen in beiden Fällen gleich starke Impulsströme. Weil aber Klotz K2 eine größere Querschnittsfläche hat als K1, verteilt sich der Impulsstrom hier auf eine größere Fläche. In K2 ist die *Impulsstromstärke pro Flächeneinheit* kleiner als in K1; in anderen Worten: die *Impulsstromdichte* ist in K2 kleiner.

Man bezeichnet die Impulsstromdichte mit σ.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Impulsstromdichte}$$

„Mechanische Spannung“ ist einfach ein anderer Name für die Impulsstromdichte:

σ = mechanische Spannung = Impulsstromdichte

Wir wollen nun einen Gegenstand gleichzeitig unter Druck- und unter Zugspannung setzen, zum Beispiel den Tafelschwamm, Abb. 1.65. Wir umfassen ihn mit beiden Händen und drücken ihn von der Seite zusammen; gleichzeitig ziehen wir in Längsrichtung. Das In-

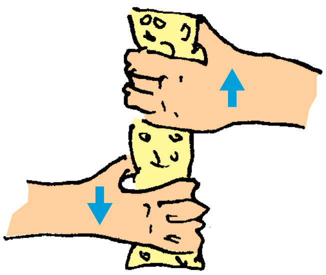


Abb. 1.65 Das Innere des Schwamms steht in senkrechter Richtung unter Zug, in waagrechter unter Druckspannung.

nere des Schwamms spürt nun gleichzeitig Druck und Zug: Druck in der „Rechts-Links-Richtung“ und Zug in der „Oben-Unten-Richtung“. Man kann ihn natürlich auch in beiden Richtungen unter Zug oder in beiden Richtungen unter Druck setzen. Jedenfalls können die beiden Druck- oder Zugspannungen verschiedene Werte haben.

Schließlich können wir den Schwamm aber auch noch in der dritten Raumrichtung, der „Vorn-Hinten-Richtung“ unter eine beliebige Druck- oder Zugspannung setzen, indem wir entsprechend drücken oder ziehen.

Du könntest nun auf die Idee kommen, dass man so weitermachen kann; dass man weitere verschiedene Druckwerte in weiteren Raumrichtungen erzeugen kann. Warum nicht fünf verschiedene Drücke (oder Zugspannungen) in fünf verschiedenen Richtungen? Das geht aber nicht. Sobald man versucht, in einer vierten Richtung den Druck zu verändern, ändern sich automatisch auch die Drücke in den drei ersten Richtungen.

Wir haben also das Ergebnis:

> Die mechanische Spannung kann in drei aufeinander senkrechten Richtungen verschiedene Werte haben.

In festen Köpern, auch solchen wie einem Schwamm, kann man die drei Richtungen und die zugehörigen Spannungswerte beliebig vorgeben (wenigstens solange sie nicht so groß sind, dass es den Körper zerreißt).

Es gibt aber Systeme, in denen die drei Spannungen immer in einem bestimmten Verhältnis stehen.

So sind die drei Spannungen in Flüssigkeiten und Gasen untereinander gleich. Sie heißen dann einfach Druck.

> Flüssigkeiten und Gase: $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = p$

Wir kommen zurück zum elektrischen Feld. Wir wissen schon: in einer Richtung herrscht eine Zugspannung, in den dazu orthogonalen Richtungen Druckspannung. Für die Werte dieser Spannungen gilt eine einfache Regel: Die Zugspannung hat denselben Betrag wie die Druckspannung quer dazu, es ist

> Elektrisches Feld: $\sigma_{\parallel} = -\frac{\varepsilon_0}{2}\left|\vec{E}\right|^2 \qquad \sigma_{\perp} = \frac{\varepsilon_0}{2}\left|\vec{E}\right|^2$

$\sigma_{\parallel}$ ist die Spannung in Richtung der Feldlinien; sie ist negativ, d.h. es ist eine Zugspannung. $\sigma_{\perp}$ ist die Spannung quer zu den Feldlinien; sie ist positiv, also eine Druckspannung. $|\vec{E}|$ ist der Betrag der elektrischen Feldstärke. (Um den Feldstärkebetrag nicht mit der Energie zu verwechseln, haben wir das Symbol der Feldstärke mit Vektorpfeil und Betragsstrichen versehen.) ε_0 ist die elektrische Feldkonstante:

> Elektrische Feldkonstante $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ C/(V·m)

Wir können nun verstehen, warum und wie sich Körper anziehen oder abstoßen. Wir wollen, allein durch betrachten des Feldbildes, voraussagen, in welche Richtung das Feld die geladenen Körper drückt oder zieht.

Alles, was wir dazu wissen müssen, ist, dass in Richtung der Feldlinien Zugspannung herrscht, und quer dazu, also in Richtung der Feldflächen, Druckspannung.

1. Das Plattenpaar

Abb. 1.66 zeigt noch einmal das Feldbild. Wir betrachten das Feld in dem gestrichelt eingerahmten Gebiet.

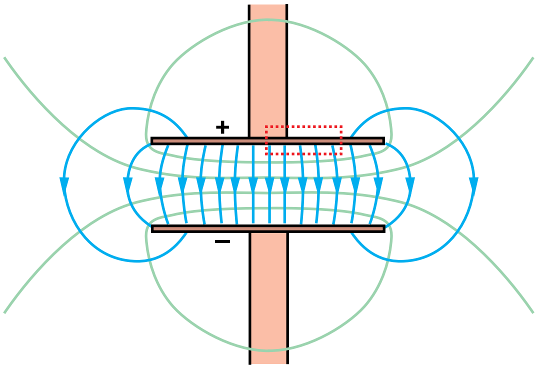


Abb. 1.66 An dem Teil der oberen Platte, der gestrichelt eingerahmt ist, zieht das Feld nach unten.

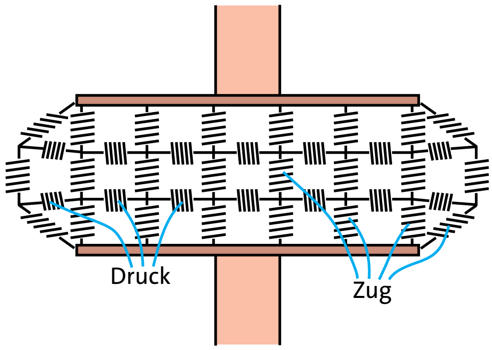


Abb. 1.67 Materielles Modell des elektrischen Feldes zwischen zwei Platten. Die Federn, die in Richtung der Feldlinien liegen, stehen unter Zugspannung. Die Federn, die in Richtung der Feldflächen liegen, stehen unter Druckspannung.

Die Feldlinien münden von unten her in die obere Platte ein. Da in Richtung der Feldlinien Zugspannung herrscht und die Feldlinien auf der Platte enden, zieht das Feld an der Platte, und zwar nach unten. An der unteren Platte zieht es entsprechend nach oben.

Eine Frage bleibt allerdings offen: Quer zu den Feldlinien, also in Richtung der Feldflächen, herrscht Druckspannung. Wenn das Feld in der Waagrechten nach außen drückt – wogegen drückt es denn? Woran hält sich das Feld seitlich fest? Man erkennt es, wenn man ein Modell des Feldes betrachtet, Abb. 1.67. Im Modell wurde das Feld durch viele kleine Federn ersetzt. Ein Teil der Federn liegt in Richtung der Feldlinien. Diese Federn stehen unter Zugspannung. Die anderen Federn liegen in Richtung der Feldflächen. Sie stehen unter Druckspannung.

Wie lautet nun die Antwort auf unsere Frage? Woran hält sich das Feld seitlich fest? Woran halten sich die waagrechten Federn fest, die unter Druck stehen? An den schräg liegenden Federn ganz links und ganz rechts; diese wiederum halten sich an den Platten fest, so dass die Platten in Längsrichtung unter Zugspannung stehen. Zurückübersetzt auf das Feld heißt das: Der Druck im Innern des Feldes bewirkt, dass das Feld an den Platten in Längsrichtung zieht.

Wir fassen zusammen:

> Das Feld zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Platten – zieht die Platten aufeinander zu; – zieht an jeder der Platten in Längsrichtung.

Wir haben damit eine neue Methode, um die Feldstärke zwischen den Platten zu bestimmen, Abb. 1.68: Wir messen den Impulsstrom, der durch das Feld von der oberen zur unteren Platte (in die negative z-Richtung) fließt. Dieser Impulsstrom kommt von oben, fließt durch den Sensor und über die obere Platte ins Feld, und dann über die untere Platte nach unten weg (und dann außen herum über den Tisch und eine Halterung wieder nach oben, so dass der Stromkreis geschlossen ist).

Wir wissen, dass für die mechanische Spannung gilt:

$$F_{el} = \sigma \cdot A\ .$$

Mit

$$\sigma_{\|} = -\frac{\varepsilon_0}{2}\left|\vec{E}\right|^2$$

erhalten wir

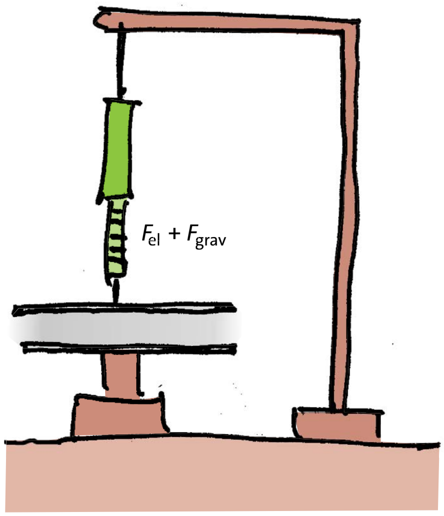


Abb. 1.68 Der Impulsstrommesser zeigt die Summe F_{el} + F_{grav} aus dem Impulsstrom, der durch elektrische Feld in der oberen Platte ankommt, und dem der über das Gravitationsfeld kommt.

$$F_{el} = -\frac{\varepsilon_0}{2}\left|\vec{E}\right|^2 \cdot A$$

und daraus

$$\left|\vec{E}\right| = \sqrt{\frac{-2F_{el}}{\varepsilon_0 \cdot A}}.$$

Das Messgerät zeigt die Summe $F_{el} + F_{grav}$, an, d.h. zusätzlich zum Impulsstrom der über das elektrische Feld abfließt, noch den, der über das Gravitationsfeld in die Erde geht und der dem Gewicht der oberen Kondensatorplatte entspricht. Um F_{el} zu erhalten, muss F_{grav} vom Messwert abgezogen werden.

Da die Impulsströme in gängigen elektrischen Feldern sehr schwach sind, muss das Impulsstrommessgerät sehr empfindlich sein.

Beispiel:
Wir nehmen an, wir hätten gemessen

$$F_{el} = -0{,}05\ \text{N}\ .$$

Die Plattenfläche sei

$$A = 500\ \text{cm}^2$$

Damit ergibt sich für die elektrische Feldstärke:

$$\left|\vec{E}\right| = \sqrt{\frac{-2F_{el}}{\varepsilon_0 \cdot A}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}05\ \mathrm{N}}{8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{C/(V \cdot m)} \cdot 0{,}05\ \mathrm{m}^2}}$$

$$= 4{,}8 \cdot 10^5\ \mathrm{V/m}$$

Wenn man die Feldstärke irgendwo anders her kennt (wir werden bald ein praktischeres Verfahren zu ihrer Messung kennen lernen), kann man das Experiment auch dazu benutzen, die Feldkonstante ε_0 zu bestimmen.

2. Die einzelne Kugel

Wir nehmen an, die Ladung sitze an der Oberfläche der Kugel. Wie das Feldbild aussieht, weißt du. Da die Feldlinien radial nach außen weglaufen, zieht das Feld an der Kugeloberfläche nach außen – in alle Richtungen gleich stark. Stell dir die Kugel am besten als elastische Hohlkugel vor, als Luftballon oder Seifenblase zum Beispiel. Eine solche Kugel wird sich durch das elektrische Aufladen vergrößern.

Auch hier stellt sich die Frage, woran sich das Feld außen festhält. Diesmal lautet die Antwort: an sich selbst. Abb. 1.69 zeigt wieder ein materielles Modell. Es besteht aus radialen Federn und einem Ring. Auch dieses Gebilde zieht an dem inneren Körper in alle Richtungen. Die Federn halten sich außen an dem Ring fest. In dem Ring entstehen dadurch Druckspannungen in der Richtung des Kreisumfangs, also quer zur Richtung der Federn. Ähnlich ist es auch beim elektrischen Feld: Quer zu den radialen Zugspannungen steht es ja tatsächlich unter Druck.

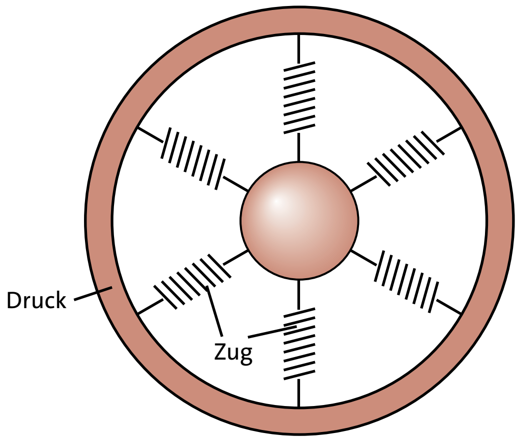


Abb. 1.69 Modell des elektrischen Feldes einer geladenen Kugel. Die Federn ziehen an der Kugeloberfläche nach außen. In dem Ring, an dem sich die Federn festhalten, herrscht Druckspannung.

> Das Feld einer geladenen Kugel zieht an der Oberfläche nach außen.

3. Der elektrisch geladene „Probekörper“

Bringt man einen Körper, der die Ladung Q trägt, an irgendeine Stelle eines elektrischen Feldes der Feldstärke $\vec{E}$, so fließt in den Körper ein Impulsstrom hinein, dessen Stromstärke $\vec{F}$ sich berechnet nach:

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}.$$

Wenn man die Impulsstromstärke und die elektrische Ladung misst, kann man so die elektrische Feldstärke bestimmen.

Wir können jetzt verstehen, wie dieser Impulsstrom zustande kommt. Abb. 1.70 zeigt links einen Ausschnitt aus dem ursprünglichen Feld A ohne zusätzlichen Körper.

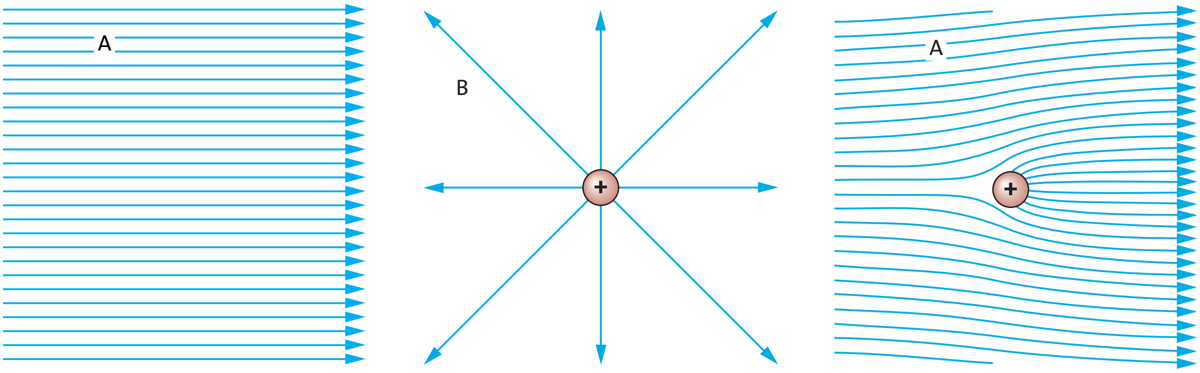


Abb. 1.70 Das Feld A und das Feld B werden addiert. Das resultierende Feld C zieht am Körper stärker nach rechts als nach links. Es fließt ein Nettoimpulsstrom in den Körper hinein.

Das mittlere Bild zeigt den Körper mit seinem Feld B. Bringt man den Körper nun in Feld A, so entsteht ein neues Feld C, rechts. Man erhält C, indem man die Feldstärkevektoren von A und B Punkt für Punkt nach den Regeln der Vektoraddition zusammensetzt. (Das lässt man natürlich den Computer machen.) Du siehst: Auf der rechten Seite des Körpers hat die Feldstärke zugenommen im Vergleich zu B, auf der linken hat sie abgenommen. An der rechten Seite zieht das Feld jetzt mehr als an der linken, d.h. insgesamt zieht das Feld den Körper nach rechts. In anderen Worten: Es fließt ein Nettoimpulsstrom in den Körper hinein. Das ist gerade der Impulsstrom den wir nach der oben stehenden Gleichung berechnen können.

Aufgaben

1. Die geladenen Kugeln eines Dipols werden bekanntlich vom Feld zueinander hingezogen. Wie ist das an dem Feldbild, Abb. 1.54, zu erkennen?
2. Zwei gleich geladene Kugeln werden vom Feld voneinander weggedrückt.
   Wie ist das an dem Feldbild, Abb. 1.55, zu erkennen?
3. Zwischen zwei entgegengesetzt gleich geladenen Platten (Plattenfläche 2400 cm^2) befindet sich ein homogenes elektrisches Feld. Das Feld zieht die Platten aufeinander zu. Der entsprechende Impulsstrom wird gemessen und man findet 0,0025 N. Wie groß ist die elektrische Feldstärke zwischen den Platten?
4. Abb. 1.71 zeigt zwei konzentrische Kugeln. Die innere ist negativ geladen. Die äußere trägt positive Ladung, und zwar vom selben Betrag wie die innere. Das Feld befindet sich nur im Zwischenraum zwischen den beiden Kugeln. Skizziere Feldlinien und -flächen.

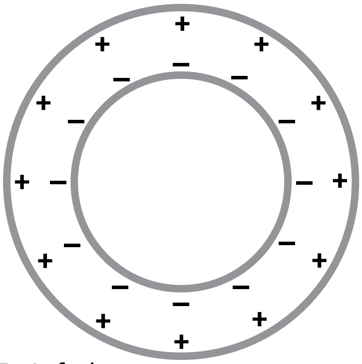


Abb. 1.71 Zu Aufgabe 4

1.20 Der Kondensator – die Kapazität

Kondensatoren verwendet man, um elektrische Ladung zu speichern und um Energie zu speichern. Ein Kondensator besteht aus zwei dünnen Metallplatten oder -schichten, die einen sehr geringen Abstand voneinander haben und gegeneinander elektrisch isoliert sind. Die gespeicherte Ladung sitzt auf den Platten, die Energie im Feld zwischen den Platten. Das Feld eines Kondensators ist dasselbe wie das von Abb. 1.57. Beim „Laden“ des Kondensators wird elektrische Ladung von der einen Platte auf die andere „gepumpt“. Die eine Platte trägt dann gerade so viel negative Ladung wie die andere positive. Insgesamt ist der Kondensator also neutral. Das technische Symbol eines Kondensators sind zwei kurze, parallele, dicke Striche, siehe die folgenden Abbildungen.

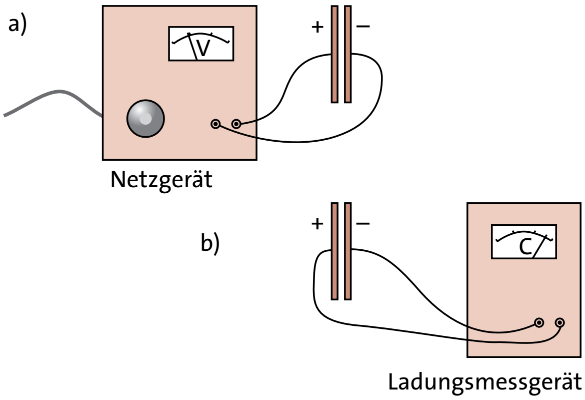


Abb. 1.72 (a) Der Kondensator wird geladen: Das Netzgerät „pumpt“ elektrische Ladung von der einen Platte auf die andere. (b) Der Kondensator entlädt sich über das Messgerät.

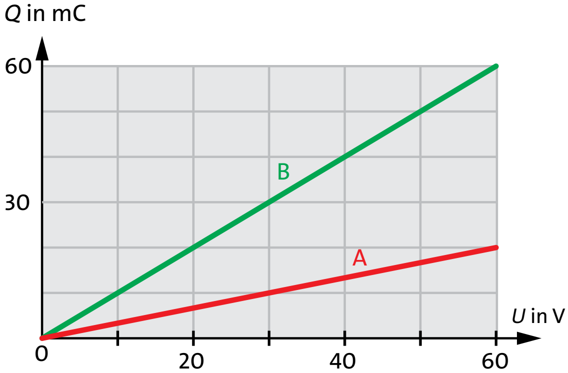


Abb. 1.73 Die Spannung zwischen den Platten eines Kondensators ist proportional zur Ladung, die auf den Platten sitzt. Die Kapazität von Kondensator B ist dreimal so groß wie die von A.

Wenn ein Kondensator geladen ist, so besteht zwischen seinen Platten eine elektrische Potenzialdifferenz. Je größer die Ladung Q, desto größer ist auch die Potenzialdifferenz U. Wir wollen den Zusammenhang zwischen Q und U untersuchen. Wir laden einen Kondensator mithilfe eines Netzgeräts auf, Abb. 1.72a. Der Ladevorgang geht sehr schnell. Man braucht die Anschlüsse des Netzgeräts nur kurz mit den Zuleitungen des Kondensators zu berühren. Die Spannung zwischen den Platten des Kondensators ist nun gleich der Spannung des Netzgeräts. Wir messen dann Q, indem wir den Kondensator über ein Ladungsmessgerät entladen, Abb. 1.72b. Die Ladung der positiven Platte fließt über das Messgerät zur negativen, bis beide Platten ungeladen sind.

Wir wiederholen den Vorgang „Aufladen-Messen" mit anderen Spannungen und erhalten so für jede Spannung einen zugehörigen Ladungswert. Wir tragen die Werte in einem Q-U-Diagramm auf und stellen fest: Die Ladung ist zur Spannung proportional,

$$Q \sim U.$$

Diese Aussage ist gleichbedeutend damit, dass der Quotient Q/U konstant ist. Man nennt diesen Quotienten die Kapazität C des Kondensators:

$$C = \frac{Q}{U}$$

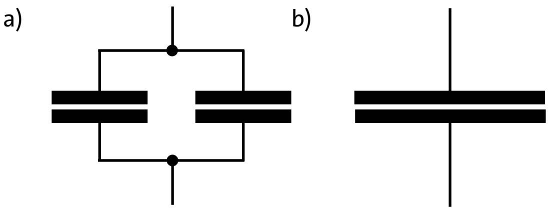


Abb. 1.74 (a) Zwei parallel geschaltete Kondensatoren speichern doppelt so viel elektrische Ladung wie ein einziger (bei gleicher Spannung). (b) Ein Kondensator der doppelten Plattenfläche speichert doppelt soviel elektrische Ladung wie ein Kondensator mit der einfachen Plattenfläche.

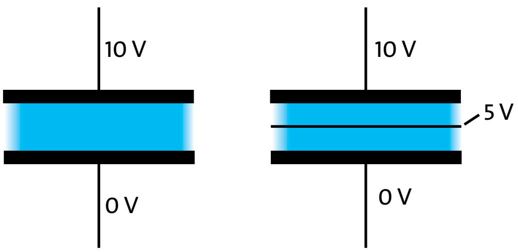


Abb. 1.75 Der Kondensator lässt sich in Gedanken zerlegen in zwei in Reihe angeordnete Kondensatoren mit dem halben Plattenabstand. An jedem Teilkondensator liegt die halbe Spannung.

Ist die Kapazität eines Kondensators B dreimal so groß wie die eines anderen Kondensators A, so befindet sich, bei vorgegebener Spannung, auf B dreimal so viel Ladung wie auf A, Abb. 1.73.

Beachte, dass Q nicht die Gesamtladung des Kondensators ist; die Gesamtladung ist immer null. Q ist die Ladung der positiv geladenen Platte; U ist die Differenz „hohes Potenzial minus niedriges Potenzial". Der Wert der Kapazität ist auf technische Kondensatoren aufgedruckt. Aus der letzten Gleichung folgt, dass die Maßeinheit Coulomb/Volt ist. Für diese Maßeinheit benutzt man die Abkürzung Farad (F). Es gilt also

$$1\ \mathrm{C/V} = 1\ \mathrm{F}.$$

Ein Farad ist eine sehr große Einheit. Die Kapazitäten technischer Kondensatoren liegen oft im Bereich von Nanofarad bis Millifarad.

> Die elektrische Ladung Q, die auf einer der Platten eines Kondensators sitzt, ist proportional zur Spannung U zwischen den Platten.
>
> $$Q = C \cdot U$$
>
> C ist die Kapazität des Kondensators.

Wovon hängt die Kapazität eines Kondensators ab? Wie muss ein Kondensator gebaut sein, damit er eine große Kapazität hat? Diese Fragen sind nicht schwer zu beantworten.

Wir beginnen unsere Überlegung, indem wir von einem bestimmten Kondensator ausgehen und versuchen, ihn zu verbessern, d.h. seine Kapazität zu vergrößern.

Wie kann man einen Kondensator verändern, damit er bei gleicher Spannung mehr Ladung trägt? Man vergrößert zunächst die Plattenfläche. Um einzusehen, dass das zu einer Kapazitätsvergrößerung führen muss, fügen wir einen Zwischenschritt ein. Es ist einleuchtend, dass zwei „parallel geschaltete" Kondensatoren, Abb. 1.74a, doppelt so viel Ladung speichern kann wie ein einziger. Nun können wir uns aber die beiden parallelen Kondensatoren auch vorstellen als einen einzigen mit einer doppelt so großen Plattenfläche, Abb. 1.74b.

Mit einer ähnlichen Überlegung lässt sich zeigen, wie der Einfluss des Plattenabstands auf die Kapazität ist. Den Kondensator in Abb. 1.75 kann man in Gedanken zerlegen in zwei „in Reihe geschaltete" Kondensatoren. An jedem einzelnen liegt aber nur die halbe Spannung. Ein solcher Teilkondensator speichert also dieselbe Ladung wie der ganze. Die Spannung ist aber nur halb so groß. Das bedeutet, dass der Kondensator mit dem halben Plattenabstand die doppelte Kapazität hat.

Wir fassen die beiden Ergebnisse zusammen:

Die Kapazität eines Kondensators ist proportional zur Plattenfläche A und umgekehrt proportional zum Plattenabstand d:

$$C \sim \frac{A}{d}$$

Um daraus eine Gleichung zu machen, muss man einen Proportionalitätsfaktor einführen:

$$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

A = Plattenfläche
d = Plattenabstand
$\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{C/(V \cdot m)}$
= *elektrische Feldkonstante*

Den Wert der elektrischen Feldkonstante bestimmt man durch eine Messung.

Aufgaben

1. Ein Kondensator wird mit 20 µA zehn Millisekunden lang geladen. Er erreicht dabei eine Spannung von 60 Volt. Wie groß ist seine Kapazität?
2. Ein Kondensator von 16 µF wird geladen, bis seine Spannung 10 Volt beträgt. Welche Ladung sitzt dann auf seinen Platten?
3. Welchen Plattenabstand muss ein Kondensator mit einer Plattenfläche von 0,5 m^2 haben, damit seine Kapazität 1 µF beträgt?
4. Zwei Kondensatoren von je 8 µF werden parallel geschaltet. Wie groß ist die Gesamtkapazität? Formuliere eine Regel.
5. Zwei Kondensatoren von je 8 µF werden in Reihe geschaltet. Wie groß ist die Gesamtkapazität? Formuliere eine Regel.

1.21 Flächen konstanten Potenzials

Jeder Punkt eines elektrischen Stromkreises befindet sich auf einem bestimmten elektrischen Potenzial. Wenn man von einem Punkt, der sich auf dem Potenzial φ_1 befindet, zu einem Punkt geht, dessen Potenzial φ_2 ist, so kommt man an allen Zwischenwerten vorbei. Wir beginnen zum Beispiel am Punkt P_1 in Abb. 1.76

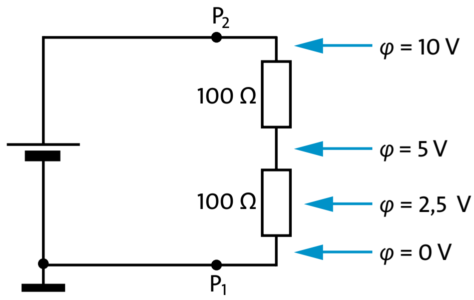


Abb. 1.76 Wenn man sich von P1 (0 Volt) nach P2 (10 Volt) bewegt, kommt man an allen Potenzialwerten zwischen 0 Volt und 10 Volt vorbei.

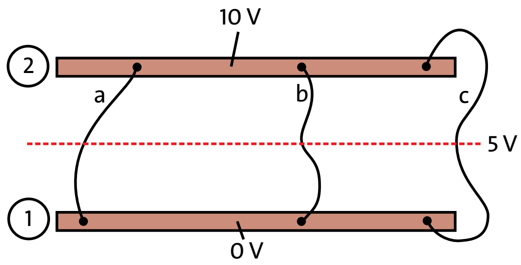


Abb. 1.77 Egal auf welchem Weg man sich von Platte 1 nach Platte 2 bewegt: Man durchläuft einen Punkt, wo das Potenzial 5 Volt beträgt.

und gehen über die beiden Widerstände nach P_2. Das Potenzial von P_1 sei 0 V, das von P_2 10 V. Wir kommen an einer Stelle vorbei, wo das Potenzial 5 V beträgt, nämlich gerade zwischen den beiden Widerständen. Es gibt aber auch einen Ort, an dem das Potenzial 1 V ist und einen, wo es 2 V oder 2,5 V ist oder 2,6 V oder 7,344 V etc., nämlich innerhalb eines der Widerstände. So befindet sich die Stelle mit dem Potenzial 2,5 V irgendwo im Innern des unteren Widerstandes.

Dass man auf dem Weg von P_1 nach P_2 an allen Zwischenwerten des Potenzials vorbeikommt, gilt aber nicht nur für Wege innerhalb des Stromkreises. Auch jeder Punkt außerhalb hat ein bestimmtes Potenzial, und auch wenn man sich außerhalb des Stromkreises von P_1 nach P_2 bewegt, durchläuft man alle Potenzialwerte zwischen φ_1 und φ_2.

Wie das zu verstehen ist, sieht man am besten anhand eines einfachen Beispiels. Wir betrachten noch einmal einen Kondensator, Abb. 1.77.

Platte 1 (unten) befinde sich auf dem Potenzial φ_1 = 0 V, Platte 2 (oben) auf φ_2 = 10 V. Wenn man sich von Platte 1 nach Platte 2 bewegt, durchläuft man zwangsläufig alle Werte zwischen φ_1 und φ_2. So kommen wir, wenn wir den Weg a wählen, irgendwo an eine Stelle mit dem Potenzial 5 V. Aber auch wenn wir den Weg b oder c wählen, müssen wir irgendwo durch einen Punkt mit 5 V hindurchlaufen. Es muss daher zwischen den beiden Platten in unserer Abbildung eine Linie geben, auf der alle Punkt mit φ = 5 Volt liegen. Und es muss eine andere Linie geben, auf der alle Punkte mit φ = 6 Volt liegen und eine, auf der alle Punkte mit φ = 2 Volt liegen usw.

Es ist so, wie wenn man einen 200 m hohen Berg hinaufgeht. Egal, welchen Weg man nimmt, man wird sich dabei irgendwann in einer Höhe von 100 m befinden. Es gibt auf der Landkarte eine Linie, die alle Orte der Höhe 100 m miteinander verbindet, eine Höhenlinie.

Abb. 1.77 stellt nur einen zweidimensionalen Schnitt durch die Plattenanordnung dar. Im dreidimensionalen Raum liegen die 5-Volt-Punkte nicht auf einer Linie, sondern auf einer Fläche, ebenso die 6-Volt-Punkte, die 2-Volt-Punkte usw. In anderen Worten: Zwischen den Platten befinden sich Flächen, auf denen das Potenzial einen einheitlichen Wert hat. Jeder Punkt des Feldes hat ein bestimmtes elektrisches

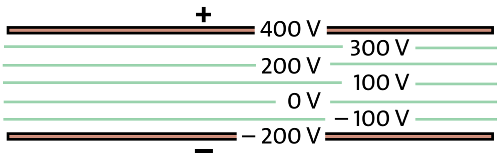


Abb. 1.78 Es wurden diejenigen Feldflächen eingezeichnet, deren Potenziale sich um jeweils 100 Volt unterscheiden. Da das Feld homogen ist, haben diese Flächen alle denselben Abstand voneinander.

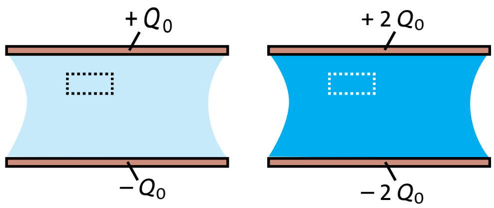


Abb. 1.79 Auf den Platten des rechten Kondensators sitzt doppelt so viel Ladung wie auf denen des linken. Auch Spannung und Feldstärke sind rechts doppelt so hoch wie links.

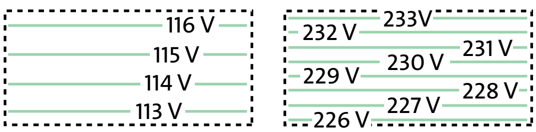


Abb. 1.80 Ausschnitte aus den Kondensatorfeldern von Abb. 1.79. Die Dichte der Feldflächen im rechten Bild ist doppelt so groß wie im linken.

Potenzial und liegt auf einer dieser Flächen.

Wir wissen, dass jeder Punkt eines Feldes auf einer Feldfläche liegt. Mit den Flächen konstanten Potenzials haben wir nun einfach einen alten Bekannten wiedergetroffen, denn sie sind mit den Feldflächen identisch.

> Auf einer Feldfläche ist das elektrische Potenzial konstant.

Abb. 1.78 zeigt einen Kondensator. Das Potenzial der unteren Platte ist –200 V, das der oberen Platte +400 V. Eingezeichnet sind die Feldflächen, die zu den ganzzahligen Hundertern des Potenzials gehören.

Da das Feld im Innern des Kondensators homogen ist, haben sie dort alle denselben Abstand voneinander. Man kann nun aus einem solchen Feldflächenbild auch die Feldstärke ablesen. Um zu sehen, wie das geht, vergleichen wir zunächst zwei homogene Felder. Abb. 1.79 zeigt zwei Kondensatoren, die gleichartig gebaut sind: gleicher Plattenabstand, gleiche Plattenfläche. Sie sind aber unterschiedlich stark geladen: Auf den Platten des rechten sitzt doppelt so viel elektrische Ladung wie auf den Platten des linken. Also ist auch die elektrische Spannung zwischen den Platten des rechten Kondensators doppelt so hoch wie die zwischen den Platten des linken (warum?), und also ist auch die Feldstärke im rechten doppelt so hoch wie im linken (warum?).

Wir wollen nun aus jedem der beiden Kondensatorfelder einen kleinen Ausschnitt – in der Abbildung gestrichelt – vergrößert betrachten, Abb. 1.80. Dargestellt sind die Feldflächen in 1-Volt-Schritten.

Nun das Problem, das wir untersuchen wollen: Wie sieht man den Feldflächenbildern von Abb. 1.80 die Feldstärke an?

Die Frage hat zwei Teile:

1. Wie sieht man den Bildern die Richtung von $\vec{E}$ an?
2. Wie sieht man den Bildern den Betrag von $\vec{E}$ an?

Die erste Frage wurde früher schon beantwortet : Der Feldstärkevektor steht orthogonal auf den Feldflächen.

Interessanter ist im Augenblick die Frage nach dem Betrag. Auch der Betrag kann aus den Bildern abgelesen werden. Je dichter die Feldflächen liegen, desto größer ist die Feldstärke. Wir wählen zwei beliebige Feldflächen aus. Zu diesen gehört eine bestimmte Potenzialdifferenz $\Delta\varphi$, und sie haben einen bestimmten Abstand d.

Der Quotient $\Delta\varphi/d$ ist ein Maß für die Dichte der Feldflächen. Dieser Quotient ist nun auch gleich dem

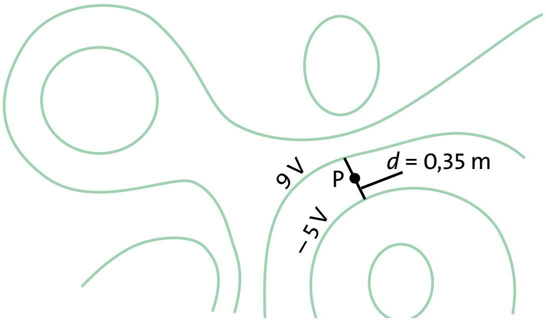


Abb. 1.81 Bestimmung der Feldstärke im Punkt P eines inhomogenen Feldes: Man wählt zwei benachbarte Feldflächen aus und dividiert die zugehörige Potenzialdifferenz (hier 14 V) durch den Abstand (hier 0,35 m).

Betrag der elektrischen Feldstärke:

$$\left|\vec{E}\right| = \frac{\Delta\varphi}{d}$$

Wie man aus einem Feldflächenbild die elektrische Feldstärke abliest:
Richtung von $\vec{E}$: orthogonal zu den Feldflächen
Betrag von $\vec{E}$: Quotient aus Potenzialdifferenz und Abstand von zwei Feldflächen.

Als Maßeinheit der Feldstärke ergibt sich aus der Gleichung V/m, d.h. die Einheit, die wir früher schon benutzt hatten.

Wir haben unsere neue Gleichung anhand des homogenen Feldes eines Kondensators erläutert. Wichtig ist die Formel aber deshalb, weil sie für beliebige, also auch inhomogene Felder gilt. In einem inhomogenen Feld, wie dem von Abb. 1.81, ändert sich die Feldstärke von Ort zu Ort. Um die Feldstärke in einem beliebigen Punkt P zu bestimmen, betrachtet man zwei Feldflächen in der engen Nachbarschaft von P. Den Betrag der Feldstärke erhält man auch hier als Quotienten aus der Potenzialdifferenz der beiden Feldflächen und ihrem Abstand.

In einem homogenen Feld ist die Feldstärke überall dieselbe. Man kann daher zur Bestimmung der Feldstärke auch Feldflächen nehmen, die weit voneinander entfernt sind. Bei einem Kondensator kann man zum Beispiel einfach die Platten selbst nehmen. Als Feldstärkebetrag des Kondensatorfeldes ergibt sich daher der Quotient aus der Spannung U zwischen den Platten und dem Plattenabstand d.

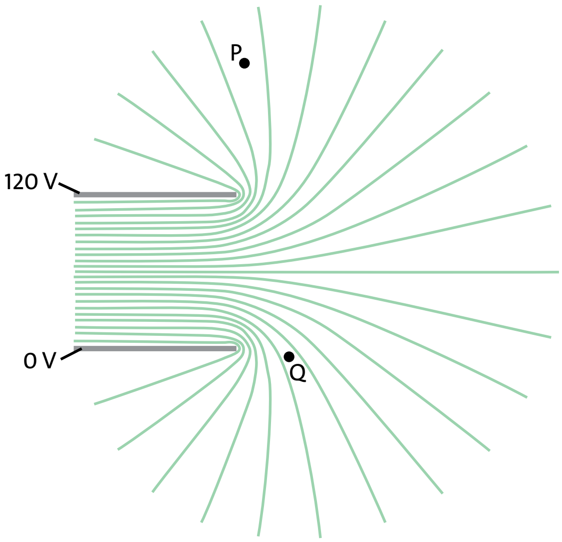


Abb. 1.82 Zu Aufgabe 2

Elektrische Feldstärke im Kondensator:

$$\left|\vec{E}\right| = \frac{U}{d} \qquad (1.3)$$

Aufgaben

1. An einem Kondensator mit einem Plattenabstand von d = 0,5 cm liegt eine Spannung von 2000 Volt. Wie groß ist die elektrische Feldstärke des Feldes zwischen den Platten?
2. Welchen Betrag hat die Feldstärke in den Punkten P und Q des Kondensatorfeldes von Abb. 1.82? (Der Maßstab ist 10:1, d.h. das Bild ist 10 mal so groß wie der wirkliche Kondensator.)

1.22 Noch einmal der Kondensator

Wir vergrößern den Plattenabstand eines Kondensators von seinem ursprünglichen Wert d auf den Wert $d' = 3d$, und fragen danach, was dabei mit der Kapazität, der Ladung, der Spannung und der elektrischen Feldstärke passiert, Abb. 1.83. Zunächst zur Kapazität.

Wegen

$$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

nimmt die Kapazität vom Ausgangswert C ab auf

$$C' = C/3.$$

Was Ladung und Spannung betrifft, müssen wir zwi-

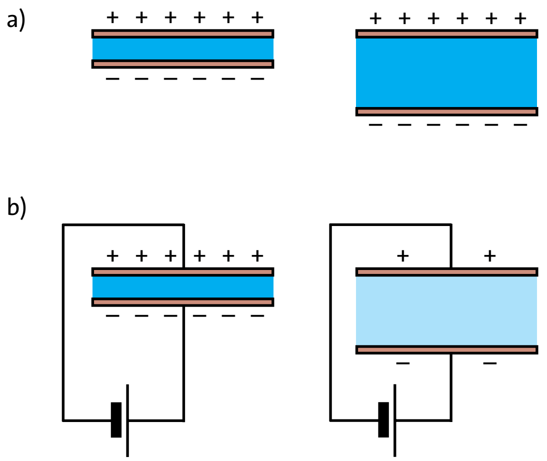


Abb. 1.83 Die Platten eines Kondensators werden auseinander gezogen, (a) bei konstanter Ladung, (b) bei konstanter Spannung.

schen zwei Möglichkeiten der Realisierung des Prozesses unterscheiden: Wir halten, während wir *d* verändern, entweder die Ladung konstant, oder die Spannung.

1. Konstante Ladung, $Q' = Q$, Abb. 1.83a.

Man sorgt dafür, dass während des Auseinanderziehens der Platten Ladung weder zunoch abfließen kann. Mit $Q = C \cdot U$ folgt $U' = 3U$. Mit Gleichung (1.3) folgt

$$|\vec{E}'| = |\vec{E}|$$

Beim Auseinanderziehen der Platten eines geladenen Kondensators nimmt also die Spannung zu und die Feldstärke bleibt konstant.

2. Konstante Spannung, U' = U, Abb. 1.83b.

Man lässt den Kondensator während des Auseinanderziehens der Platten mit der Spannungsquelle verbunden. Mit $Q = C \cdot U$ folgt $Q' = Q/3$. Mit Gleichung (1.3) folgt

$$|\vec{E}'| = |\vec{E}|/3 \,.$$

Beim Auseinanderziehen der Platten bei konstanter Spannung nehmen also Ladung und Feldstärke ab.

Eine unserer Feststellungen ist besonders bemerkenswert:

> Bei fester Ladung ist die Feldstärke im Kondensator unabhängig vom Plattenabstand.

Man kann dieses Ergebnis auch so ausdrücken: Vergrößert man den Plattenabstand bei konstantem Q, so nimmt die Menge an Feldstoff zu, während seine Dichte gleich bleibt.

Aufgaben

1. Untersuche, wie sich Kapazität, Ladung, Spannung und Feldstärke ändern, wenn man die Fläche des Kondensators auf das dreifache vergrößert (wobei der Plattenabstand konstant gelassen wird). Unterscheide auch hier die Fälle $Q = \text{const}$ und $U = \text{const}$.

1.23 Die Energie des elektrischen Feldes

Der Kondensator in Abb. 1.84 wird zunächst geladen, indem man ihn kurz mit einem 6-V-Netzgerät verbindet. Er wird dann mit einem kleinen Elektromotor verbunden. Der Motor läuft ein paar Sekunden lang.

Wir erkennen an diesem Experiment, wozu ein Kondensator verwendet werden kann: Zum Speichern von Energie. Beim Laden der Platten mit Elektrizität entsteht zwischen den Platten ein elektrisches Feld, und dieses enthält, genauso wie ein magnetisches Feld, Energie. Beim Laden geht Energie vom Netzgerät in den Kondensator hinein. Beim Entladen gibt sie der Kondensator an den Motor ab.

Der Kondensator kann damit eine ähnliche Aufgabe erfüllen wie der Akkumulator, denn auch der Akku ist ja ein Energiespeicher. Wie der Akku bekommt der Kondensator die Energie beim Laden mit dem Energieträger Elektrizität, und er gibt sie beim Entladen mit demselben Energieträger wieder ab. Er unterschei-

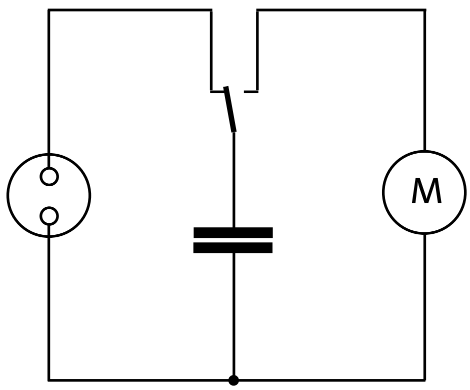


Abb. 1.84 Kondensator als Energiespeicher

det sich aber vom Akku in zwei Eigenschaften: Man kann erstens die Energie in den Kondensator viel schneller hineinbringen und viel schneller herausholen, als beim Akku. Dafür ist aber zweitens das Fassungsvermögen eines Kondensators (für die Energie) kleiner als die eines gleich großen Akkumulators. Manche Armbanduhren, die ihre Energie von Solarzellen bekommen, haben als Energiespeicher für die Zeit, in der die Uhr kein Licht bekommt, einen Kondensator.

Wir wollen im Folgenden die Energie, die ein elektrisches Feld enthält, berechnen.

Wir laden einen Kondensator der Kapazität C, indem wir einen elektrischen Strom der konstanten Stromstärke I eine bestimmte Zeit lang fließen lassen: vom Zeitpunkt $t = 0$ bis zum Zeitpunkt $t = t_0$. Die Ladung auf den Platten des Kondensators nimmt dabei linear mit der Zeit zu

$$Q = I \cdot t\,.$$

Am Ende, d.h. zum Zeitpunkt t_0 befindet sich die Ladung vom Betrag

$$Q_0 = I \cdot t_0$$

auf auf jeder der beiden Platten. Außerdem fließt beim Laden ein Energiestrom

$$P = U \cdot I$$

in den Kondensator hinein. Während die elektrische Stromstärke I konstant bleibt, nimmt die Spannung U während des Ladevorgangs zu

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{I \cdot t}{C}$$

Damit ergibt sich für den Energiestrom

$$P = \frac{1}{C} \cdot I^2 \cdot t.$$

Auch der Energiestrom P nimmt also linear mit der Zeit zu, Abb. 1.85.

Was wir suchen, ist aber nicht der Energiestrom P, sondern die Energie E_0 zum Zeitpunkt t_0. Wenn der Energiestrom zeitlich konstant wäre, gälte zwischen Energiestrom P und Energie E der Zusammenhang

$$E = P \cdot t,$$

also wäre auch

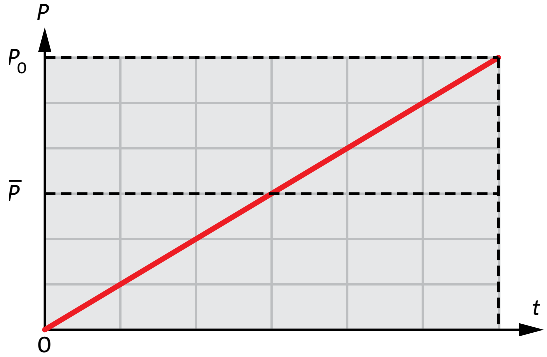


Abb. 1.85 Beim Laden des Kondensators mit konstanter elektrischer Stromstärke nimmt der Energiestrom linear mit der Zeit zu.

$$E_0 = P \cdot t_0.$$

Wenn aber P, wie in unserem Fall, nicht zeitlich konstant ist, muss man zur Berechnung von E_0 den zeitlichen Mittelwert von P einsetzen:

$$E_0 = \overline{P} \cdot t_0.$$

Wie man Abb. 1.84 ansieht, ist der Mittelwert von P

$$\overline{P} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{C} \cdot I^2 \cdot t_0.$$

Damit ergibt sich die Energie:

$$E_0 = \overline{P} \cdot t_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{C} \cdot I^2 \cdot t_0^2.$$

Wir setzen $Q_0 = I \cdot t_0$ und erhalten

$$E_0 = \frac{Q_0^2}{2C}.$$

Den Index 0 hatten wir nur für die Herleitung gebraucht, um zwischen Variable und Endwert zu unterscheiden. Wir können ihn jetzt weglassen, denn die Gleichung gilt ja für jedes beliebige Q. Wir haben damit die wichtige Beziehung

$$E = \frac{Q^2}{2C}.$$

(Fällt dir auf, dass diese Gleichung eine formale Ähnlichkeit mit

$$E = \frac{p^2}{2m}.$$

hat?)

Mithilfe von $Q = C \cdot U$ können wir auch schreiben:

$$E = \frac{C}{2}U^2. \tag{1.4}$$

Dies ist die gesamte im Feld enthaltene Energie. Man kann daraus die Energiedichte ρ_E im Feld berechnen, d.h. Energie geteilt durch Volumen:

$$\rho_E = \frac{E}{V}.$$

Wir setzen in Gleichung (1.4)

$$U = |\vec{E}| \cdot d$$

und

$$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

und erhalten

$$E = \frac{\varepsilon_0}{2} \cdot \frac{A}{d} \cdot \left(|\vec{E}| \cdot d\right)^2 = \frac{\varepsilon_0}{2} \cdot |\vec{E}|^2 \cdot V.$$

Im letzten Schritt haben wir für $A \cdot d$ das Volumen V eingesetzt. Die Energiedichte ergibt sich nun einfach zu

$$\rho_E = \frac{\varepsilon_0}{2} \cdot |\vec{E}|^2.$$

Diese Gleichung gilt nicht nur für das Feld eines Kondensators, sondern für jedes beliebige elektrische Feld.

> Die Energie im Feld eines Kondensators lässt sich aus Kapazität und Spannung berechnen:
>
> $$E = \frac{C}{2}U^2.$$
>
> Die Energiedichte eines elektrischen Feldes lässt sich aus der Feldstärke berechnen:
>
> $$\rho_E = \frac{\varepsilon_0}{2} \cdot |\vec{E}|^2.$$

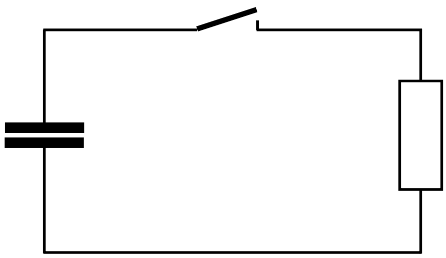


Abb. 1.86 Wenn der Schalter geschlossen wird, entlädt sich der Kondensator über den Widerstand. Wie sieht die Funktion $Q(t)$ aus?

Aufgaben

1. Ein Kondensator der Kapazität 16 µF wird 8 Sekunden lang mit einer elektrischen Stromstärke von 10 mA geladen.
   (a) Welche Ladung sitzt am Ende des Ladevorgangs auf seinen Platten?
   (b) Wie viel Energie enthält das Feld?
2. Ein 80-µF-Kondensator wird an ein 300-Volt-Netzgerät angeschlossen. Wie viel Energie geht dabei ins Feld des Kondensators? Der Plattenabstand betrage 8 µm. Wie groß ist die Energiedichte im Feld des Kondensators?
3. Zum Laden eines Kondensators auf eine Spannung von 10 000 Volt wird eine Energie von 1,6 Joule gebraucht.
   (a) Welche Kapazität hat der Kondensator?
   (b) Welche Ladung sitzt auf den Platten des Kondensators?
4. Die zylinderförmigen Platten eines „Zylinderkondensators“ haben die Radien 24 mm und 25 mm. Die Zylinderlänge beträgt 120 mm. Der Kondensator werde auf 2000 Volt geladen.
   (a) Berechne die Kapazität des Kondensators.
   (b) Welche Ladung befindet sich auf dem Kondensator?
   (c) Wie viel Energie steckt im Feld des Kondensators?
   (d) Wie groß ist die Energiedichte?
5. Wie ändert sich die Energie im Feld des Kondensators von Abb. 1.83a und b beim Vergrößern des Plattenabstandes? Untersuche, wie sich die Energie ändert, wenn man die Fläche des Kondensators auf das dreifache vergrößert (wobei der Plattenabstand konstant gelassen wird). Unterscheide auch hier die Fälle Q = const und U = const.
6. Die Anschlüsse eines geladenen Kondensators A werden mit denen eines ungeladenen Kondensators B verbunden. A und B haben die selbe Kapazität. Was passiert? Wie sind die Werte von elektrischer Ladung, elektrischer Spannung, Feldstärke und Energie für A und B einzeln? Fällt dir etwas auf? Versuche zu erklären. Eine ähnliche Erscheinung war uns in der Mechanik begegnet (MECHANIK, Kap. 5.4, Aufgaben 3 und 8).

1.24 Entladekurve des Kondensators

Wir stellen uns vor, der Kondensator in Abb. 1.86 sei geladen. (Der Ladestromkreis ist nicht dargestellt.) Schließt man den Schalter, so entlädt er sich über den Widerstand.

Wir interessieren uns für den Entladevorgang: Wie schnell entlädt sich der Kondensator? Wie ist der zeitliche Verlauf $Q(t)$ der Ladung des Kondensators?

Für die Beantwortung dieser Fragen brauchen wir ein mathematisches Verfahren, das uns bisher noch nicht begegnet war. Wir müssen eine *Differenzialgleichung* lösen.

Es ist immer eine gute Idee, sich zu überlegen wie die Lösung aussehen könnte, bevor man eine Rechnung beginnt. In unserem Fall heißt das: Was erwarten wir bezüglich $Q(t)$?

Wenn wir den Schalter geschlossen haben, fließt ein elektrischer Strom durch den Widerstand. Am Anfang ist die Spannung noch hoch, und wegen

$$I = \frac{U}{R}.$$

auch die Stromstärke. Weil der elektrische Strom fließt, nimmt die Ladung des Kondensators ab. Wegen

$$U = \frac{Q}{C}$$

nimmt auch die Spannung ab. Damit nimmt aber auch die Stromstärke ab. Wenn die Stromstärke kleiner geworden ist, nimmt die Ladung langsamer ab als vorher usw. usw. Man sieht: Je weniger Ladung auf dem Kondensator noch sitzt, desto langsamer läuft der Entladungsprozess.

Bevor wir weiter überlegen und rechnen, wollen wir eine kleine allgemeinere Betrachtung anstellen. Vorgänge wie den eben angesprochenen gibt es noch viele andere. Zunächst noch einmal die Besonderheit dieser Prozesse:

Je mehr von irgendetwas schon da ist, desto schneller ändert sich die Menge.

Hierzu zwei Beispiele:

Beispiel: Kaninchen

Wir nehmen an, es werden ein paar Kaninchen ausgesetzt in einer Gegend, in der es beliebig viel zu fressen gibt, und in der die Kaninchen nicht durch irgendwelche Feinde bedroht sind. Die ausgesetzten Kaninchen werden sich nun vermehren, Abb. 1.87. Sie werden Kaninchenkinder bekommen, sodass es in der nächsten Generation mehr Kaninchen gibt. Diese Kinder werden wieder Kinder bekommen, und es wird wieder mehr Kaninchen geben. Die Zunahme in der zweiten Generation ist größer als in der ersten, denn es gibt ja jetzt mehr Eltern. Also: *Je mehr Kaninchen es gibt, desto größer die Zuwachsrate.*

Beispiel: Licht im Meer

Sonnenlicht trifft auf die Meeresoberfläche, Abb. 1.88. Das Wasser ist nicht ganz rein, sondern absorbiert das Licht teilweise. Wir nehmen an, in 10 m Tiefe kommt nur noch die Hälfte des Lichts an, die Hälfte wurde also absorbiert. Im Verlauf der nächsten 10 m wird von dem übrig gebliebenen Licht wieder die Hälfte absorbiert, usw., also: *Je weniger Licht noch da ist, desto weniger wird absorbiert.*

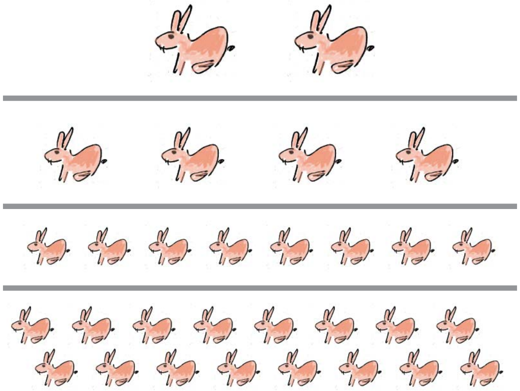


Abb. 1.87 Vier Generationen von Kaninchen: Je mehr es gibt, desto schneller nimmt ihre Anzahl zu.

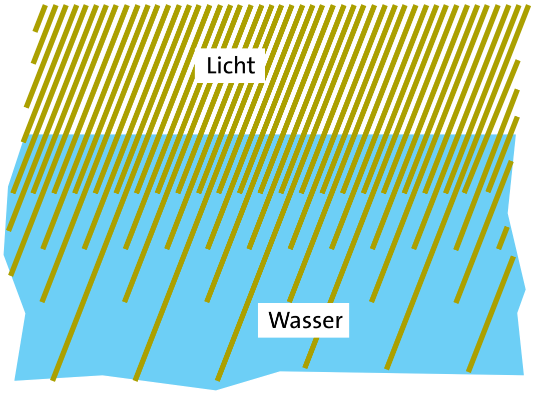


Abb. 1.88 Je schwächer die Lichtintensität ist, desto geringer ist ihre Abnahme mit der Wassertiefe.

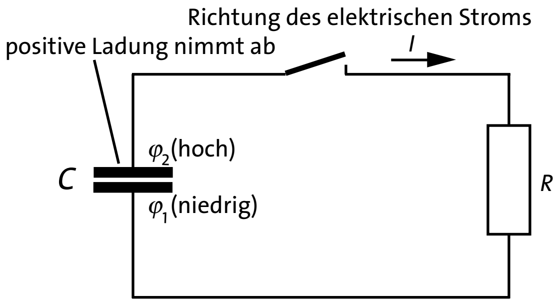


Abb. 1.89 Eine positive Stromstärke verursacht eine Abnahme der Ladung des Kondensators.

Wie die Ladung auf dem Kondensator abnimmt, wie die Kaninchenpopulation zunimmt oder wie die Lichtintensität im Wasser abnimmt, berechnet man immer mit demselben Verfahren. Wir werden dieses Verfahren anhand des sich entladenden Kondensators kennen lernen.

Im Widerstand fließt der elektrische Strom (Stromstärke I) vom hohen zum niedrigen Potenzial, in Abb. 1.89 von oben nach unten. Dieser Strom bewirkt, dass die Ladung Q des Kondensators (= Ladung auf der oberen, positiv geladenen Platte) abnimmt. Es ist daher:

$$I = -\frac{dQ}{dt}$$

Wir ersetzen hier

$$I = \frac{U}{R}.$$

und

$$Q = C \cdot U$$

und erhalten

$$\frac{U}{R} = -C\frac{dU}{dt}.$$

Wir schreiben die Gleichung noch etwas um und erhalten die Differenzialgleichung für das Entladen eines Kondensators über einen Widerstand:

$$U + RC\frac{dU}{dt} = 0.$$

Was kann man mit einer solchen Gleichung anfangen? Außer dem Widerstand R und der Kapazität C, deren Werte wir als bekannt annehmen, enthält die Gleichung die elektrische Spannung U und ihre Zeitableitung dU/dt. U ist eine Funktion der Zeit. Was wir suchen, ist diese Funktion $U(t)$. Wir müssten also die Differenzialgleichung irgendwie nach U „auflösen". Mit den alten Methoden, die du kennst, geht das aber nicht, denn die Gleichung enthält U nicht nur direkt, sondern auch noch in Form seiner Ableitung.

Man kann eine solche Gleichung auf verschiedene Arten lösen. Wir wollen hier zwei Verfahren ansprechen:

1. Numerisches Lösen

Es gibt Computerprogramme, die die Aufgabe erledigen. Sie berechnen die Funktion $U(t)$ Punkt für Punkt auf der Zeitachse. Als Ergebnis bekommt man nicht einen Funktionsausdruck, sondern eine Wertetabelle oder ein Diagramm.

2. Erraten eines Lösungsansatzes und Einsetzen

In vielen Fällen hat man schon eine grobe Vorstellung davon, wie die Lösungsfunktion aussehen könnte. Das trifft auch in unserem Fall zu. Wir wissen: Die Ladung nimmt um so langsamer ab, je kleiner sie ist. Ein solches Verhalten zeigt gerade die Exponentialfunktion

$$y(x) = e^{-x}.$$

Je größer x ist, desto kleiner ist die Änderung dy/dx. Wir machen daher den *Lösungsansatz*:

$$U(t) = U_0 \cdot e^{-t/\tau}. \tag{1.5}$$

Der Faktor U_0 wird gebraucht, damit rechts und links die Maßeinheiten übereinstimmen. Das Entsprechende gilt für den Exponenten: Er muss „dimensionslos", d.h. ohne Maßeinheit sein. Wir dividieren daher die Zeit t durch die Größe τ, die auch in Sekunden gemessen wird.

Um prüfen zu können, ob der Ansatz die Differenzialgleichung löst, brauchen wir außer $U(t)$ noch die Ableitung:

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{1}{\tau} \cdot U_0 \cdot e^{-t/\tau}. \tag{1.6}$$

Wir setzen (1.5) und (1.6) in die Differenzialgleichung ein:

$$U_0 \cdot e^{-t/\tau} - \frac{RC}{\tau} \cdot U_0 \cdot e^{-t/\tau} = 0.$$

Wir dividieren durch

$$U_0 \cdot e^{-t/\tau},$$

formen um und erhalten:

$$\tau = R \cdot C.$$

Und nun? War unser geratener Lösungsansatz kor-

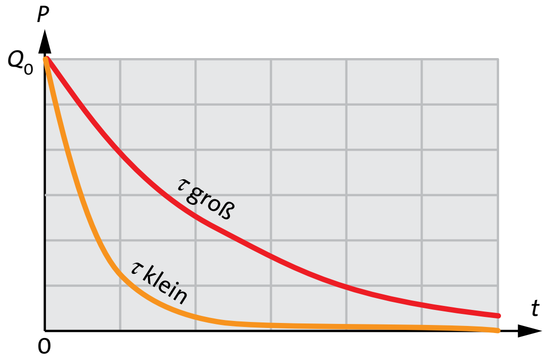


Abb. 1.90 Große Abklingzeit τ bedeutet: Die Ladung auf den Platten des Kondensators nimmt langsam ab.

rekt? Er war es. Man erkennt es daran, dass die Zeitabhängigkeit herausgefallen ist.

Die Differenzialgleichung wird durch den Lösungsansatz

$$U(t) = U_0 \cdot e^{-t/\tau}.$$

erfüllt. Außerdem hat die Rechnung gezeigt, dass U_0 jeden beliebigen Wert haben kann, und dass das τ im Exponenten gleich $R \cdot C$ sein muss. Die Bedeutung von τ sieht man in Abbildung 1.90: Je größer τ ist, desto langsamer klingt die Funktion ab, desto langsamer entlädt sich der Kondensator.

Auch das entspricht unserer Erwartung: Der Kondensator entlädt sich langsam, wenn seine Kapazität groß ist und wenn der Widerstand groß ist. Man nennt τ die Abklingzeit.

> *Entladung eines Kondensators über einen Widerstand*
> Die Spannung nimmt exponentiell ab:
>
> $$U(t) = U_0 \cdot e^{-t/\tau}.$$
>
> $$\tau = R \cdot C = \text{Abklingzeit}$$

Aufgaben

1. Nimm als Lösungsansatz für die Differenzialgleichung eine quadratische Funktion. Wird die Differenzialgleichung erfüllt? Kommentiere.
2. Für elektrostatische Experimente benutzt man gern so genannte Konduktorkugeln. Eine Konduktorkugel besteht auseinem metallischen Leiter und steht auf einem Plexiglasstiel – du wirst dich erinnern. Wenn die Kugel elektrisch geladen wird, bleibt die Ladung eine Weile auf ihr sitzen. Schätze ab, wie schnell sie abfließt, d.h. wie die Abklingzeit ist. (Hilfe: Schätze mithilfe der entsprechenden Formeln die Kapazität der Kugel gegen die Erde, sowie den Widerstand des Plexiglasstiels ab.) Das Ergebnis braucht nur bis auf einen Faktor 1000 genau zu sein; in anderen Worten: Beträgt die Abklingzeit etwa: 10^{-9} s, 10^{-6} s, 10^{-3} s, 1 s, 10^{3} s, 10^{6} s or 10^{9} s?

1.25 Felder und elektrische Leiter

Ein längerer Draht ist an eine Spannungsquelle angeschlossen, sodass ein elektrischer Strom durch ihn hindurchfließt. Wandert man, ausgehend vom einen Anschluss des Netzgeräts, den Draht entlang zurück zum anderen Anschluss, und zwar vom hohen zum niedrigen Potenzial, so nimmt das Potenzial gleichmäßig mit dem zurückgelegten Weg ab, Abb. 1.91. Das Potenzial ändert sich also linear mit dem Ort in der Längsrichtung des Drahtes.

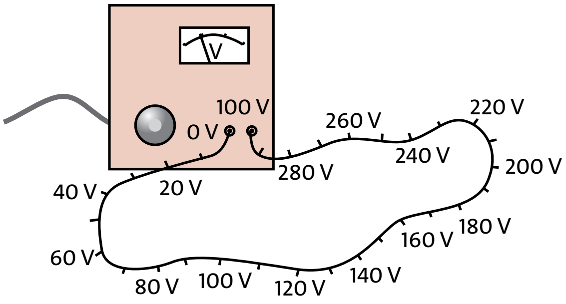


Abb. 1.91 Auf dem Weg vom einen zum anderes Anschluss des Netzgeräts nimmt das Potenzial im Draht gleichmäßig ab.

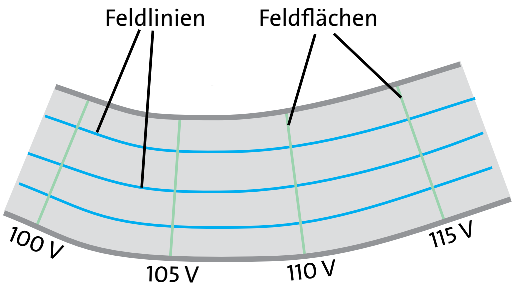


Abb. 1.92 Die Feldflächen liegen senkrecht zur Drahtrichtung, die Feldlinien folgen dem Draht.

Abb. 1.92 zeigt einen stark vergrößerten Ausschnitt aus dem Draht. Die Feldflächen müssen den Draht senkrecht zur Längsrichtung schneiden. Daraus folgt, dass die Feldlinien im Innern des Drahtes parallel zur Drahtrichtung verlaufen. Dort, wo der Draht gerade ist, ist das Feld exakt homogen. Wo der Draht gekrümmt ist, folgen die Feldlinien der Krümmung.

Die elektrische Ladung, die durch den Draht fließt, läuft also auf ihrem Weg gleichmäßig dem Potenzialgefälle nach, immer in Richtung der Feldlinien.

Wir können den Schluss auch umkehren: Immer wenn in einem Leiter ein elektrischer Strom fließt, befindet sich in dem Leiter ein Potenzialgefälle, und damit ein elektrisches Feld. Und falls in einem Leiter kein elektrischer Strom fließt, so ist die Feldstärke im Leiter null, und es gibt kein Potenzialgefälle – das Potenzial ist überall gleich.

> In einem Leiter, in dem kein elektrischer Strom fließt, ist das Potenzial überall gleich.

Wir bringen nun einen Leiter, zum Beispiel eine Metallkugel, an eine Stelle, an der sich vorher ein elektri-

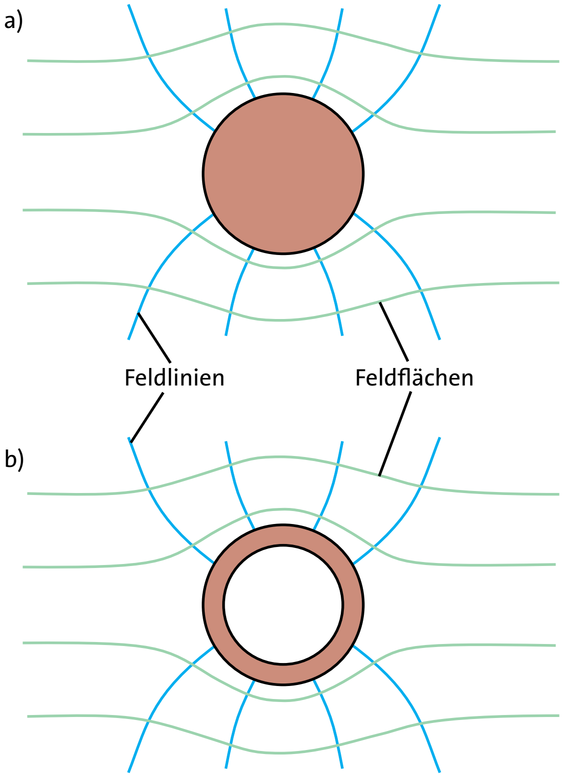


Abb. 1.93 (a) The electric potential is the same at all points inside the metal sphere. (b) Also a hollow sphere is field-free inside.

sches Feld befand, Abb. 1.93a. Beim Hinbringen an diese Stelle wird sich in der Kugel Ladung verschieben. Wir hatten diesen Vorgang Influenz genannt. Diese Bewegung der Ladung kommt aber nach sehr kurzer Zeit zu einem Ende, es fließt kein elektrischer Strom mehr. Das bedeutet, dass das Innere der Kugel jetzt feldfrei ist. Die ganze Kugel befindet sich auf ein und demselben Potenzial.

Insbesondere ist auch die Oberfläche der Kugel eine Fläche konstanten Potenzials, d.h. eine Feldfläche. Daraus wiederum folgt, dass die Feldlinien außerhalb der Kugel senkrecht in die Kugeloberfläche einmünden.

An diesen Aussagen ändert sich auch nichts, wenn der elektrische Leiter hohl ist, Abb. 1.93b. Das hat eine interessante Konsequenz: Man kann mithilfe von Metallwänden elektrische Felder abschirmen. Die Wände brauchen dazu gar nicht sehr dicht zu sein. Ein Drahtnetz ist oft schon ausreichend.

Abb. 1.94 zeigt einen Zylinder aus Drahtgeflecht, der mit einem Bandgenerator verbunden ist. Sein Potenzial liegt damit um einige 10 000 V über dem Erdpotenzial, und zwischen Drahtnetz und Erde befindet sich ein starkes elektrisches Feld. Man erkennt es an dem Papierbüschel, dessen Enden vom Feld nach außen gezogen werden. Ein Papierbüschel im Innern des Drahtnetzes dagegen rührt sich nicht. Obwohl sich dieser Raum auf sehr hohem Potenzial befindet, ist er feldfrei. Das Potenzial ist dort an allen Stellen gleich.

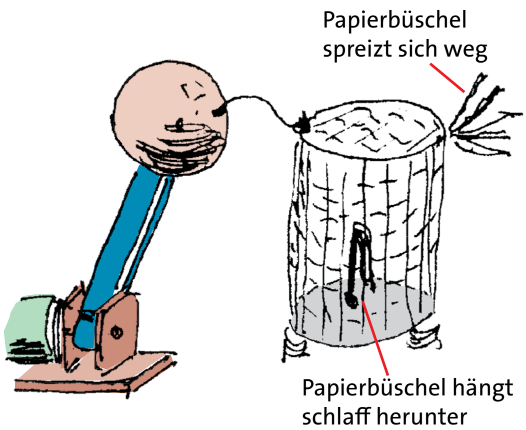


Abb. 1.94 Das Innere des Drahtkäfigs ist feldfrei.

Aufgaben

1. Ein Leiter, durch den ein elektrischer Strom fließt, wird an einer Stelle dicker, Abb. 1.95. Skizziere Feldflächen und Feldlinien im Innern des Leiters. Achte auf die Abstände zwischen den Feldflächen.
2. Zwischen die Platten eines geladenen Kondensators wird, parallel zu den Kondensatorplatten, eine Metallplatte gebracht, Abb. 1.96. Zeichne Feldflächen und Feldlinien ein. Was für mechanische Spannungen herrschen in der Metallplatte: Druck oder Zug? Welche Richtung haben sie?
3. An die Stelle P des Feldes von Abb. 1.97 wird eine etwa 1 cm große Metallkugel gebracht. Wie verändern sich Feldflächen und Feldlinien?
4. Zwischen die beiden Ladungen in Abb. 1.98 wird an die gestrichelt markierte Stelle eine dünne Metallplatte gebracht. Skizziere Feldflächen und Feldlinien vorher und nachher.

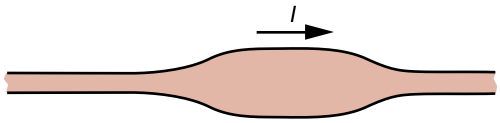


Abb. 1.95 Zu Aufgabe 1

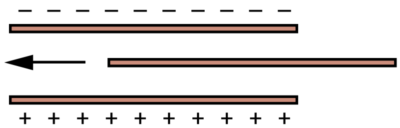


Abb. 1.96 Zu Aufgabe 2

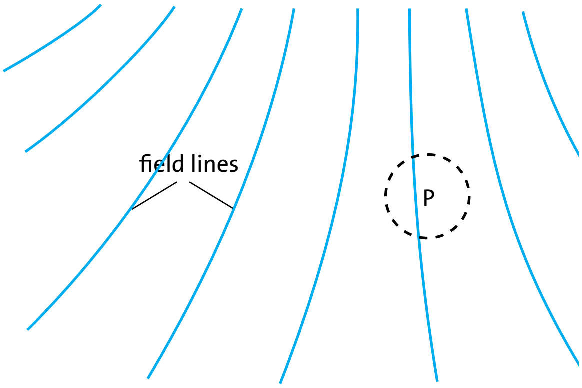


Abb. 1.97 Zu Aufgabe 3

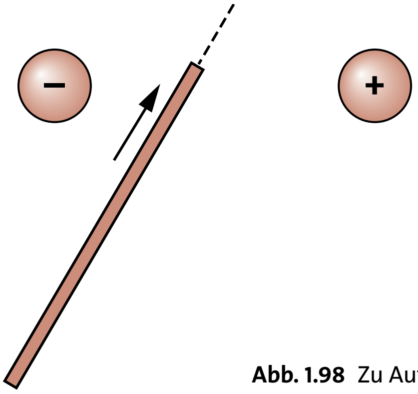


Abb. 1.98 Zu Aufgabe 4

1.26 Die elektrische Stromdichte – das lokale Ohmsche Gesetz

Abb. 1.99 zeigt, stark vergrößert, einen Draht, durch den ein elektrischer Strom fließt. Wir nehmen an, die Stromstärke beträgt 6 A. An der Stelle P erweitert sich die Querschnittsfläche des Drahtes von 2 mm² auf 8 mm². Wir betrachten eine kleine Fläche im Draht, quer zur Drahtrichtung, und zwar sowohl dort, wo der Draht noch dünn ist, an der Stelle A, als auch dort wo er dick ist, an der Stelle B. Worin unterscheidet sich der elektrische Strom durch die beiden Flächen? Durch die Fläche bei A fließt ein Strom der vierfachen Stromstärke. Nur so ist es möglich, dass durch den gesamten Drahtquerschnitt bei A und bei B derselbe Strom fließen kann.

Was wir gerade verglichen haben ist die elektrische *Stromdichte j*. Unter der elektrischen Stromdichte versteht man die elektrische Stromstärke in einem Leiter dividiert durch die Querschnittsfläche:

$$j = \frac{I}{A}$$

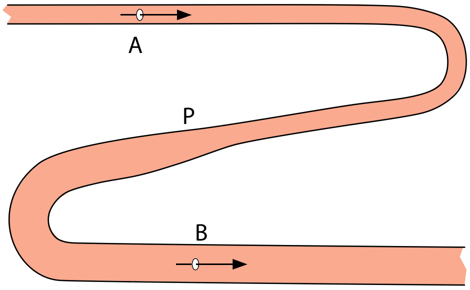


Abb. 1.99 Draht, in dem ein elektrischer Strom fließt. Die Querschnittsfläche nimmt bei P auf das Vierfache zu. Die elektrische Stromdichte ist bei A viermal so groß wie bei B.

(Die Impulsstromdichte war auf analoge Art definiert: Impulsstromstärke dividiert durch die Fläche, durch die der Impulsstrom fließt; siehe Abschnitt 1.19.)

Die elektrische Stromdichte im dünnen Bereich unseres Drahtes beträgt also

$$j_{\text{thin}} = \frac{6\ \text{A}}{2\ \text{mm}^2} = 3\ \text{A/mm}^2$$

und im dicken Teil

$$j_{\text{thick}} = \frac{6\ \text{A}}{8\ \text{mm}^2} = 0{,}75\ \text{A/mm}^2.$$

Während uns die Stromstärke sagt, wie viel elektrische Ladung pro Zeit insgesamt durch einen Drahtquerschnitt fließt, sagt uns die Stromdichte, wie viel „an einer Stelle" fließt.

Wir wollen nun das Ohmsche Gesetz

$$R = \frac{U}{I}.$$

in eine andere Form bringen. Zunächst bringen wir die Stromstärke auf die linke Seite der Gleichung:

$$I = \frac{U}{R}$$

Dann setzen wir den Ausdruck für den Widerstand

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{d}{A}$$

ein und erhalten:

$$I = \frac{\sigma A}{d} \cdot U .$$

Eine einfache Umstellung führt zu

$$\frac{I}{A} = \frac{\sigma}{d} \cdot U.$$

Diese Gleichung lässt sich aber vereinfachen: Auf der linken Seite steht ja die elektrische Stromdichte I/A, und rechts steht neben der Leitfähigkeit σ die elektrische Feldstärke U/d. Wir können also schreiben:

$$\vec{j} = \sigma \cdot |\vec{E}|.$$

Nun ist nicht nur die elektrische Feldstärke, sondern auch die Stromdichte ein Vektor. Seine Richtung ist gleich der Richtung des elektrischen Stroms. Die endgültige Gleichung lautet daher:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \qquad \text{lokales Ohmsches Gesetz}$$

Was wir hier mühsam hergeleitet haben, ist im Grunde nichts neues. Man kann sagen, es ist die „lokale" Form des Ohmschen Gesetzes. Das Ohmsche Gesetz in seiner üblichen Form sagt uns: Die elektrische Stromstärke ist proportional zur elektrischen Spannung, oder etwas knapper ausgedrückt: Die Stromstärke ist proportional zum Antrieb. Genau das sagt uns aber auch unsere neue Gleichung. Nur nehmen wir hier als Maß für den Antrieb die Spannung pro Länge, d.h. die elektrische Feldstärke, und als Maß für den Strom die Stromstärke pro Fläche, d.h. die Stromdichte. Während das Ohmsche Gesetz in seiner alten Form eine Aussage über einen ganzen Draht macht, so sagt unser neues, lokales Ohmsches Gesetz etwas über eine bestimmte Stelle innerhalb des Drahtes.

Aufgaben

1. Ein Kupferdraht der Länge 100 m und der Querschnittsfläche 1 mm^2 wird mit seinen beiden Enden an eine 1,5 V-Batterie angeschlossen. Wie groß ist die Feldstärke im Draht? Wie groß ist die Stromdichte? Wie groß ist die Stromstärke im Draht?
2. Durch ein 3 mm^2 dickes Kupferkabel fließt ein elektrischer Strom von 5 Ampere. Wie groß ist die Feldstärke im Kabel? Vergleiche mit der Feldstärke in einem Kondensator mit dem Plattenabstand 5 mm, der mit 1 kV aufgeladen wurde.
3. Ein 2 m langer Kupferdraht wird mit einem 1 m langen Eisendraht verbunden (Querschnitte beider Drahtstücke 1 mm^2). Durch die so entstandene 3 m lange Leitung fließt ein elektrischer Strom von 0,5 A. Wie groß ist die Feldstärke im Kupferdraht, wie groß ist sie im Eisendraht? Wie groß ist die Potenzialdifferenz zwischen den Enden des Kupferdrahtes und wie groß zwischen den Enden des Eisendrahtes?
4. Der Glühdraht einer Glühlampe ist an einer Stelle A etwas dicker, und an einer Stelle B etwas dünner als normal. Was kannst du über die Stromdichten an den Stellen A und B sagen während die Lampe leuchtet? An welcher Stelle wird der Glühfaden einmal durchbrennen?

1.27 Wie man elektrisch geladene Teilchen mit Energie lädt – Elektronenstrahlen

Wir erinnern uns an ein früheres Ergebnis: Um eine elektrische Ladungsportion ΔQ in einem Leiter von einer Stelle niedrigen Potenzials φ_1 zu einer Stelle hohen Potenzials φ_2 zu bringen, braucht man Energie. Bewegt sich die Ladungsportion vom hohen zum niedrigen Potenzial, so bekommt sie Energie. Für den Betrag dieser Energie gilt:

$$\Delta E = (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot \Delta Q$$

Die Einschränkung, dass sich die Ladung in einem elektrischen Leiter bewegen muss, können wir jetzt aber fallen lassen. Die Gleichung gilt auch, wenn sich ein geladener Körper außerhalb elektrischer Leiter bewegt. Das geladene Teilchen in Abb. 1.100 kann ein Papierschnipsel sein, der sich durch Berührung von Platte 2 aufgeladen hat.

Woher kommt die Energie, die dem Papierschnipsel auf dem Weg von Platte 2 nach Platte 1 zugeführt wird? Platte 2 hat eine Ladungsportion abgegeben, und Platte 1 hat diese Ladung bekommen. Durch die Bewegung der Ladungsportion würde der Kondensator etwas von seiner Ladung verlieren. Die fehlende Ladung wird aber von der Batterie nachgeliefert. Die Energie, die die Ladungsportion bekommt, stammt also von der Batterie.

> Um einen positiv geladenen Körper vom niedrigen zum hohen Potenzial zu bringen, muss man ihm Energie zuführen. Wenn er sich vom hohen zum niedrigen Potenzial bewegt, bekommt er die Energie wieder zurück.

(Bei negativer Ladung kehrt sich die Aussage des Satzes um: Um einen negativ geladenen Körper vom hohen zum niedrigen Potenzial zu bringen, muss man ihm Energie zuführen. Wenn er sich vom niedrigen zum hohen Potenzial bewegt, bekommt er die Energie wieder zurück.)

Abb. 1.101 zeigt fast dasselbe Experiment wie Abb. 1.100. Der einzige Unterschied: Die geladenen Platten sind nicht mit einer Batterie verbunden. Das Experiment funktioniert aber noch genauso. Das geladene Papierschnipsel bewegt sich von der Platte mit dem hohen Potenzial zu der mit dem niedrigen. Woher kommt jetzt die Energie? Das bewegte Teilchen trans-

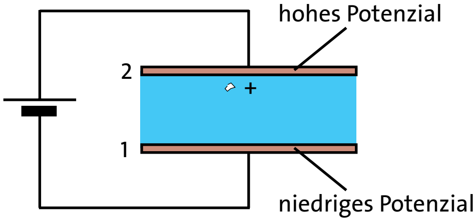


Abb. 1.100 Das geladene Körperchen nimmt auf seinem Weg vom hohen zum niedrigen Potenzial Energie auf. Diese Energie wird von der Batterie geliefert.

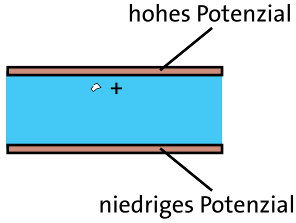


Abb. 1.101 Das geladene Körperchen nimmt auf seinem Weg vom hohen zum niedrigen Potenzial Energie auf. Diese Energie wird dem elektrischen Feld zwischen den Platten entnommen.

portiert elektrische Ladung von der einen Platte zur anderen. Der Kondensator wird dadurch etwas entladen. Das heißt aber, das Feld zwischen den Platten wird etwas schwächer. Die Energie stammt also aus dem elektrischen Feld.

Wenn sich ein geladener Körper vom hohen zum niedrigen Potenzial bewegt, und wenn er die Energie, die er dabei bekommt, nicht irgendwohin weitergeben kann, so muss er sie behalten. Er wird schneller, seine *kinetische Energie* nimmt zu.

Wir haben damit eine Möglichkeit gefunden, einen Körper mit kinetischer Energie zu laden. Diese Methode ist zwar für makroskopische, d.h. große Körper sehr ungeeignet, für mikroskopische Körper, sogenannte Teilchen, dagegen außerordentlich wirksam. Das zeigt das folgende Beispiel: Wie viel Energie gewinnt ein Elektron, das von einer „Elektrode" auf Erdpotenzial (0 Volt) zu einer Elektrode auf +20 000 Volt läuft? (Da das Elektron negativ geladen ist, gewinnt es Energie, wenn es vom niedrigen zum hohen Potenzial läuft.)

Mit $Q = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C wird

$$E = (0\ \text{V} - 20\,000\ \text{V}) \cdot (-1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C}) = 3{,}2 \cdot 10^{-15}\ \text{J}$$

Dieser Wert scheint zunächst nicht gerade groß zu sein. Dass er für das kleine Elektron doch sehr groß ist, erkennt man, wenn man die zugehörige Geschwindigkeit berechnet. Aus

$$E = \frac{m}{2} v^2$$

folgt

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3{,}2 \cdot 10^{-15}\ \text{J}}{0{,}91 \cdot 10^{-30}\ \text{kg}}} \approx 8{,}4 \cdot 10^{7}\ \text{m/s}.$$

Das ist etwa ein Viertel der Lichtgeschwindigkeit, d.h. der höchsten Transportgeschwindigkeit, die es überhaupt gibt.

Wenn man Teilchen auf diese Art mit Energie lädt, gibt man ihre Energie gewöhnlich nicht in der Maßeinheit Joule an, sondern in *Elektronenvolt*, abgekürzt eV.

Das „e" ist hier einfach die Elementarladung, d.h.

$$1\ \text{eV} = -1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot \text{V} = -1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J}.$$

1 eV = Energie, die ein Teilchen der Ladung $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C beim Durchlaufen einer Potenzialdifferenz von 1 V aufnimmt.

$$1\ \text{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$

Warum diese Abweichung vom SI-System? Wenn man es mit Teilchen zu tun hat, die alle die positive oder negative Elementarladung tragen, wie Elektronen oder Protonen, oder Positronen, so ist das eV einfach bequemer. Wenn zum Beispiel Elektronen über eine Potenzialdifferenz von 8 kV beschleunigt werden, so ist ihre kinetische Energie am Ende 8 keV. Um die Energie zu bekommen, braucht man also nicht zu rechnen.

Aufgaben

1. Ein mit 50 negativen Elementarladungen geladenes Wassertröpfchen (Masse: 10 mg) durchfällt in einer 1000 Meter dicken Gewitterwolke eine Potenzialdifferenz von 20 Millionen Volt. (Das Potenzial nimmt nach unten hin ab.) Wie viel Energie nimmt es aus dem Schwerefeld auf? Wie viel Energie gibt es an das elektrische Feld ab? Seine kinetische Energie hat sich beim Fallen nicht geändert. Woran liegt das, wo ist die überschüssige Energie geblieben?
2. In einem Bandgenerator wird kontinuierlich elektrische Ladung von Erdpotenzial auf 50 000 Volt „hinaufgepumpt". Der elektrische Strom, den der Generator erzeugt, betrage 50 μA. Welcher Energieverbrauch des Bandgenerators ergibt sich daraus? (Tatsächlich braucht er sehr viel mehr. Die meiste Energie geht durch Reibung verloren.)
3. Die Elektronen in einem Elektronenmikroskop werden mit einer Spannung von 1,2 MV beschleunigt.
(a) Welche Energie haben die Elektronen?
(b) Berechne die Geschwindigkeit der Elektronen über die Formel für die kinetische Energie. Woran sieht man, dass das Ergebnis falsch sein muss? Welcher Schritt der Rechnung war falsch?

2 DAS MAGNETISCHE FELD

2.1 Magnetische Ladung und magnetisches Feld

Magneten können sich anziehen und abstoßen. Die Anziehung bzw. Abstoßung geht von der *magnetischen Ladung* Q_m aus. Die Stellen des Magneten, an denen die magnetische Ladung sitzt, nennt man die Pole des Magneten. Die Maßeinheit der magnetischen Ladung ist das Weber (Wb).

Die magnetische Ladung kann, genauso wie die elektrische, sowohl positive als auch negative Werte annehmen. Magnetisch positiv geladene Bereiche nennt man Nordpole, magnetisch negativ geladene Südpole.

Ein kleiner Magnet, wie man ihn benutzt, um etwas an einer Eisenwand anzuheften, hat an seinem positiven Pol eine Ladung von etwa 10^{-4} Wb. Hängt man einen stabförmigen Magneten, dessen Pole sich an seinen Enden befinden, waagrecht an einen dünnen Faden, so dass sich der Magnet leicht drehen kann, so orientiert er sich in Nord- Süd-Richtung. Der positive Pol weist nach Norden, der negative nach Süden.

Die gesamte magnetische Ladung eines Magneten ist immer null, d.h. die positive Ladung hat denselben Betrag wie die negative.

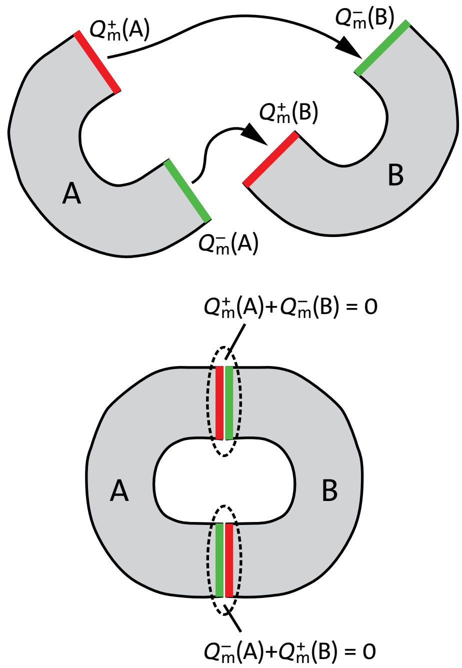
> Die gesamte magnetische Ladung eines Magneten ist null.

Das ist anders als bei der elektrischen Ladung. Man kann einem Körper eine (wenn auch nur sehr geringe) elektrische Nettoladung geben. Dieser Unterschied zwischen elektrischer und magnetischer Ladung ist sehr wichtig. Er hat zur Folge, dass es zwar elektrische Ströme (fließende elektrische Ladung) gibt, aber keine magnetischen Ströme (fließende magnetische Ladung).

An den magnetischen Ladungen hängt ein unsichtbares Gebilde, das *magnetische Feld* (genauso wie an elektrischen Ladungen das elektrische Feld hängt). Der Stoff, aus dem das magnetische Feld besteht, nennen wir *magnetischen Feldstoff*. Wenn keine Verwechslungsgefahr mit dem elektrischen Feldstoff besteht, nennen wir ihn auch kurz Feldstoff.

> Magnetische Pole sind von magnetischen Feldern umgeben. Hat die Ladung von zwei Polen dasselbe Vorzeichen, so drückt das Feld die Pole voneinander weg, hat sie verschiedene Vorzeichen, so zieht sie das Feld aufeinander zu.

Abb. 2.1 Werden die beiden gleichartigen Magneten so zusammengebracht, dass der Nordpol des einen mit dem Südpol des anderen zusammenfällt, und der Südpol des einen mit dem Nordpol des anderen, so addiert sich die magnetische Ladung an den beiden Berührungsflächen zu null.



Bei handelsüblichen Magneten sitzt die magnetische Ladung gewöhnlich an der Oberfläche. Das kann man auf die folgende Art zeigen, Abb. 2.1.

Man nimmt zwei Hufeisenmagneten A und B, die völlig gleichartig sind. Für jeden Magneten einzeln gilt, dass die Ladung Q_m^- des Südpols gleich dem Negativen der Ladung Q_m^+ des Nordpols ist:

$$Q_m^- = -Q_m^+ \tag{2.1}$$

Da beide Magneten gleich gebaut sind, ist die positive Ladung am Nordpol des einen gleich der positiven am Nordpol des anderen:

$$Q_m^+(A) = Q_m^+(B) \tag{2.2}$$

Außerdem ist

$$Q_m^-(A) = Q_m^-(B).$$

Hält man die beiden Magneten nun so zusammen, dass der Nordpol von A mit dem Südpol von B zusammenfällt und der Südpol von A mit dem Nordpol von B, so addieren sich die Ladungen an den Berührungsflächen zu null:

Die Ladung an der einen Berührungsfläche ist

$$Q_m^+(A) + Q_m^-(B)$$

Mithilfe von Gleichung (2.1) können wir $Q_m^-(B)$ durch $-Q_m^+(B)$ ersetzen:

$$Q_m^+(A) - Q_m^+(B)$$

Dieser Ausdruck ist aber nach Gleichung (2.2) gleich null. Der neue, ringförmige Magnet, den wir aus den beiden Hufeisenmagneten zusammengesetzt haben, hat also kein magnetisches Feld. Kann man den Ring dann überhaupt noch als Magneten bezeichnen? Wir werden diese Frage im nächsten Abschnitt beantworten.

2.2 Die Magnetisierung

Es gibt viele verschiedene magnetische Materialien: chemische Grundstoffe, Verbindungen, Legierungen und keramische Stoffe. Das bekannteste und häufigste Material, wenn auch nicht das beste, ist das Eisen.

Für die Tatsache, dass ein Magnet stets gleich viel positive wie negative magnetische Ladung trägt, gibt

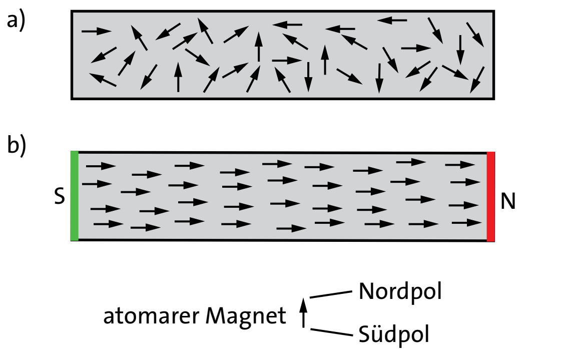


Abb. 2.2 (a) In einem unmagnetisierten Stück Eisen sind die Richtungen der atomaren Magnetchen ungeordnet. (b) In einem magnetisierten Stück Eisen sind die atomaren Magnetchen ausgerichtet. An der linken Stirnfläche des Magneten sitzt negative Ladung, an der rechten positive.

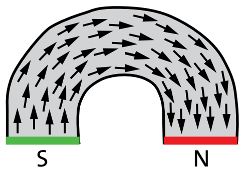


Abb. 2.3 Orientierung der atomaren Magnetchen in einem Hufeisenmagneten

es eine einfache Erklärung: manche Atome sind magnetisch, d.h. jedes Atom verhält sich wie ein winzig kleiner Dauermagnet mit zwei Polen. Wenn nun ein Körper aus solchen Atomen besteht, und wenn außerdem die atomaren Magneten nicht völlig unregelmäßig orientiert sind, Abb. 2.2a, sondern schön ausgerichtet, Abb. 2.2b, so entsteht an den beiden Enden des Magneten je ein großer Magnetpol.

Selbstverständlich brauchen die atomaren Magnetchen nicht alle parallel zueinander liegen. Sie können zum Beispiel auch so liegen wie in Abb. 2.3.

Wenn die atomaren Magneten ausgerichtet sind, sagt man, das Material sei *magnetisiert*.

Wir haben in den Abbildungen 2.2 und 2.3 den Zustand der Magnetisierung durch viele kleine Pfeile dargestellt. Eine etwas einfachere Methode der grafischen Darstellung zeigt Abb. 2.4a. Statt der Pfeile wurden hier durchgehende Linien gezeichnet, die *Magnetisierungslinien*.

Man erkennt hier den Zusammenhang zwischen Magnetisierung und magnetischer Ladung: Dort wo die Magnetisierungslinien an der Oberfläche enden, sitzt die magnetische Ladung.

Die Magnetisierungslinien können aber auch im Innern des Magneten ohne Anfang und Ende verlau-

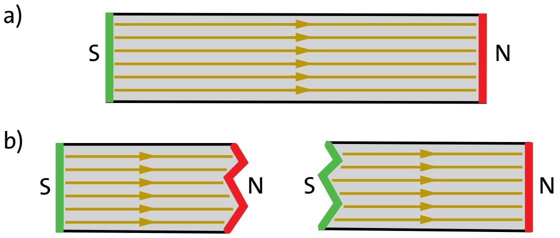


Abb. 2.4 (a) Grafische Darstellung des Magnetisierungszustandes mithilfe von Magnetisierungslinien. (b) Beim Durchbrechen des Magneten entstehen neue Pole.

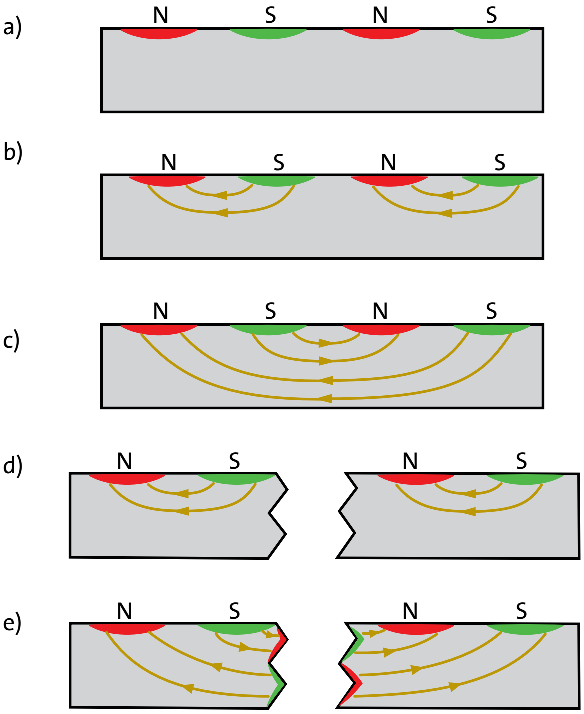


Abb. 2.5 (a) Ein Magnet mit 4 Polen an einer Seite. (b) und (c) Es gibt mehrere Magnetisierungsmöglichkeiten. (d) und (e) Den Unterschied zwischen b und c bemerkt man, wenn man die Magneten in der Mitte durchbricht.

fen. Der entsprechende Magnet hat dann keine Pole. Der Ring, den wir aus zwei Hufeisenmagneten zusammengesetzt hatten, Abb. 2.1, ist hierfür ein Beispiel.

Man versieht die Magnetisierungslinien gewöhnlich mit einem Richtungspfeil. Nach Vereinbarung orientiert man sie so, dass sie von der negativen zur positiven Ladung laufen.

> Magnetisierungslinien beginnen auf negativer und enden auf positiver magnetischer Ladung, oder sie verlaufen innerhalb eines Magneten ohne Anfang und Ende.

Wir können jetzt auch eine weitere interessante Erscheinung verstehen. Wenn man einen Stabmagneten durchbricht, entstehen an den Bruchflächen zwei neue Pole, Abb. 2.4. Nur so ist gewährleistet, dass die gesamte magnetische Ladung jedes der Bruchstücke wieder gleich null ist.

Kennt man die Magnetisierung, so kann man eindeutig sagen, wo die magnetische Ladung sitzt: dort wo die Magnetisierungslinien beginnen und enden.

Wenn man dagegen nur die Pole eines Magneten kennt, d.h. die Verteilung der magnetischen Ladung an seiner Oberfläche, so kann man noch nicht eindeutig auf die Magnetisierung schließen. Die Ladungsverteilung von Abb. 2.5a ist sowohl mit der Magnetisierungsverteilung von Abb. 2.5b als auch mit der von Abb. 2.5c verträglich. Wie die Magnetisierung tatsächlich ist, sieht man dem Magneten von außen nicht an. Eine Methode, zwischen den beiden Möglichkeiten zu unterscheiden, wäre es, den Magneten in der Mitte durchzubrechen. Beim Durchbrechen des Magneten von Abb. 2.5b entstehen keine neuen Pole, Abb. 2.5d. Wenn man dagegen den Magneten von Abb. 2.5c durchbricht, entsteht an jeder Bruchstelle ein Nord- und ein Südpol, Abb. 2.5e.

Aufgaben

1. Wie könnten die Magnetisierungslinien in dem Magneten der Abb. 2.6a verlaufen?
2. Wie könnten die Magnetisierungslinien in dem Magneten der Abb. 2.6b verlaufen? Gib zwei Lösungen an.
3. Ein Magnet habe die Form eines zylindrischen Scheibchens. Der Magnet hat auf seiner Zylindermantelfläche 3 Nord- und 3 Südpole. Nord- und Südpole wechseln sich ab und sind gleichmäßig über den Zylinderumfang verteilt. Wie könnte die Magnetisierung des Zylinders sein? Gib zwei Lösungen an.
4. Jemand gibt dir einen Stahlring und behauptet, der Ring sei magnetisiert, und zwar so, dass die Magnetisierungslinien der Ringform folgen. Der Magnet hat also keine Pole. Wie kannst du feststellen, ob die Behauptung zutrifft?

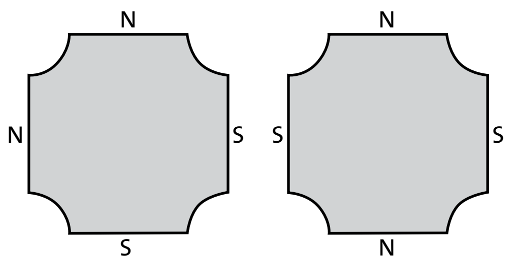


Abb. 2.6 Zu den Aufgaben 1 und 2. Wie verlaufen die Magnetisierungslinien?

2.3 Die magnetische Feldstärke

Wir wollen nun auch für den magnetischen Feldstoff ein Maß einführen: die *magnetische Feldstärke*. Wir gehen dabei analog zur Einführung der elektrischen Feldstärke vor. Auch in einem magnetischen Feld herrscht in jedem Punkt in einer bestimmten Richtung eine Zugspannung, und in allen Richtungen quer dazu Druckspannung. Auch die magnetische Feldstärke ist also ein Vektor, der in Richtung der Zugspannung des Feldes liegt. Sein Betrag sagt uns, wie dicht das Feld an der betreffenden Stelle ist.

> Die magnetische Feldstärke ist ein Vektor.
> *Betrag des Vektors:* Maß für die Dichte des Feldstoffs.
> *Richtung des Vektors:* Zugrichtung des Feldstoffs.

Auch das Messverfahren ist dem für die elektrische Feldstärke analog. Man bringt an die Stelle P, an der die Feldstärke gemessen werden soll, eine magnetische „Probeladung“: den einen Pol eines sehr dünnen und langen Stabmagneten. (Der andere Pol des Magneten ist dann so weit entfernt, dass er von dem Feld nichts mehr spürt.) In diesen Magnetpol fließt nun ein Impulsstrom hinein. Mithilfe eines Impulsstrommessers bestimmt man Betrag und Richtung des Impulsstromvektors. Man dividiert durch die magnetische Ladung des Pols und erhält die magnetische Feldstärke:

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{Q_m}.$$

Wir formen noch um:

> $\vec{F} = Q_m \cdot \vec{H}$
> $\vec{F}$ = Stärke des Impulsstroms in den Pol
> Q_m = magnetische Ladung des Körpers
> $\vec{H}$ = magnetische Feldstärke

Die Gleichung hat dieselbe Gestalt wie die altbekannten Gleichungen

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} \text{ and } \vec{F} = m \cdot \vec{g}.$$

Wenn man die magnetische Ladung des Pols verdoppelt, so verdoppelt sich auch die Impulsstromstärke. Der Quotient aus Impulsstromstärke und Ladung ist unabhängig von der Ladung des Pols. Und so soll es ja auch sein. Obwohl der Pol das ursprünglich vorhandene Feld erheblich verändert, so liefert uns die Gleichung doch die Feldstärke des Feldes ohne ihn.

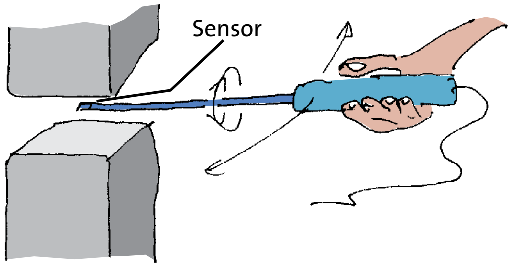


Abb. 2.7 Man dreht den Sensor so lange, bis der Wert, den das Messgerät anzeigt, am größten ist. Man stellt so außer dem Betrag auch die Richtung der magnetischen Feldstärke fest.

Als Maßeinheit der magnetischen Feldstärke ergibt sich Newton/ Weber. Diese Einheit lässt sich umrechnen in die gebräuchlichere Einheit Ampere/Meter.

Das Messverfahren für die magnetische Feldstärke, das wir gerade beschrieben haben, wird praktisch genauso wenig benutzt wie das entsprechende Verfahren für die Messung der elektrischen Feldstärke.

Magnetische Feldstärken lassen sich besonders bequem messen mit einem Gerät, dessen Funktionsweise wir im Augenblick noch nicht verstehen können, dessen Handhabung aber leicht zu beschreiben ist. Der mit einem Griff versehene flache Sensor ist über ein Kabel mit dem Anzeigegerät verbunden. Um die magnetische Feldstärke an einer bestimmten Stelle eines Feldes zu messen, hält man den Sensor an diese Stelle. Das Instrument zeigt einen bestimmten Wert an. Dieser Wert hängt aber noch von der Orientierung der Sensorfläche ab. Man dreht daher den Sensor so lange in die verschiedensten Richtungen, bis die Anzeige ihren größten Wert erreicht hat, Abb. 2.7. Man kennt jetzt nicht nur den Betrag der Feldstärke, sondern auch die Richtung: Der Feldstärkevektor steht senkrecht zur Sensorfläche.

Für die graphische Darstellung eines magnetischen Feldes kann man dieselben Methoden verwenden wie für die Darstellung elektrischen Felder: mit unterschiedlicher Grautönung, mit Vektorpfeilen oder mit Feldlinien und Feldflächen. Für das Zeichnen von Feldlinien und Feldflächen magnetischer Felder gelten sinngemäß dieselben Regeln wie für das Zeichnen von Feldlinien und -flächen elektrischer Felder:

> Die Feldlinien stehen in jedem Punkt senkrecht auf den Feldflächen.
> Die Feldlinien beginnen auf positiven und enden auf negativen Polen.
> Je größer die magnetische Ladung, desto mehr Feldlinien beginnen oder enden auf dem Pol.

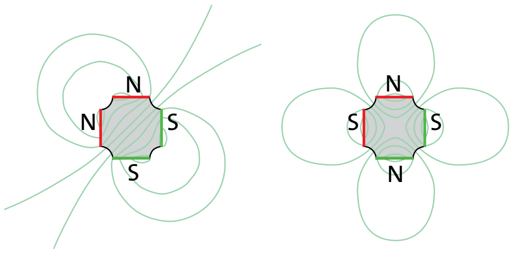


Abb. 2.8 Zu Aufgabe 2

> Feldlinien durchkreuzen sich nicht gegenseitig.
> Feldflächen durchkreuzen sich nicht gegenseitig.
> Feldlinien und Feldflächen machen keine Knicke.
> Ein Feldbild hat dieselbe Symmetrie wie die magnetischen Ladungen.

Auch die Vektoraddition von magnetischen Feldstärken hat dieselbe Bedeutung wie die von elektrischen Feldstärken. Wir betrachten einen Magneten A und einen Magneten B. Die Feldstärke des Feldes von A allein sei für jeden Punkt bekannt; ebenso die des Feldes von B allein. Wenn man nun beide Magneten nebeneinander legt, so entsteht ein Feld, das verschieden ist von dem Feld von A allein und verschieden von dem Feld von B allein. Die Feldstärke dieses „Gesamtfeldes" erhält man, indem man die Feldstärken der Einzelmagneten vektoriell addiert.

Aufgaben

1. Eine 5 cm lange Kompassnadel steht quer zum magnetischen Feld der Erde. Der positive Pol der Nadel trägt eine magnetische Ladung von 10^{-5} Wb, der negative trägt -10^{-5} Wb.
   (a) Welcher Impulsstrom fließt über das magnetische Feld zum positiven Pol, welcher Impulsstrom fließt zum negativen Pol? (Die magnetische Feldstärke des Erdfeldes beträgt 6,4 A/m.)
   (b) Wie reagiert die Kompassnadel?
2. Zeichne in die Abbildungen 2.8a und 2.8b die Feldlinien ein. (Die Abbildungen zeigen die Feldflächen.)

2.4 Magnetisierungslinien und Feldlinien

Wir haben gesehen, dass man sowohl den Magnetisierungszustand von Materie, als auch das magnetische Feld durch Linien graphisch darstellen kann: die Materie durch Magnetisierungslinien, das Feld durch Feldlinien. Wir wollen nun beide Verfahren in einer einzigen Abbildung verwenden. Wir erinnern uns

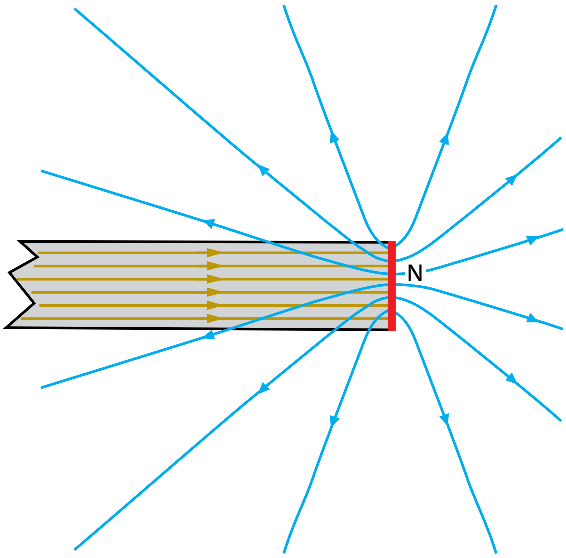


Abb. 2.9 Das positive Ende eines langen Stabmagneten mit Magnetisierungslinien und Feldlinien

dazu an die Regeln: Magnetisierungslinien beginnen am negativen Pol und enden am positiven, magnetische Feldlinien beginnen am positiven Pol und enden am negativen. Wir können diese Regeln zusammenfassen:

> Wo Magnetisierungslinien enden, beginnen magnetische Feldlinien, und umgekehrt.

Als Beispiel betrachten wir einen einzelnen positiven Magnetpol, Abb. 2.9. Es kann sich dabei um das Ende

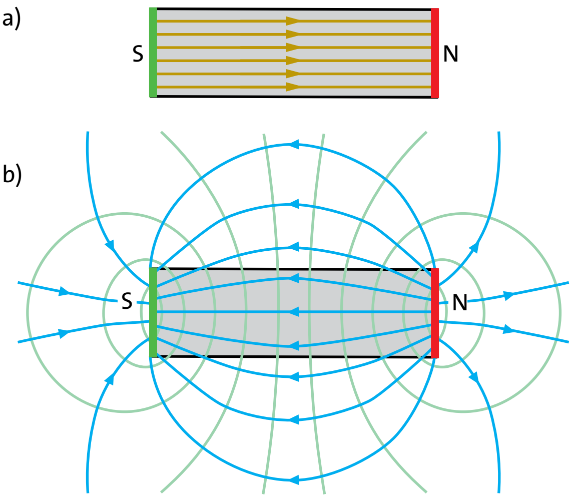


Abb. 2.10 Stabmagnet. Die magnetische Ladung sitzt an den Stirnflächen. (a) Magnetisierungslinien; (b) Feldlinien und Feldflächen

a)
b)

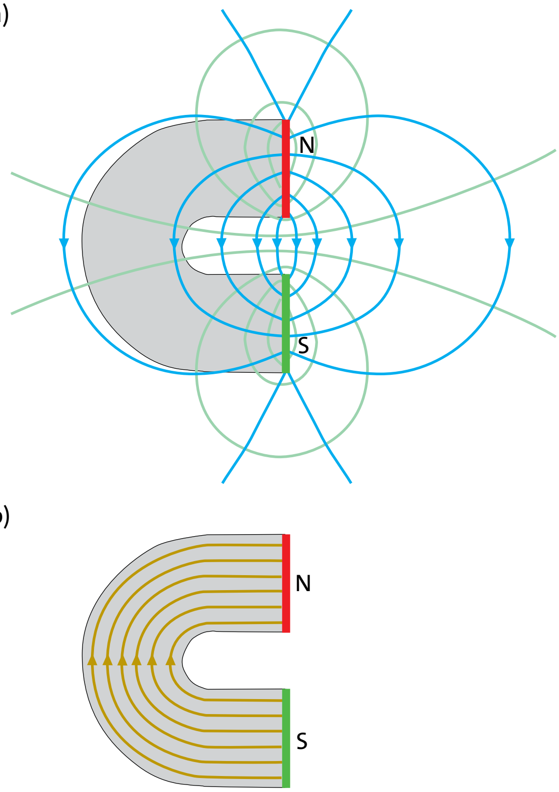


Abb. 2.11 Hufeisenmagnet. Die magnetische Ladung sitzt an den Stirnflächen. (a) Magnetisierungslinien; (b) Feldlinien und Feldflächen

eines langen Stabmagneten handeln. Der negative Pol des Magneten befinde sich in so großer Entfernung, dass man von seinem Feld am Ort des positiven Pols nichts mehr merkt.

Beachte, dass die Feldlinien durch das hartmagnetische Material hindurchlaufen wie durch den freien Raum.

2.5 Vier wichtige magnetische Felder

Die Abbildungen bestehen aus zwei Teilbildern. Das erste zeigt (außer dem Magneten) die Magnetisierungslinien, das zweite Feldlinien und Feldflächen. Es wäre schöner, Magnetisierungslinien, Feldlinien und Feldflächen in einem einzigen Bild darzustellen. Da aber im Innern von magnetisierten Körpern im Allgemeinen an ein und derselben Stelle sowohl Magnetisierungslinien als auch Feldlinien und -flächen verlaufen, wäre eine solche Darstellung etwas unübersichtlich.

a)
b)

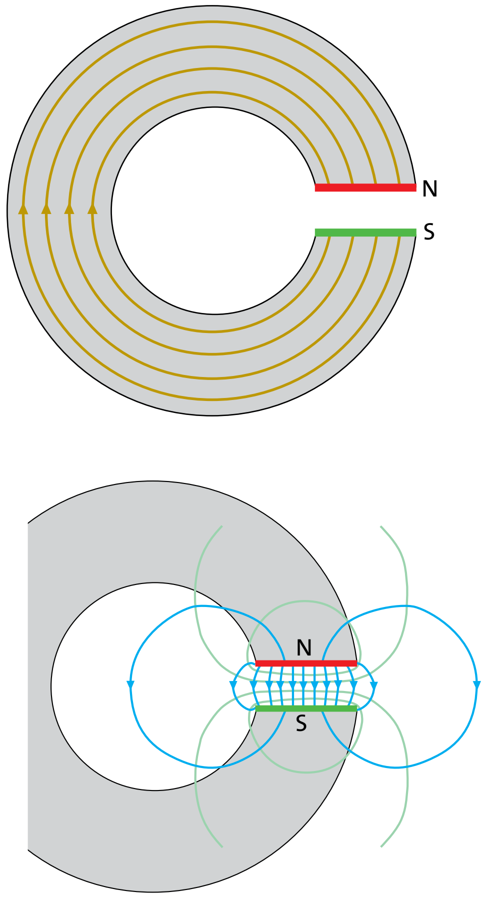


Abb. 2.12 Ringmagnet. (a) Magnetisierungslinien; (b) Feldlinien und Feldflächen

1. Stabmagnet

Die magnetische Ladung sitzt an den Endflächen. Die Magnetisierung, Abb. 2.10a, ist homogen; das Feld, Abb. 2.10b, aber nicht. Einen Stabmagneten bezeichnet man auch als magnetischen Dipol.

2. Der Hufeisenmagnet

Die Magnetisierungslinien folgen der Form des Magneten; die magnetische Ladung sitzt wieder an den Endflächen, Abb. 2.11.

3. Magnetischer Ring mit Spalt

Die magnetische Ladung sitzt an den ebenen Oberflächen beiderseits des Spaltes, Abb. 2.12a. In Abb. 2.12b ist der Bereich des Spaltes mit Feldlinien und -flächen vergrößert dargestellt. Das Feld ist im Wesentlichen auf den Spaltbereich beschränkt, und es ist fast homogen. Feldlinien und Feldflächen dieses magnetischen Feldes haben dieselbe Gestalt wie die Feldlinien und -flächen des elektrischen Feldes eines Kondensators.

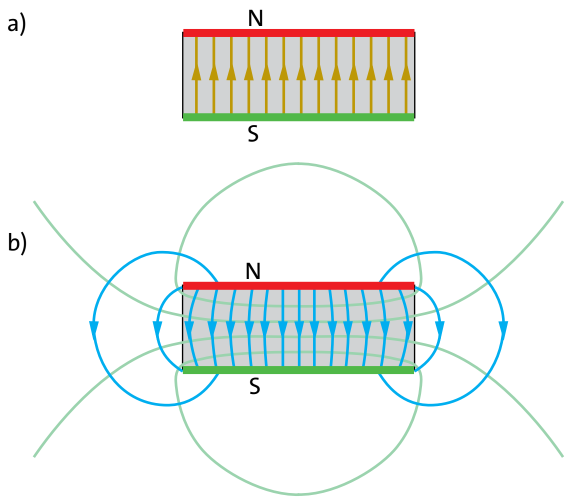


Abb. 2.13 Scheibenförmiger Magnet. Die magnetische Ladung sitzt an Ober- und Unterseite der Scheibe. (a) Magnetisierungslinien; (b) Feldlinien und Feldflächen

4. Scheibenförmiger Magnet

Er hat gerade die Form, die das fehlende Ringstück des Ringmagneten von Abb. 2.12 hat, Abb. 2.13. Die magnetische Ladung sitzt an Ober- und Unterseite der Scheibe. Die Ladungsverteilung ist daher dieselbe wie die des Ringmagneten mit Spalt. Daraus folgt, dass auch die Felder der beiden Magneten gleich aussehen.

Aufgaben

1. Abb. 2.14a zeigt die Enden von zwei Stabmagneten. Die beiden anderen Enden befinden sich außerhalb der Zeichnung in großer Entfernung. (a) Skizziere (mit verschiedenen Farben) Magnetisierungslinien, Feldlinien und Feldflächen. (b) Wie sieht man es dem Feldbild an, dass sich die beiden Magneten anziehen?
2. Abb. 2.14b zeigt die Enden von zwei Stabmagneten. Die beiden anderen Enden befinden sich außerhalb der Zeichnung in großer Entfernung. (a) Skizziere (mit verschiedenen Farben) Magnetisierungslinien, Feldlinien und Feldflächen. (b) Wie sieht man es dem Feldbild an, dass sich die beiden Magneten abstoßen?
3. Abb. 2.15 zeigt einen etwas eigenartigen Magneten. Er hat die Form einer Hohlkugel. Die äußere Oberfläche trägt positive magnetische Ladung, die innere vom Betrag her gleich viel negative. Zeichne in verschiedenen Farben Magnetisierungslinien, Feldlinien und Feldflächen. Wie ist das Magnetfeld außerhalb der Kugel und wie ist es in dem inneren Hohlraum?
4. Ein Magnet sei ringförmig wie der von Abb. 2.12, nur soll der Ring jetzt keinen Spalt mehr haben. Die Magnetisierungslinien folgen der Form des Ringes. Was lässt sich über die magnetischen Pole sagen, und was über die magnetischen Feldlinien und -flächen?

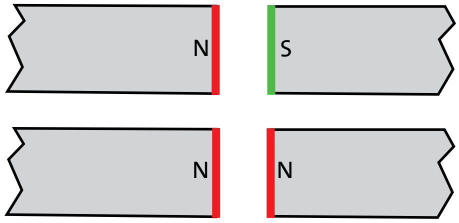


Abb. 2.14 Zu den Aufgaben 1 und 2

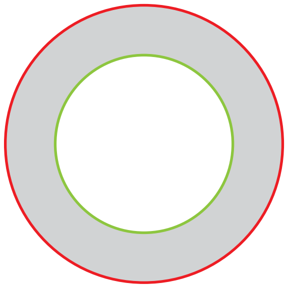


Abb. 2.15 Zu Aufgabe 3

2.6 Weichmagnetische Materialien

Ein Magnet zieht nicht nur einen anderen Magneten an, sondern auch Körper aus bestimmten anderen Stoffen, den *weichmagnetischen* Stoffen. Die Materialien, aus dem die Dauermagneten hergestellt werden, die wir in den vorangehenden Abschnitten untersucht haben, heißen *hartmagnetische* Stoffe. Weichmagnetische Materialien bestehen, genauso wie hartmagnetische, aus magnetischen Atomen. Während sich aber die Ausrichtung der atomaren Magneten der hartmagnetischen Stoffe unter normalen Umständen nicht ändert, sind die atomaren Magneten der weichmagnetischen Stoffe leicht verdrehbar. Ein typisches weichmagnetisches Material ist Weicheisen. (Es gibt verschiedene Eisensorten, je nachdem, welche anderen Stoffe hinzulegiert worden sind.)

In weichmagnetischen Stoffen sind die atomaren Magneten zunächst völlig regellos orientiert, sodass sich nirgends an der Oberfläche eine Nettoladung befindet. Bringt man aber einen weichmagnetischen Körper in ein magnetisches Feld, so orientieren sich die atomaren Magneten. Das bedeutet, dass das Innere des Körpers magnetisiert wird und dass sich die Oberfläche magnetisch auflädt. Entfernt man den weichmagnetischen Körper wieder aus dem Feld, so geraten die atomaren Magneten wieder durcheinander. Er verliert seine Magnetisierung und die magnetische Ladung verschwindet wieder.

Dieses Verhalten ist ähnlich wie das von Metallen, die man in ein elektrisches Feld bringt. Hier entstehen an der Oberfläche elektrisch geladene Bereiche, wobei die Ge-

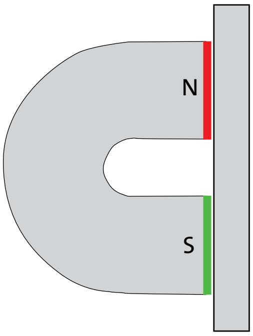


Abb. 2.16 Wie verlaufen die Magnetisierungslinien im Hufeisenmagneten und im Weicheisenkörper?

samtladung des Körpers null bleibt. Wir hatten diese Erscheinung *Influenz* genannt. Genau genommen müsste man sie *elektrische Influenz* nennen, um sie von der *magnetischen Influenz* in weichmagnetischen Stoffen zu unterscheiden.

Genauso wie im Innern eines Metalls kein elektrisches Feld aufrechterhalten werden kann, so kann in weichmagnetischen Stoffen kein magnetisches Feld existieren. Und genauso wie die elektrischen Feldlinien senkrecht in Metalloberflächen einmünden, so münden magnetische Feldlinien senkrecht in weichmagnetische Körper ein. Abb. 2.16 zeigt ein Stück Weicheisen, das sich in der Nähe eines Hufeisenmagneten befindet. Wie verlaufen die Magnetisierungslinien im Hufeisenmagneten und im Weicheisenkörper?

> Weichmagnetische Körper werden magnetisiert, wenn man sie in ein magnetisches Feld bringt. An ihrer Oberfläche entstehen magnetisch geladene Bereiche. Das magnetische Feld wird aus ihrem Innern verdrängt.
> Die magnetischen Feldlinien münden senkrecht zur Oberfläche ein, und sie enden an der Oberfläche.

Aufgaben

1. Zwischen die Pole eines Magneten wird eine Platte aus einem weichmagnetischen Material gebracht, Abb. 2.17. Zeichne Feldflächen und Feldlinien ein. Was für mechanische Spannungen herrschen in der Metallplatte: Druck oder Zug? Welche Richtung haben sie?
2. Wahrscheinlich habt ihr in der Gerätesammlung der Schule einen Magneten der so aussieht wie es Abb. 2.18 zeigt. Er besteht aus einem Stabmagneten und zwei Weicheisenteilen. Wo entstehen im Weicheisen magnetische Pole? Wie verlaufen die Magnetisierungslinien? Wie verlaufen die Feldlinien? Welchen Vorteil hat der Magnet? Welchen Nachteil hat er?

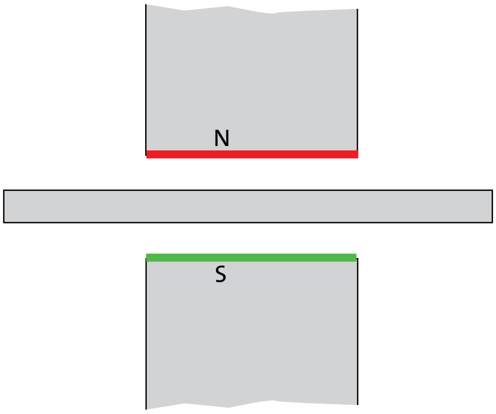


Abb. 2.17 Zu Aufgabe 1

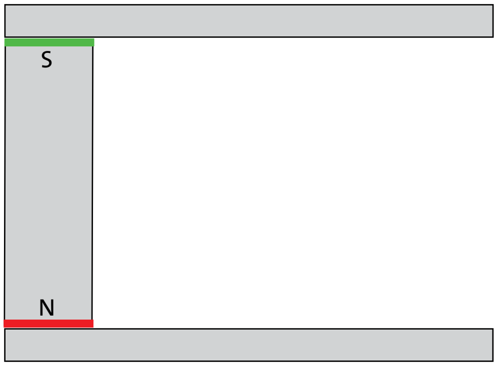


Abb. 2.18 Zu Aufgabe 2

2.7 Elektrischer Strom und magnetisches Feld

Ein langer Draht wird so aufgehängt wie es Abbildung 2.19 zeigt. Der Draht wird mit einem Autoakku verbunden, so dass ein elektrischer Strom in ihm fließt: im rechten Teil nach unten und im linken nach

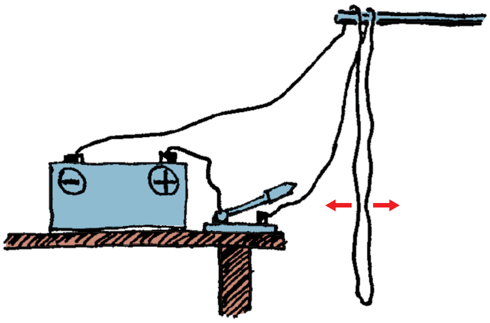


Abb. 2.19 Beim Schließen des Stromkreises springen die Drähte voneinander weg.

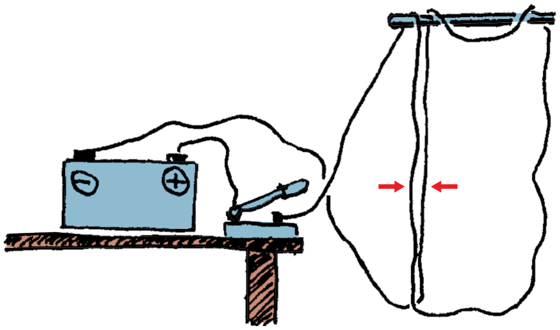


Abb. 2.20 Beim Schließen des Stromkreises springen die Drähte aufeinander zu.

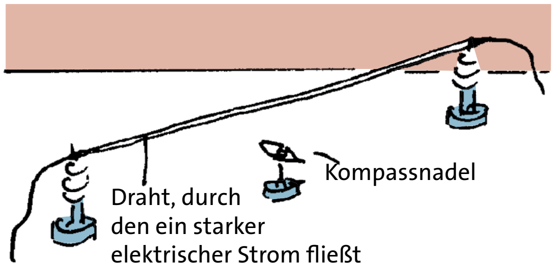


Abb. 2.21 Sobald man den elektrischen Strom einschaltet, ändert die Kompassnadel ihre Richtung.

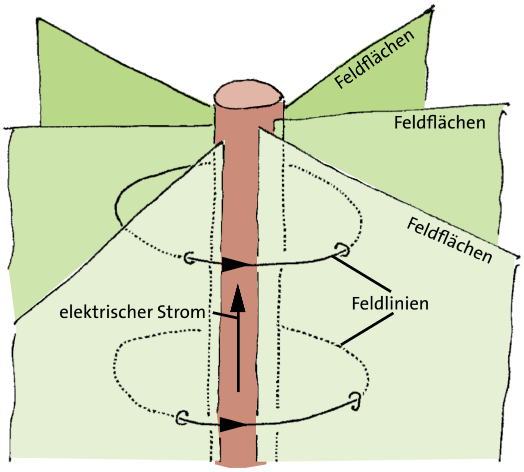


Abb. 2.22 Perspektivische Ansicht von Feldflächen und Feldlinien des magnetischen Feldes eines Drahtes, in dem ein elektrischer Strom fließt.

oben. Man darf den Stromkreis nur für eine kurze Zeit schließen, denn der Widerstand des Drahtes ist sehr gering, und es fließt ein Strom von über 50 A. Während wir den Schalter schließen, schauen wir auf die hängenden Drahtstücke. Die Drahtstücke springen auseinander. Irgendetwas hat sie auseinander gedrückt.

Wir wiederholen das Experiment, verlegen den Draht aber so, dass der Strom in den senkrecht nebeneinander hängenden Drahtabschnitten in dieselbe Richtung fließt, Abb. 2.20. Diesmal springen die Drahtteile beim Schließen des Stromkreises aufeinander zu.

Welches ist die Verbindung, über die der eine Draht am anderen zieht oder auf den anderen drückt? Die Antwort lässt sich leicht finden. Wir bringen in die Nähe eines einzelnen Drahtes, durch den ein starker elektrischer Strom fließen kann, eine Kompassnadel. Sobald man den elektrischen Strom einschaltet, richtet sich die Kompassnadel in eine bestimmte Richtung aus, Abb. 2.21. Unterbricht man den Stromkreis wieder, so pendelt die Nadel in ihre ursprüngliche Richtung zurück. Der Draht ist offensichtlich von einem magnetischen Feld umgeben, solange ein elektrischer Strom in ihm fließt.

Man kann mit der Kompassnadel oder mit Eisenfeilspänen die Richtung der Feldlinien, und damit auch der Feldflächen bestimmen: Die Feldlinien sind bei einem einzigen Draht kreisförmig. Sie umschlingen den Draht so, dass der Kreismittelpunkt im Draht liegt. Sie haben also weder Anfang noch Ende – im Gegensatz zu den Feldlinien des Feldes eines Dauermagneten.

Die Feldflächen sind Ebenen, die im Draht enden, Abb. 2.22.

Abb. 2.23 zeigt einen Schnitt durch das Feld quer zur Drahtrichtung. (Ein elektrischer Strom, der in die Bildebene hineinfließt, wird durch ein Kreuzchen gekennzeichnet; einer, der aus der Bildebene herausfließt, durch einen Punkt.)

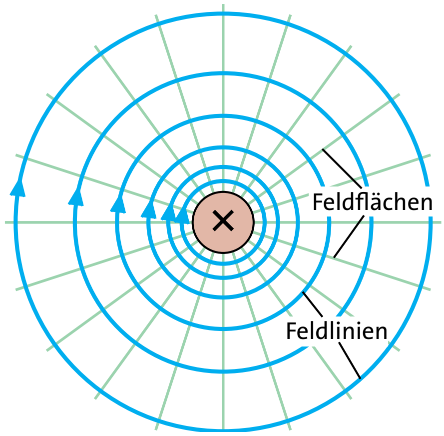


Abb. 2.23 Querschnitt durch den Draht und das Feld von Abb. 2.22. Das Kreuzchen im Draht bedeutet, dass der Strom in die Zeichenebene hineinfließt.

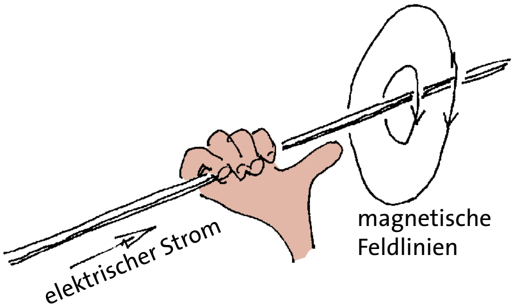


Abb. 2.24 Wenn der Daumen der rechten Hand die Richtung des elektrischen Stroms hat, weisen die anderen Finger in die Richtung der magnetischen Feldstärke.

> Jeder elektrische Strom ist von einem magnetischen Feld umgeben. Die Feldlinien umschlingen den Strom. Die Feldflächen enden auf dem Strom.

Aus der Tatsache, dass die Feldflächen senkrecht in den Draht einmünden, folgt, dass das Feld auf den Draht drückt.

Für die Pfeilrichtung der Feldlinien lässt sich eine einfache Regel formulieren, Abb. 2.24. Umfasse den elektrischen Strom mit den Fingern der rechten Hand, und zwar so, dass der Daumen in die Richtung des elektrischen Stroms zeigt. Dann weisen die gekrümmten Finger in die Richtung der magnetischen Feldstärke.

Abb. 2.25a zeigt das Feld von zwei Drähten, in denen der elektrische Strom in entgegengesetzte Richtungen fließt. In Abb. 2.25b fließt der elektrische Strom in dieselbe Richtung.

Man kann das durch elektrische Ströme verursachte magnetische Feld durch einen Trick sehr viel dichter machen: Man führt ein und denselben Draht einfach mehrere Male an derselben Stelle vorbei, oder noch besser, man wickelt ihn zu einer Spule auf. In Abb. 2.26 wurde der Draht 100 mal im Kreis herumgeführt. Wenn nun im Draht ein Strom von 1 A fließt, so fließt durch den eingezeichneten Querschnitt ein Gesamtstrom von 100 A. Wir haben daher in der Umgebung dieses Drahtbündels ein magnetisches Feld, das so dicht ist wie das eines einzigen Drahtes, in dem ein elektrischer Strom von 100 A fließt.

Eine sehr nützliche Anordnung stellt eine zylinderförmige Spule dar. Der Draht wird hier in vielen Lagen übereinander gewickelt, Abb. 2.27. (Der Draht muss natürlich isoliert sein. Andernfalls könnte sich der Strom einen kürzeren Weg suchen.)

In Abb. 2.28 ist das Feld einer Spule im Querschnitt dargestellt. Das Feld befindet sich im Wesentlichen

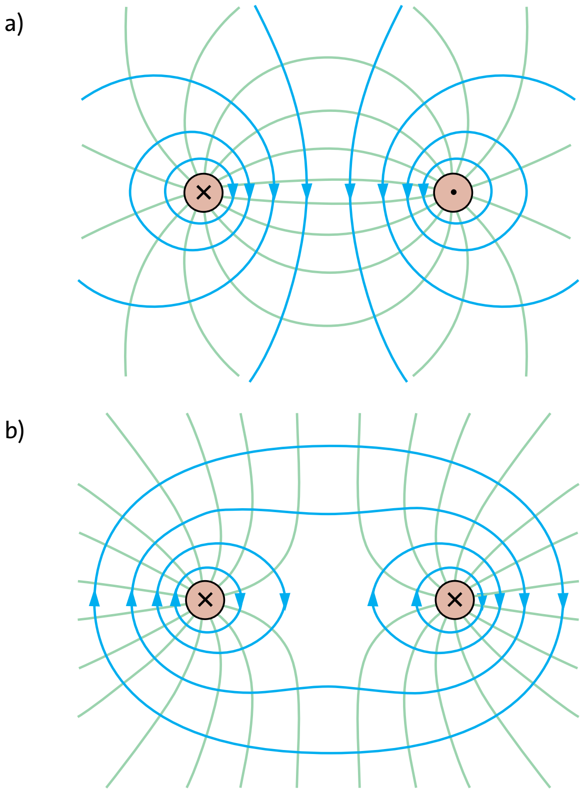


Abb. 2.25 Feldflächen und -linien des Feldes von zwei parallelen Drähten. (a) Die Ströme fließen in entgegengesetzte Richtungen. (b) Die Ströme fließen in die gleiche Richtung.

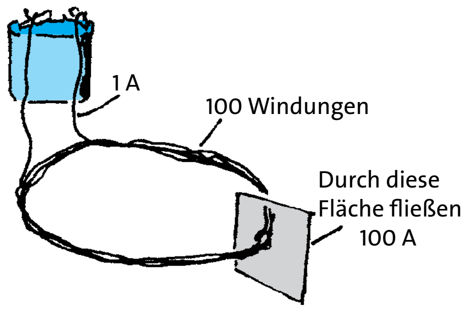


Abb. 2.26 Das Feld des Drahtbündels ist so dicht wie das eines Drahtes, in dem ein Strom von 100 A fließt.

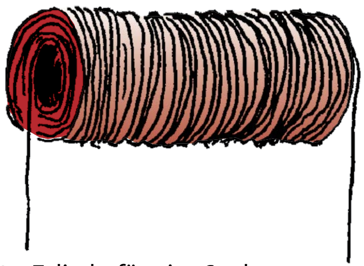


Abb. 2.27 Zylinderförmige Spule

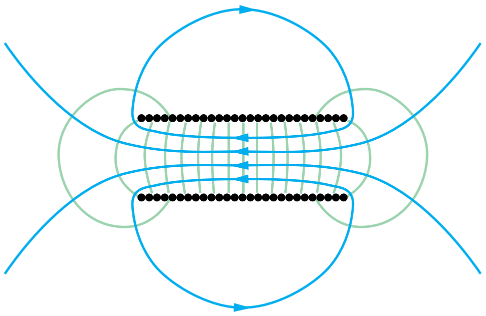


Abb. 2.28 Feldflächen und -linien des Feldes einer zylinderförmigen Spule

nur im Innern der Spule und ist dort nahezu homogen (so wie sich das Feld des Kondensators im Wesentlichen nur zwischen den Platten befindet und dort homogen ist). Die Feldlinien liegen parallel zur Achse der Spule.

Aufgaben

1. Ein Kupferrohr wird als elektrischer Leiter verwendet, wobei der elektrische Strom in Längsrichtung fließt. Zeichne einen Rohrquerschnitt und zeichne Feldlinien und Feldflächen des magnetischen Feldes außerhalb des Rohres ein. Versuche, Feldlinien und Feldflächen im Rohrinnern zu zeichnen. Was kannst du schließen? Was für Druck- oder Zugspannungen spürt das Rohr?
2. Vier parallele Drähte werden von elektrischen Strömen der gleichen Stromstärke durchflossen, Abb. 2.29a. Skizziere Feldflächen und Feldlinien.
3. Vier parallele Drähte werden von elektrischen Strömen der gleichen Stromstärke durchflossen, Abb. 2.29b. Skizziere Feldflächen und Feldlinien.

Abb. 2.29 (a) Zu Aufgabe 2; (b) zu Aufgabe 3

2.8 Berechnung magnetischer Feldstärken

Die magnetische Feldstärke ist ein Vektor. Für ihn gelten dieselben Regeln der Vektoraddition wie für die elektrische Feldstärke. Wenn ein Strom der Stärke I_1 allein genommen in einem Punkt P ein magnetisches Feld der Feldstärke $\vec{H}_1$ erzeugt, und ein anderer Strom der Stärke I_2 allein genommen in demselben Punkt P ein Feld der Feldstärke $\vec{H}_2$, so erzeugen beide Ströme zusammen in P ein Feld der Feldstärke

$$\vec{H} = \vec{H}_1 + \vec{H}_2 .$$

Analog zum elektrischen Feld gilt auch:

> Multipliziert man alle elektrischen Stromstärken mit einem Faktor k, so nehmen die Beträge aller magnetischen Feldstärken um den Faktor k zu. Die Feldstärkerichtungen

Wir brauchen diese Regeln, um das magnetische Feld in einer Spule zu berechnen. Wir wissen, dass das Feld homogen ist und der Feldstärkevektor dieselbe Richtung hat wie die Spulenachse. Der Merksatz sagt uns, dass die Feldstärke proportional ist zur elektrischen Stromstärke. Es ist also

$$|\vec{H}| \sim I .$$

Das kann aber noch nicht alles sein. Zuständig für das Feld ist ja sicher nicht der Strom in einem Draht allein, sondern vielmehr der Gesamtstrom, der das Innere der Spule umfließt. Für die entsprechende Gesamtstromstärke I_G gilt

$$I_G = n \cdot I$$

(n = Zahl der Windungen der Spule). Verdoppelt man die Windungszahl, lässt aber sonst die Form der Spule so wie sie war, so muss sich auch die Feldstärke im Innern der Spule verdoppeln, Abb. 2.30.

Es ist ja so, als hätte man zwei Spule übereinander geschoben. Wir vervollständigen also unsere Proportionalität zu

$$|\vec{H}| \sim I_G = n \cdot I .$$

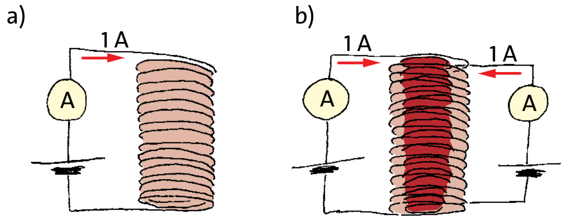


Abb. 2.30 (a) Spule mit 200 Windungen, durch die ein Strom von 1 A fließt. (b) Eine Spule mit 400 Windungen, durch die ein Strom von 1 A fließt, ist äquivalent zu zwei übereinander gewickelten Spulen mit je 200 Windungen. Die magnetische Feldstärke ist doppelt so groß.

Auch diese Beziehung ist aber noch nicht vollständig. Abb. 2.31 zeigt zwei Spulen, die sich in ihrer Länge l unterscheiden: Die zweite hat eine doppelt so große Länge wie die erste.

Durch den Draht jeder Spule fließe ein Strom von 1 A. Die Gesamtstromstärke in der ersten Spule ist daher

$$I_t = 1\ \mathrm{A} \cdot 200 = 200\ \mathrm{A}$$

und in der zweiten

$$I_t = 1\ \mathrm{A} \cdot 400 = 400\ \mathrm{A}.$$

Wir können uns nun aber die zweite Spule vorstellen als zwei nebeneinander gestellte Spulen, durch die Gesamtströme von je 200 Ampere fließen. In jeder der Einzelspulen haben wir aber dieselbe Feldstärke wie in der einzelnen Spule links im Bild.

Ein Vergleich der kurzen Spule links mit der langen rechts zeigt, dass der Quotient aus Gesamtstromstärke und Spulenlänge l

$$I_t / l = n \cdot I / l,$$

links und rechts derselbe ist. Worauf es bei der Feldstärke ankommt ist also der Quotient aus Gesamtstromstärke und Länge l, oder *Windungszahl mal Stromstärke durch Spulenlänge*:

$$|\vec{H}| \sim \frac{I_t}{l} = \frac{n \cdot I}{l}.$$

Nun ist die Maßeinheit der magnetischen Ladung so gewählt worden, dass hier statt des Proportionalzeichens ein Gleichheitszeichen steht.

Magnetische Feldstärke in der Spule:

$$|\vec{H}| = \frac{I_t}{l} = \frac{n \cdot I}{l}. \qquad (2.3)$$

Vergleiche die Formel mit Gleichung (1.3) für die elektrische Feldstärke im Kondensator.

Beispiel

Durch eine Spule mit 1500 Windungen und einer Länge von 30 cm fließt ein elektrischer Strom von 4 Ampere. Wie groß ist die magnetische Feldstärke im Innern der Spule?

$$|\vec{H}| = \frac{n \cdot I}{l} = \frac{1500 \cdot 4\ \mathrm{A}}{0{,}3\ \mathrm{m}} = 20000\ \mathrm{A/m}.$$

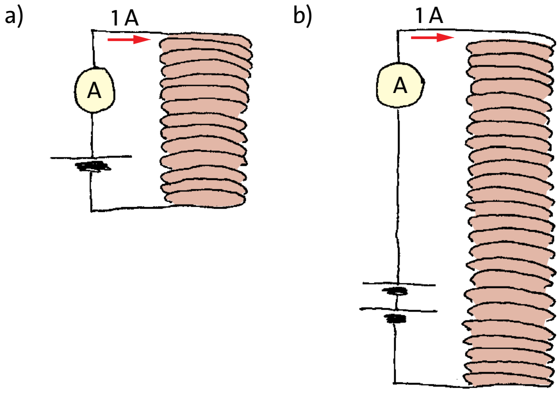


Abb. 2.31 (a) Spule mit 200 Windungen, Stromstärke 1 A. (b) Doppelt so lange Spule mit 400 Windungen, Stromstärke 1 A. Die Spule ist äquivalent zu zwei nebeneinander stehenden Spulen mit je 200 Windungen. Die Feldstärke ist wie in der Spule von (a).

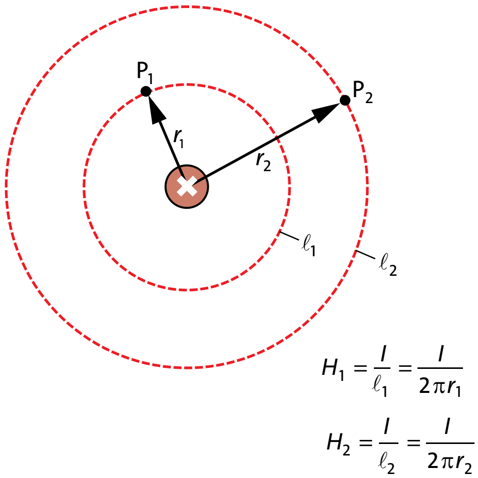


Abb. 2.32 Zur Berechnung der magnetischen Feldstärken H1 und H2 in den Punkten P1 und P2 in der Umgebung eines geraden Drahtes

Die Berechnung der Feldstärke für andere elektrische Leiter ist im allgemeinen komplizierter als für eine Spule. Nun gibt es aber noch einen anderen Fall, in dem sich die Feldstärke besonders leicht berechnen lässt: das Feld eines geraden, langen Drahtes.

Magnetische Feldstärke in dem Umgebung eines geraden Drahtes:

$$|\vec{H}| = \frac{I}{l}$$

l = Kreisumfang

Hier ist I die Stärke des Stroms im Draht und l ist der

Umfang des Kreises, auf dem der Punkt liegt, für welchen man die Feldstärke berechnen will, Abb. 2.32. Du siehst, dass die Formel eine große Ähnlichkeit mit der für die Spule hat. Beachte aber die unterschiedliche Bedeutung von l in den beiden Fällen.

Aufgaben

1. Vergleiche Gleichung (2.3) mit Gleichung (1.3). Warum enthält Gleichung (1.2) nicht die Fläche der Platten des Kondensators? Warum enthält Gleichung (2.3) nicht die Querschnittsfläche der Spule?
2. Eine 60 cm lange Spule hat 3000 Windungen. Durch die Spule fließt ein elektrischer Strom von 0,8 A. Wie groß ist die magnetische Feldstärke im Innern der Spule?
3. Du findest eine Spule und möchtest ihre Windungszahl wissen. Die Spule ist 15 cm lang. Du schickst einen elektrischen Strom von 500 mA hindurch und misst mit dem Magnetfeldmessgerät im Innern eine Feldstärke von 3000 A/m.
4. Eine torusförmige Spule (ein Zyl inder, der zu einem autoreifenförmigen Ring gebogen wurde) hat 1000 Windungen. Der Ringdurchmesser beträgt 0,5 m. Durch die Spule fließt ein elektrischer Strom von 2,5 A.
   (a) Skizziere Feldlinien und Feldflächen.
   (b) Wie groß ist die Feldstärke im Innern der Spule?
5. In einem 2 mm dicken Draht fließt ein elektrischer Strom von 16 A.
   (a) Wie ist die magnetische Feldstärke an seiner Oberfläche?
   (b) Wie ist die magnetische Feldstärke in einem Abstand von 1 cm von der Drahtmitte?
6. Ein Koaxialkabel besteht aus einem biegsamen metallischen Hohlzylinder und einem in der Zylinderachse verlaufenden Draht. Zylinder und Draht sind voneinander elektrisch isoliert. Sie stellen Hinund Rückleitung des Kabels dar. In einem solchen Kabel fließe ein elektrischer Strom von 0,5 A (also im Draht in die eine Richtung, im Zylinder in die andere). Der äußere Durchmesser des Kabels sei 10 mm, der Durchmesser des Drahtes 1 mm.
   (a) Wie ist die magnetische Feldstärke außerhalb des Kabels?
   (b) Wie ist die magnetische Feldstärke an der Drahtoberfläche?

2.9 Die Messung der magnetischen Ladung

Wir wollen die magnetische Ladung eines Magnetpols eines Stabmagneten messen.

Wir formen dazu unsere altbekannte Gleichung

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{Q_m}$$

um und erhalten:

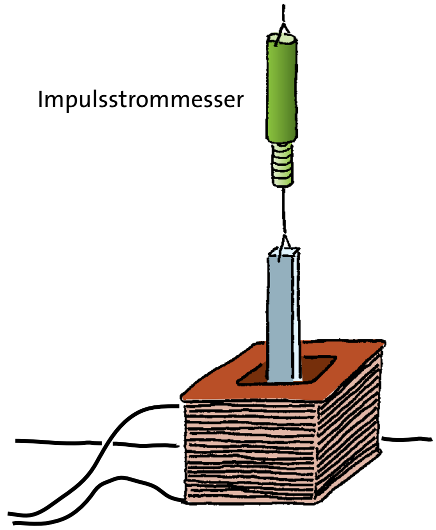


Abb. 2.33 Zur Messung der magnetischen Ladung eines Magnetpols

$$Q_m = \frac{F}{H} \tag{2.4}$$

Zur Bestimmung von F hängen wir den Magneten an einen Impulsstrommesser, so dass der eine Pol ganz im Innern einer Spule steckt, während sich der andere so weit außerhalb befindet, dass man von seinem Feld an dieser Stelle absehen kann, Abb. 2.33. Wir lassen nun einen elektrischen Strom durch die Spule fließen und sehen nach, um welchen Betrag die Impulsstromstärke zunimmt. Die Zunahme entspricht gerade dem Impulsstrom, der von der Spule durch das Feld in den Magnetpol fließt.

Wir müssen nun noch die magnetische Feldstärke H in der Spule berechnen und bekommen dann mit Gleichung (2.4) die magnetische Ladung.

Beispiel

Länge der Spule: $l = 8$ cm
Windungszahl: $n = 500$
elektrische Stromstärke (gemessen): 1,2 A
Impulsstromstärke (gemessen): 0,15 N
Magnetische Feldstärke des Feldes in der Spule:

$$H = \frac{n \cdot I}{l} = \frac{500 \cdot 1{,}2\ \text{A}}{0{,}08\ \text{m}} = 7500\ \text{A/m}$$

Ladung des Magnetpols:

$$Q_m = \frac{F}{H} = \frac{0{,}15\ \text{N}}{7500\ \text{A/m}} = 2 \cdot 10^{-5}\ \text{Wb}$$

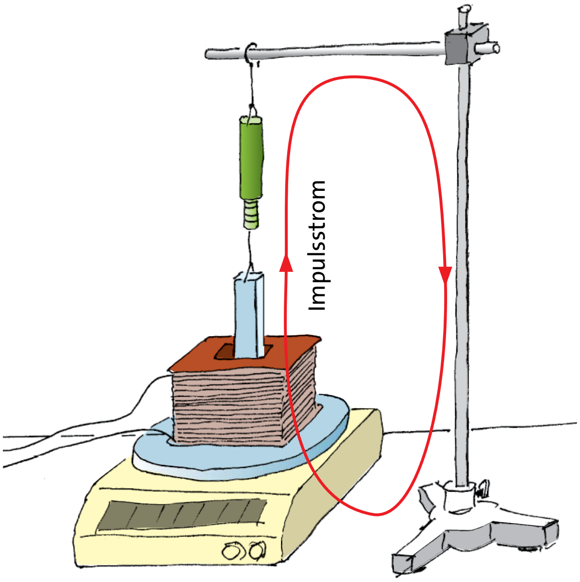


Abb. 2.34 Der Impulsstrom wird an zwei Stellen gemessen: an der einen mit einem Impulsstrommesser, an der anderen mit einer Analysenwaage.

Man kann mit diesem Versuch auch bestätigen, dass die gesamte magnetische Ladung eines Magneten gleich null ist: Man hängt den Magneten so auf, dass sich der andere Pol innerhalb der Spule befindet, und lässt den elektrischen Strom in die entgegengesetzte Richtung fließen. Für den Impulsstrom findet man denselben Wert wie im ersten Versuch.

Man könnte auch einen kleineren Magneten an den Impulsstrommesser hängen, und zwar so, dass sich der Magnet ganz in der Spule befindet. Man stellt fest, dass die Impulsstromstärke jetzt null ist.

Als Spielerei wollen wir noch eine weitere Variante des Experiments betrachten: Wir stellen die Spule auf eine Waage (am besten eine Waage, deren Waagschale sich beim Wägen nicht bewegt, etwa die Analysenwaage aus der Chemiesammlung), und schalten wieder den elektrischen Strom in der Spule ein, Abb. 2.34.

Jetzt fließt ein Impulsstrom aus dem Tisch über die Waage, die Spule, das magnetische Feld, den Magneten, den oberen Impulsstrommesser und dessen Aufhängung zurück in den Tisch. Da die Waage nichts anderes ist als ein Impulsstrommesser, fließt derselbe Impulsstrom durch zwei Messgeräte nacheinander. Beide zeigen natürlich dasselbe an. (Um an der Waage die Impulsstromstärke abzulesen muss man den Skalenwert mit dem Ortsfaktor multiplizieren, da die Waagenskala in Masseeinheiten geeicht ist.)

2.10 Druck und Zug im magnetischen Feld

Wie im elektrischen Feld, so herrschen auch im magnetischen Feld mechanische Spannungen. In Richtung des Feldstärkevektors steht das Feld unter Zug-, quer dazu unter Druckspannung. Diese Spannungen haben viele technische Anwendungen und Auswirkungen in der Natur.

Die Werte der Spannungen (= Impulsstromdichten) berechnet man nach Formeln, die dieselbe Gestalt haben wie beim elektrischen Feld.

Magnetisches Feld: $\sigma_{\parallel} = -\frac{\mu_0}{2}\left|\vec{H}\right|^2 \quad \sigma_{\perp} = \frac{\mu_0}{2}\left|\vec{H}\right|^2$

$\sigma_{\parallel}$ ist wieder die Spannung in Richtung der Feldlinien; sie ist negativ (Zugspannung). $\sigma_{\perp}$ die Spannung quer zu den Feldlinien, ist positiv (Druckspannung).. $|\vec{H}|$ ist der Betrag der magnetischen Feldstärke. μ_0 ist die *magnetische Feldkonstante*:

Magnetische Feldkonstante
$\mu_0 = 1{,}257 \cdot 10^{-6}$ Wb/(A·m)

Wir können nun verstehen, warum und wie sich Körper anziehen oder abstoßen. Wir wollen wieder, allein durch betrachten des Feldbildes, voraussagen, in welche Richtung das Feld die magnetisierten Körper drückt oder zieht.

1. Der Ringmagnet

Abb. 2.12 zeigt das Feldbild. Die Feldlinien münden von unten her praktisch senkrecht in den oberen Pol ein. Da in Richtung der Feldlinien Zugspannung herrscht und die Feldlinien auf der Polfläche enden, zieht das Feld am oberen Pol nach unten. Am unteren Pol zieht es entsprechend nach oben. Ein Ring mit einem Gelenk, Abb. 2.35a wäre nicht stabil; er würde zusammenklappen, Abb. 2.35b.

2. Der einzelne Draht

Abb. 2.23 zeigt Feldlinien und Feldflächen für einen Draht, in dem ein elektrischer Strom fließt. Die Feldflächen münden von allen Seiten in den Draht ein und sie enden dort. Das Feld drückt also von außen auf den Draht. Hier stellt sich eine ähnliche Frage wie beim elektrischen Feld einer geladenen Kugel, Abb. 1.47. Wenn das Feld nach innen drückt, muss es auch nach außen drücken. Woran hält es sich außen fest? Die Antwort findet man wieder, indem

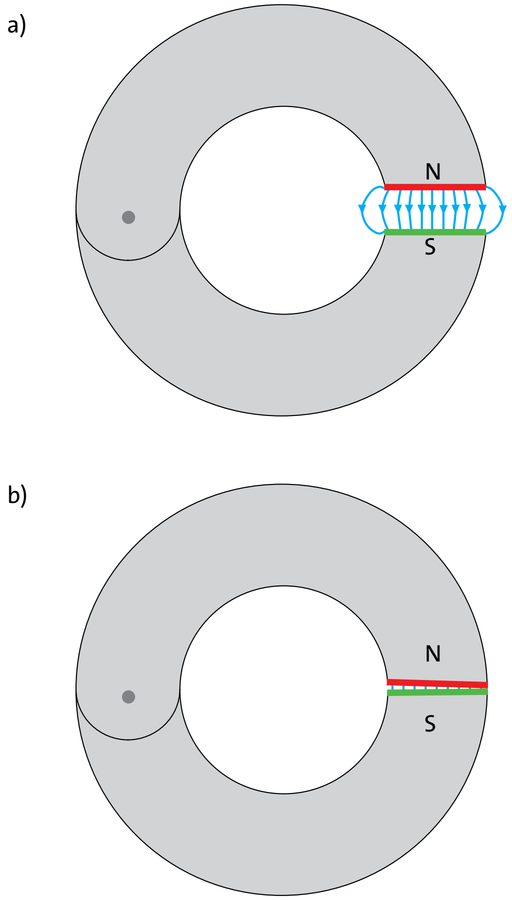


Abb. 2.35 Ringmagnet mit einem Gelenk. In der Stellung (a) ist der Magnet nicht stabil, er klappt zusammen in Stellung (b).

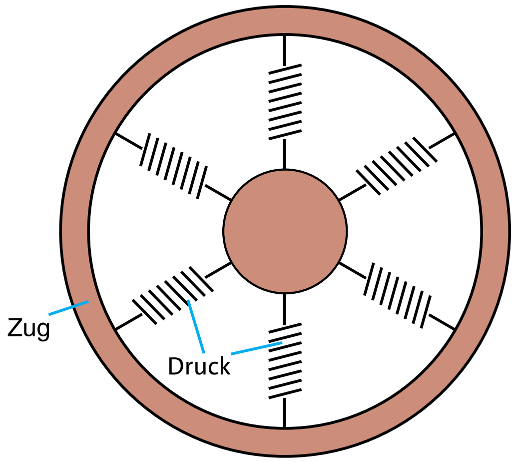


Abb. 2.36 Modell des magnetischen Feldes eines Drahtes, in dem ein elektrischer Strom fließt. Die Federn drücken nach innen auf den Draht und nach außen auf den Ring. Der Ring steht dadurch unter Zugspannung.

man ein „materielles Modell“ des Feldes betrachtet, Abb. 2.36.

Die radialen Federn stehen unter Druckspannung, so wie die Feldflächen. Sie halten sich außen an dem Ring fest. Der Ring steht dadurch unter Zugspannung. Genau das trifft auch für unser Feld zu; auch das Feld steht in Richtung der Kreisumfänge, d.h. in Richtung der Feldlinien unter Zugspannung.

Für einen typischen elektrischen Leiter aus einem festen Material, etwa Kupfer, mit einem typischen elektrischen Strom, von z.B. 20 A macht sich der Druck des magnetischen Feldes kaum bemerkbar (siehe auch Aufgabe 1).

Wenn aber ein sehr starker elektrischer Strom in einem flüssigen Leiter fließt oder in einem leitenden Gas (einem Plasma), so kann der Druck starke Auswirkungen haben.

In einem Kernfusionsreaktor, einem so genannten Tokamak, muss ein Plasma auf einer Temperatur von etwa 100 Millionen Kelvin in einem torusförmigen Behälter gehalten werden. Das Plasma darf nicht mit den Behälterwänden in Kontakt kommen. Man sorgt daher dafür, dass in dem Gas ein starker elektrischer Strom fließt. Dessen magnetisches Feld drückt von außen auf das Plasma und hält es zusammen. Das Gas ist im magnetischen Feld eingesperrt.

3. Die Spule

Ihr Feld zeigt Abbildung 2.28. Wie wirken sich Druck- und Zugspannungen auf die Spule aus? Was spürt die Spule? Wieder betrachten wir ein materielles Modell, Abb. 2.37.

Die unter Druck stehenden Federn, die quer zur Spulenrichtung liegen (in der Abbildung vertikal) drücken auf die Spulendrähte von innern her. Wenn die Spule aus einem sehr weichen Material bestünde, würden sich die einzelnen Windungen aufblähen.

Die waagrechten Federn, die unter Zugspannung stehen, halten sich an den Enden an je zwei schrägen Federn fest, die von außen auf die Spulenenden drücken. Die ganze Spule steht also in Längsrichtung unter Druckspannung. Tatsächlich wird auch eine locker gewickelte Spule vom Feld schlagartig zusammengedrückt, wenn man einen starken Strom einschaltet, Abb. 2.38.

Der x-Impulsstrom fließt im Innern der Spule von rechts nach links (Zugspannung). Am linken Spulenende biegt er ab und fließt durch die Spule zurück nach rechts (Druckspannung) und dann wieder zurück ins Feld, Abb. 2.39.

Wir können auch die entsprechende Impulsstromstärke berechnen.

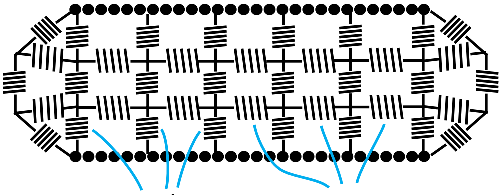


Abb. 2.37 Modell des magnetischen Feldes einer Spule. Die Federn drücken von innen her auf die einzelnen Windungen und von den Seiten her in Längsrichtung auf die Spule.

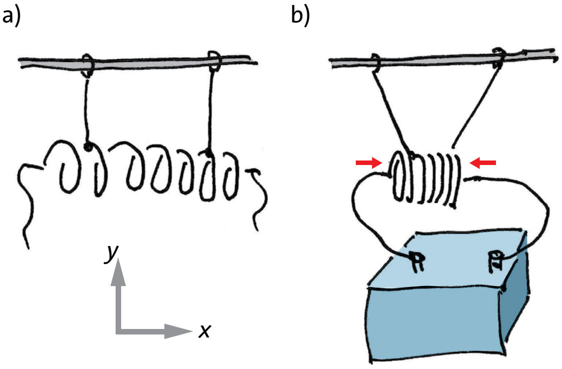


Abb. 2.38 (a) Locker gewickelte, elastische Spule. (b) Die Spule wird kurz an eine Autobatterie angeschlossen. Sie wird vom Feld schlagartig zusammengedrückt.

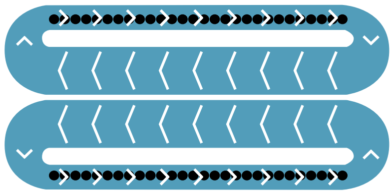


Abb. 2.39 Der *x*-Impulsstrom fließt im Feld im Innern der Spule von rechts nach links und durch das Spulenmaterial wieder zurück nach rechts.

Die folgenden Werte seien gegeben:
Länge der Spule: $l = 40$ cm
Querschnittsfläche der Spule: $A = 100\ \text{cm}^2$
Windungszahl: $n = 50$
elektrische Stromstärke: $I = 120$ A
Zunächst die magnetische Feldstärke:

$$|\vec{H}| = \frac{n \cdot I}{l} = \frac{50 \cdot 120\ \text{A}}{0{,}4\ \text{m}} = 15000\ \text{A/m}$$

Daraus folgt die Zugspannung innerhalb der Spule:

$$\sigma_{\|} = -\frac{\mu_0}{2}|\vec{H}|^2$$
$$= -\frac{1{,}257 \cdot 10^{-6}\ \text{Wb/(A} \cdot \text{m)}}{2} \cdot (15000\ \text{A/m})^2$$
$$= -141\ \text{Pa}$$

und schließlich die Impulsstromstärke:

$$F = \sigma_{\|} \cdot A = -141\ \text{Pa} \cdot 0{,}01\ \text{m}^2 = -1{,}41\ \text{N}$$

Aufgaben

1. Ein Kupferdraht habe eine Querschnittsfläche von 1,5 mm². In dem Draht fließt ein elektrischer Strom von 16 A. Wie groß ist der Druck des magnetischen Feldes an der Oberfläche des Drahtes?
2. Ein Blitz besteht aus ionisierter Luft (also einem Plasma) durch die ein starker elektrischer Strom von der Erde in die Gewitterwolke fließt. Ein typischer Blitz hat einen Durchmesser von 1 cm, die elektrische Stromstärke ist 10 000 A.
(a) Wie groß ist der Druck des magnetischen Feldes an der Oberfläche des Plasmas?
(b) Das Plasma hat eine Temperatur von 10 000 K. Es wurde so schnell erhitzt, dass es zunächst noch keine Zeit hatte sich auszudehnen. Wie hoch ist der entstandene Gasdruck? Vergleich mit dem Ergebnis von Teil (a).
3. Zwei parallele Drähte, in denen elektrische Ströme in entgegengesetzte Richtungen fließen, werden bekanntlich vom magnetischen Feld voneinander weg bewegt, Abb. 2.19. Wie ist das an dem Feldbild von Abb. 2.25a zu erkennen?
4. Zwei parallele Drähte, in denen elektrische Ströme in die gleiche Richtung fließen, werden bekanntlich vom magnetischen Feld zueinander hin bewegt, Abb. 2.20. Wie ist das an dem Feldbild von Abb. 2.25b zu erkennen?

2.11 Elektromagneten

Wir erinnern uns daran, dass weichmagnetische Stoffe, Weicheisen zum Beispiel, das magnetische Feld aus ihrem Innern verdrängen. Das Weicheisen wird dabei magnetisiert, und an seiner Oberfläche bilden sich magnetische Pole. Wenn man das Innere einer Spule, also den Bereich, in dem sich der größte Teil des Feldes der Spule befindet, mit Weicheisen ausfüllt, so wird das Feld von dort verdrängt. Es befindet sich nun außerhalb der Spule, an den Enden, Abb. 2.40. Eine solche Spule mit Weicheisenkern heißt *Elektromagnet*.

Die Pole befinden sich an den Enden des Weicheisenkerns. Der Elektromagnet hat gegenüber der Spule den Vorteil, dass sich das magnetische Feld nicht mehr versteckt im Innern befindet, sondern an einer leicht zu-

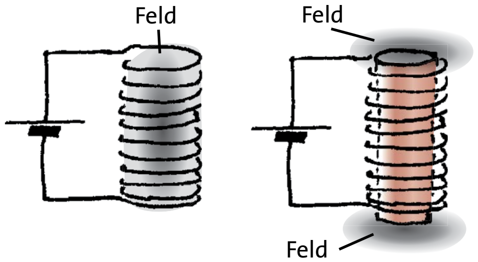


Abb. 2.40 Das magnetische Feld wird durch den Weicheisenkern aus der Spule herausgedrängt.

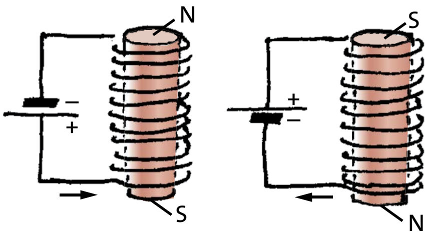


Abb. 2.41 Kehrt man die Richtung des elektrischen Stromes in der Spule um, so vertauschen sich die Pole des Magneten.

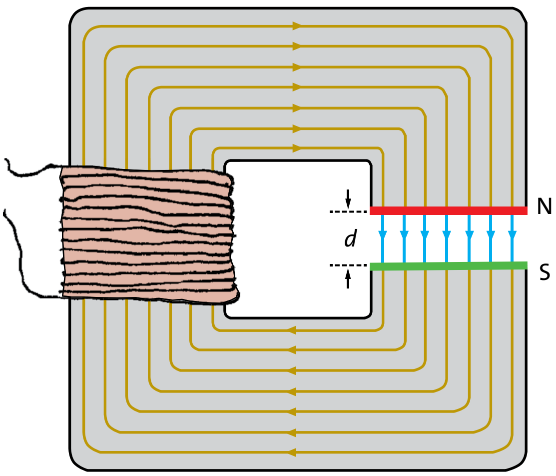


Abb. 2.42 Ringförmiger Elektromagnet

gänglichen Stelle. Gegenüber dem Dauermagneten hat er den Vorteil, dass man ihn ein- und ausschalten, stark und schwach stellen und umpolen kann. Anhand von Abb. 2.41 erkennt man, an welchem Ende der positive und an welchem der negative Magnetpol entsteht.

Abb. 2.42 zeigt eine besonders interessante Variante eines Elektromagneten: Der Eisenkern ist ringförmig und hat einen Spalt. Wenn die Spaltbreite d klein ist, verglichen mit der seitlichen Ausdehnung der Spaltfläche, so ist das Feld im Wesentlichen auf den Spaltraum beschränkt, und es ist homogen. Die Pole befinden sich an der Oberfläche des Spaltes. Das Feld hat also eine Ähnlichkeit mit dem elektrischen Feld eines Plattenkondensators.

In der Abbildung sind sowohl die Magnetisierungslinien als auch die Feldlinien dargestellt. Wir erinnern uns an die Regel, nach der Feldlinien dort anfangen, wo Magnetisierungslinien enden, und Magnetisierungslinien anfangen, wo Feldlinien enden.

Überraschenderweise können wir zur Berechnung der Feldstärke unsere alte Formel wieder heranziehen:

$$|\vec{H}| = \frac{n \cdot I}{d}$$

Statt der Spulenlänge l steht hier aber im Nenner die Spaltbreite d. Man sieht, dass dieser Elektromagnet eine interessante Eigenschaft hat: Durch Verkleinern des Spaltes vergrößert man die Feldstärke.

Elektromagneten haben viele Anwendungen gefunden. Die wichtigste ist wohl der Elektromotor.

Aufgaben

1. Nenne Geräte, in denen sich Elektromagneten befinden. Wie funktionieren diese Geräte?
2. Erfinde einen funktionsfähigen Elektromotor.
3. Ein Elektromagnet mit einem Spalt (wie in Abb. 2.42) habe die folgenden Maße: Spaltbreite 1 cm, Querschnittsfläche des Eisenkerns 100 cm^2. Die Spule des Magneten habe 1000 Windungen, und es fließe ein elektrischer Strom von 2 A.
   (a) Berechne die magnetische Feldstärke im Spalt.
   (b) Wie viel Energie steckt im Feld?
   (c) Um welchen Faktor verändert sich die Feldstärke, wenn man die Spaltbreite auf 1 mm vermindert? Um welchen Faktor ändert sich die Energie?
4. Manchmal verhält sich ein Elektromagnet etwas merkwürdig. Abb. 2.43a zeigt, weit voneinander entfernt, einen Elektromagneten und einen Dauermagneten. Man bringt nun die beiden zusammen, Abb. 2.43b (ohne sie dabei zu verdrehen). Ziehen sie sich an oder stoßen sie sich ab? Die Bezeichnung des Pols des Elektromagneten wurde hier wohlweislich weggelassen. Warum?

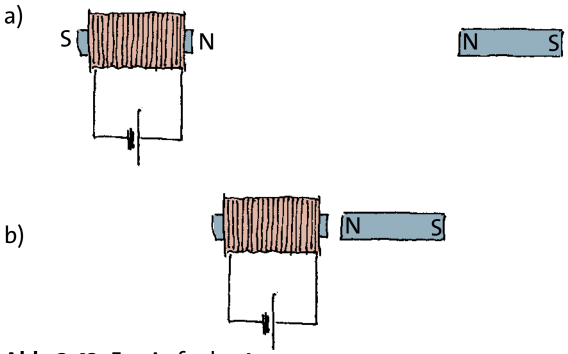


Abb. 2.43 For Aufgabe 4

2.12 Magnetische Feldstärke, Magnetisierung und Flussdichte

Wir haben bisher noch keine Möglichkeit kennen gelernt, die Magnetisierung eines Materials quantitativ, d.h. mithilfe von Zahlen, anzugeben. Das soll jetzt nachgeholt werden.

Man kann die Magnetisierung, genauso wie die magnetische Feldstärke, durch Linien darstellen. Das bedeutet, dass die physikalische Größe Magnetisierung – genauso wie die Feldstärke – eine Vektorgröße ist. Wir bezeichnen sie mit $|\vec{M}|$.

Wenn man die elektrische Stromstärke in der Spule von Abb. 2.42 erhöht, so nimmt sowohl die Magnetisierung im Eisenkern, als auch die Feldstärke des Feldes im Spalt zu. Wir können daher die Magnetisierung im Eisenkern in derselben Maßeinheit messen wie die Feldstärke im Spalt. Wir legen fest: An den Polflächen des Eisenkerns von Abb. 2.42 ist die Magnetisierung an der Innenseite gleich der Feldstärke außen:

$$\vec{M}_{\text{inside}} = \vec{H}_{\text{outside}}$$

Es sieht zunächst so aus, als sei diese Definition nur auf einen ganz bestimmten Magneten anwendbar. Tatsächlich kann man aber die Magnetisierung auf diese Art immer dann bestimmen, wenn sich an einer Grenzfläche die Magnetisierungslinien ohne Knicke als Feldlinien fortsetzen.

Noch einmal zurück zu dem Ringmagneten:

Man kann hier auf einer einzigen, geschlossenen Linie „im Kreis herum" gehen. Auf einem Teil des Weges ist die Linie eine Magnetisierungslinie, auf einem anderen Feldlinie. Wir werden später Erscheinungen kennen lernen, bei denen man zwischen Magnetisierung und magnetischer Feldstärke nicht zu unterscheiden braucht. Es ist daher zweckmäßig, Magnetisierung und magnetische Feldstärke zu einer einzigen Größe zusammenzufassen. Man definiert:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{M} + \vec{H}) \tag{2.5}$$

Die neue Größe heißt *magnetische Flussdichte*. Der Faktor μ_0 bewirkt, dass $\vec{B}$ eine andere Maßeinheit hat als $\vec{H}$ und $\vec{M}$. Es ergibt sich

$$\frac{\text{Wb}}{\text{A}\cdot\text{m}}\cdot\frac{\text{A}}{\text{m}} = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = \text{Tesla}$$

Wir können schon jetzt einen Vorteil sehen, den die Benutzung der Flussdichte mit sich bringt. Den Lehrsatz, demzufolge Feldlinien dort beginnen, wo Magnetisierungslinien enden, und umgekehrt, können wir jetzt einfacher formulieren:

> Flussdichtelinien haben keinen Anfang und kein Ende.

Zum Vergleich eine ähnliche Situation. Betrachte einen geschlossenen elektrischen Stromkreis, dessen Drähte zum Teil aus Kupfer und zum Teil aus Aluminium bestehen. Für den Stromkreis gilt dann die folgende Regel:

Dort wo ein Kupferdraht aufhört, fängt ein Aluminiumdraht an, und wo ein Aluminiumdraht aufhört, fängt ein Kupferdraht an.

Wenn es einem aber nicht auf das Material ankommt, kann man die Regel kürzer formulieren: Der Metalldraht hat keinen Anfang und kein Ende.

Aus Gleichung (2.5) folgt, dass dort, wo die Magnetisierung null ist, also außerhalb von magnetisierbaren Stoffen, gilt:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

und innerhalb von weichmagnetischen Stoffen, also dort, wo die magnetische Feldstärke null ist:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{M}.$$

2.13 Die Spule – die Induktivität

Wir haben schon mehrere Male die Spule mit dem Kondensator verglichen. Beide Geräte sind wichtige elektrische Bauelemente. In elektronischen Geräten findet man sowohl Spulen als auch Kondensatoren. Wir wollen den Vergleich jetzt noch etwas weiter treiben.

Man charakterisiert einen Kondensator durch seine Kapazität. Die Kapazität hängt von den geometrischen Maßen des Kondensators ab, nicht aber von der angelegten Spannung oder der Ladung auf den Platten. Wenn jemand einen Kondensator irgendwo einsetzen will, muss er die Kapazität des Kondensators kennen. Wenn er einen Kondensator kaufen will, muss er die Kapazität angeben.

Es gibt nun eine Größe, die auf ähnliche Art für eine Spule charakteristisch ist: die *Induktivität L*. Auch die Induktivität hängt von den geometrischen Maßen der Spule ab (hierzu gehört auch die Windungszahl) und nicht etwa von der Stärke des Stroms in der Spule. Die

Maßeinheit der Induktivität ist das Henry (H). Es ist

$$\mathrm{H} = \frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{A}} = \frac{\mathrm{V \cdot s}}{\mathrm{A}}.$$

Zur Definition der Induktivität müssen wir zunächst eine neue Größe einführen: den *magnetischen Fluss*:

$$\Phi = \mu_0 \cdot H \cdot A = B \cdot A$$

Der magnetische Fluss in einer Spule ist also das Produkt aus magnetischer Flussdichte B und Querschnittsfläche A der Spule. Man braucht den Fluss, um die Induktivität L zu definieren:

$$L = \frac{n \cdot \Phi}{I}$$

Der magnetische Fluss Φ in einer Spule ist proportional zur Stärke des elektrischen Stroms, der durch die Spule fließt.

$$\Phi = \frac{1}{n} \cdot L \cdot I$$

L ist die Induktivität der Spule.

Die Induktivität der Spule sagt uns also, einen wie großen magnetischen Fluss man mit einem gegebenen elektrischen Strom erzeugen kann. Um zu berechnen, wie L mit den geometrischen Daten der Spule zusammenhängt, ersetzen wir in der vorletzten Gleichung im Zähler

$$\Phi = B \cdot A$$

und im Nenner

$$I = \frac{l \cdot H}{n}$$

und erhalten

$$L = \frac{n \cdot \Phi}{l} = \frac{n \cdot B \cdot A}{(l \cdot H)/n} = \mu_0 \cdot n^2 \cdot \frac{A}{l}$$

$$L = \mu_0 \cdot n^2 \cdot \frac{A}{l}$$

A = Querschnittsfläche der Spule, l = Spulenlänge
μ_0 = $1{,}257 \cdot 10^{-6}$ Wb/(A·m) = magnetische Feldkonstante

Vergleiche das Ergebnis mit der Formel für die Kapazität des Kondensators. Das technische Symbol der Spule sind vier nebeneinander liegende Halbkreise, siehe auch Abb. 2.44.

Aufgaben

1. Eine Spule mit 500 Windungen hat eine Querschnittsfläche von 10 cm^2 und eine Länge von 8 cm. Berechne ihre Induktivität.
2. Eine lose gewickelte Spule wird auf die doppelte Länge auseinander gezogen. Wie verändert sich ihre Induktivität?

2.14 Die Energie des magnetischen Feldes

In einer Spule, durch die ein elektrischer Strom fließt, befindet sich magnetischer Feldstoff, und dieser enthält Energie, genauso wie der elektrische Feldstoff. Wir hatten eine Formel hergeleitet, mit der man den Energieinhalt des elektrischen Feldes im Kondensator berechnen kann:

$$E = \frac{C}{2} U^2.$$

Die entsprechende Formel für die Spule und deren magnetisches Feld wollen wir nicht herleiten, sondern nur angeben. Wie man erwarten kann, sieht sie der Kondensatorformel sehr ähnlich. Man ersetzt einfach die Kapazität durch die Induktivität und die Spannung durch die elektrische Stromstärke:

$$E = \frac{L}{2} I^2.$$

Auch die Formel für die Energiedichte im magnetischen Feld geben wir ohne Rechnung an. Auch sie hat dieselbe Struktur wie die für das elektrische Feld:

$$\rho_E = \frac{\mu_0}{2} \left|\vec{H}\right|^2 .$$

Die Energie im magnetischen Feld einer Spule lässt sich aus Induktivität und elektrischer Stromstärke berechnen:

$$E = \frac{L}{2} I^2.$$

Die Energiedichte eines beliebigen magnetischen Feldes lässt sich aus der magnetischen Feldstärke berechnen:

$$\rho_E = \frac{\mu_0}{2} \left|\vec{H}\right|^2 .$$

Aufgaben

1. Die Feldstärke des magnetischen Feldes der Erde beträgt etwa 40 A/m. Wie viel Energie enthält 1 m^3 dieses Feldes?
2. Wir nehmen näherungsweise an, das Feld zwischen den Polen der beiden Stabmagneten in Abb. 2.14a sei homogen und auf den Bereich zwischen den beiden Polflächen beschränkt. Der Flächeninhalt der Pole betrage 4 cm^2, der Abstand zwischen den Magneten 0,5 cm und die magnetische Feldstärke 120 000 A/m. Wie viel Energie enthält das Feld?
3. Durch eine Spule mit einer Induktivität von 0,01 mH fließt ein elektrischer Strom von 2,5 A. Die Spule ist 10 cm lang und hat eine Querschnittsfläche von 4 cm^2.
(a) Wie viel Energie steckt im Feld der Spule?
(b) Wie groß ist die Energiedichte im Innern der Spule?
4. Der Draht einer Spule hat normalerweise einen elektrischen Widerstand. Eine Spule mit einer Induktivität von 0,2 mH und einem Widerstand von 500 Ω wird an eine 200 V-Spannungsquelle angeschlossen. Wie viel Energie wird dabei im magnetischen Feld der Spule gespeichert?
5. (a) Du schließt einen Kondensator an ein Netzgerät an. Dadurch entsteht ein Feld im Kondensator. Die Energie des Feldes liefert das Netzgerät. Du löst nun den Kondensator vom Netzgerät. Das Feld bleibt danach, wenigstens für eine Weile, erhalten. Die Energie bleibt also im Kondensator gespeichert. Du schließt nun eine Spule an ein Netzgerät an. Dadurch entsteht ein Feld in der Spule. Die Energie des Feldes liefert das Netzgerät. Du möchtest nun die Spule vom Netzgerät lösen, und zwar so, dass das Feld in ihr nicht verschwindet. Wie kannst du das anstellen?
(b) Der vom Netzgerät gelöste Kondensator verliert seine Energie langsam. An welchem Mangel des Kondensators liegt das? Die vom Netzgerät gelöste Spule verliert ihre Energie sehr schnell. An welchem Mangel der Spule liegt das? Es gibt Spulen, die diesen Mangel nicht haben. Was für Spulen sind das?

2.15 Die „Entladekurve“ der Spule

Durch die Spule von Abb. 2.44a fließt ein elektrischer Strom; wir nehmen an, die Stromstärke sei 2 A. Damit enthält die Spule eine bestimmte Menge des magnetischen Feldstoffs und damit eine bestimmte Menge Energie.

Wir öffnen den Schalter, Abb. 2.44b. Im ersten Augenblick nach dem Öffnen ist das Feld noch so, wie kurz zuvor. Seine Energie kann ja nicht von einem Augenblick zum nächsten spurlos verschwinden. Dass das Feld noch da ist, bedeutet aber auch, dass der elektrische Strom noch fließen muss, denn ohne Strom kein Feld und ohne Feld kein Strom. Die Stromstärke muss dieselbe sein wie vor dem Öffnen des Schalters, d.h. 2 A. Weil aber der Batteriestromkreis unterbro-

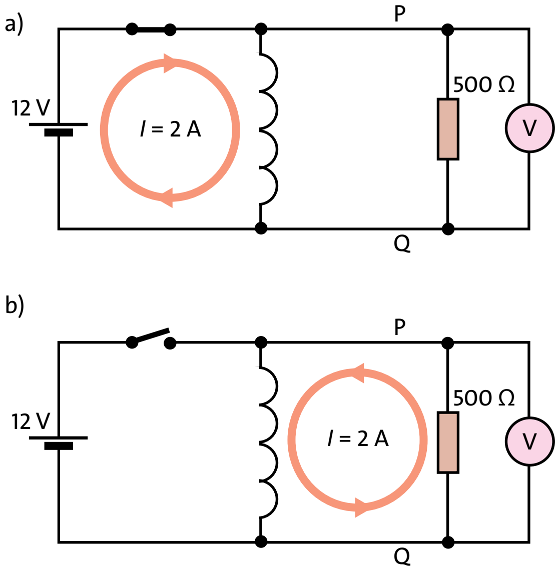


Abb. 2.44 (a) Durch die Spule fließt ein elektrischer Strom von 2 A. (Der Strom durch den Widerstand ist sehr schwach.) (b) Unmittelbar nach dem Öffnen des Schalters muss der Strom von 2 A durch den Widerstand fließen. Dadurch entsteht eine hohe Spannung. Der Strom klingt aber schnell ab.

chen ist, fließen diese 2 A jetzt durch den Widerstand. Wir können nun weiter schließen: Wenn ein elektrischer Strom durch den Widerstand fließt, muss die Spannung am Widerstand den entsprechenden Wert haben; in unserem Fall:

$$U = R \cdot I = 500\ \Omega \cdot 2\ \text{A} = 1000\ \text{V}.$$

Wir sehen also: Beim Öffnen des Schalters entsteht eine Spannung zwischen den Enden des Widerstandes und damit zwischen oberer Leitung P und unterer Leitung Q. Diese ist viel höher als die Spannung zwischen P und Q vor dem Öffnen des Schalters.

Man kann auch sagen: Der Strom, der nach dem Öffnen des Schalters weiter fließen muss und nur durch den Widerstand fließen kann, erzeugt diese Spannung.

Das eben Gesagte gilt allerdings nur für den ersten Augenblick, für den "„Zeitpunkt null“. Was passiert danach? Weil durch den Widerstand ein elektrischer Strom fließt, wird dort Entropie erzeugt. Dazu wird Energie gebraucht, und die kommt aus der Spule. Der entsprechende Energiestrom hängt mit der elektrischen Stromstärke über

$$P = R \cdot I^2 .$$

zusammen.

(Die Gleichung folgt aus $P = U \cdot I$ und $U = R \cdot I$.)

Die Energie in der Spule nimmt also ab. Das bedeutet aber, dass auch die elektrische Stromstärke abnimmt, denn es ist ja

$$E = \frac{L}{2} I^2.$$

Wenn die elektrische Stromstärke abnimmt, nimmt aber wegen

$$P = R \cdot I^2.$$

auch der Energieabfluss aus der Spule ab. Das hat nun zur Folge, dass die elektrische Stromstärke jetzt langsamer abnimmt als vorher usw. usw.

Du sieht schon, wie es weiter geht:

Je kleiner die elektrische Stromstärke ist, desto langsamer nimmt sie ab.

Der Satz kommt dir wahrscheinlich bekannt vor. Wir hatten früher ähnliche Erscheinungen untersucht. Beim Entladen eines Kondensators hatten wir:

Je kleiner die Spannung ist, desto langsamer nimmt sie ab.

Wir könnten auch hier wieder eine Differenzialgleichung aufstellen und einen Lösungsansatz machen. Wir sparen uns die Arbeit, denn der Rechengang wäre derselbe wie beim Kondensator. Es müssen nur einige physikalische Größen durch andere ersetzt werden. Für die „sich entladende“ Spule erhält man:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

d.h. die elektrische Stromstärke klingt exponentiell ab, Abb. 2.45. I_0 ist die Stromstärke unmittelbar nach dem Öffnen des Schalters.

Die Abklingzeit τ ist diesmal:

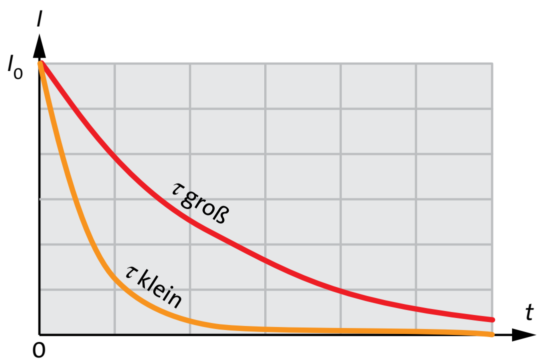


Abb. 2.45 Große Abklingzeit τ bedeutet: Die Stromstärke in der Spule nimmt langsam ab.

$$\tau = \frac{R}{L}$$

Damit der Strom langsam abklingt, muss die Induktivität der Spule groß sein und der Widerstand des Widerstandes klein.

„Entladung“ einer Spule über einen Widerstand

Die elektrische Stromstärke nimmt exponentiell ab:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

$$\tau = \frac{R}{L} = \text{Abklingzeit}$$

Dass der elektrische Strom, der im Batteriestromkreis fließt, beim Öffnen des Schalters in den Widerstand ausweicht, sieht man schön, wenn man statt des Widerstandes eine Glühlampe einbaut, Abb. 2.46 Nach dem Öffnen des Schalters leuchtet sie kurz auf. (Man wählt eine Glühlampe, die bei 12 V Batteriespannung noch nicht leuchtet.)

Wir wollen nun eine Gleichung herleiten, die zunächst noch etwas langweilig aussieht, die uns aber im nächsten Kapitel wieder begegnet. Wir werden erst dann ihre große Tragweite verstehen.

Wir stellen die Energiebilanz für den Stromkreis von Abb. 2.44 auf. Der Schalter wurde gerade geöffnet. Es gilt:

$$P = \frac{dE}{dt}$$

In Worten: Die Stärke P des Energiestroms in den Widerstand hinein ist gleich der Änderungsrate des Energieinhalts der Spule.

Wir ersetzen nun links:

$$P = U \cdot I.$$

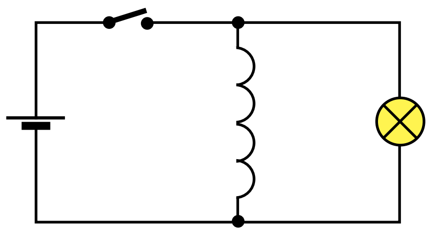


Abb. 2.46 Die Spannung der Batterie reicht nicht, um die Glühlampe zum Leuchten zu bringen. Erst beim Öffnen des Schalters leuchtet sie kurz auf. Die Energie dazu kommt aus dem magnetischen Feld der Spule.

Rechts ersetzen wir mithilfe von

$$E = \frac{L}{2} I^2.$$

Dazu müssen wir allerdings E zunächst nach der Zeit ableiten. Dabei wenden wir die Kettenregel an:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{L}{2} \cdot 2I \frac{dI}{dt} = L \cdot I \cdot \frac{dI}{dt}.$$

Wir setzen ein und erhalten:

$$U \cdot I = L \cdot I \frac{dI}{dt},$$

und daraus

$$U = L \frac{dI}{dt}$$

Die rechte Seite können wir noch mithilfe von

$$n \cdot \Phi = L \cdot I$$

umformen und bekommen schließlich

$$U = n \frac{d\Phi}{dt}$$

Also: Die Spannung am Widerstand ist gleich n mal der Änderungsrate des magnetischen Flusses in der Spule. Wir werden später sehen, dass es sich hier um das wichtige Induktionsgesetz handelt.

Aufgaben

1. Messung der Induktivität einer Spule: Man baut sie in einen Stromkreis wie in Abb. 2.44 ein. Der Widerstand des Widerstandes beträgt 500 Ω. Man stellt fest, dass die Spannung in 4 ms auf ein Zehntel abklingt. Wie groß ist L?
2. Nach welcher Zeitfunktion klingt die Energie in der Spule ab?

2.16 Wie das magnetische Feld auf einen elektrischen Strom drückt

Wir wissen von früher: Bringt man an eine Stelle P, an der sich ein Feld (Feldstärke $\vec{H}$) befindet, einen Magnetpol, so wird er vom Feld in die Richtung des Vektors $\vec{H}$ gezogen.

Etwas ähnliches passiert, wenn man an die Stelle P statt des Magnetpols einen elektrischen Strom bringt, der im rechten Winkel zu den Feldlinien fließt. Wir

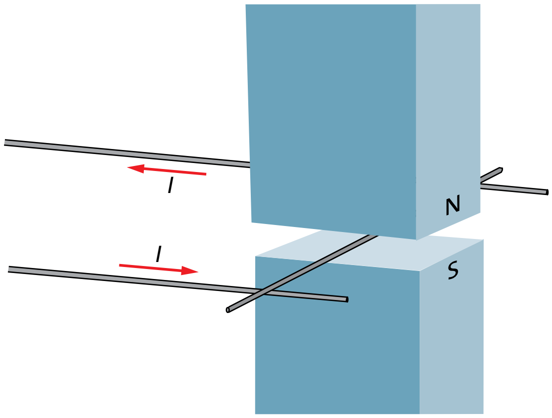


Abb. 2.47 Der bewegliche Leiter mit dem elektrischen Strom wird durch das magnetische Feld nach links geschoben.

legen einen elektrischen Leiter durch das nahezu homogene Feld zwischen den Polen eines Magneten, Abb. 2.47, und stellen fest: der Leiter wird vom Feld „zur Seite gedrückt".

Das Feldbild, Abb. 2.48, lässt den Grund dafür erkennen. Abb. 2.48a zeigt das Feld des Magneten allein. Teilbild b zeigt das Feld des elektrischen Stroms allein. Teilbild c zeigt das resultierende Feld. In Teilbild d sind außer den Feldlinien noch die Feldflächen eingezeichnet. Das resultierende Feld ist rechts vom Draht dichter als links. Der Druck (in Richtung der Feldflächen) ist daher auf der rechten Seite größer als auf der linken, sodass der Draht nach links gedrückt wird.

Die Herleitung der Formel für die entsprechende Impulsstromstärke ist etwas schwierig; wir übergehen sie hier. Das Ergebnis selbst ist aber wieder einfach. Für einen elektrischen Strom, der im rechten Winkel zum Feldvektor des Feldes ohne Strom fließt, gilt:

$$F = I \cdot \Delta s \cdot B$$

Hier ist I die elektrische Stromstärke, B der Betrag der magnetischen Flussdichte des Feldes ohne Strom und Δs die Länge desjenigen Leiterteiles, der sich im Bereich des Feldes des Magneten befindet. F ist der Betrag des Impulsstromstärkevektors. Dieser Vektor steht senkrecht auf der magnetischen Flussdichte (und Feldstärke) und senkrecht auf dem elektrischen Leiter.

Beachte, dass auch hier das ursprüngliche Feld durch den Leiter stark verändert wird. Trotzdem ist in die Formel die Flussdichte des ursprünglichen Feldes einzusetzen.

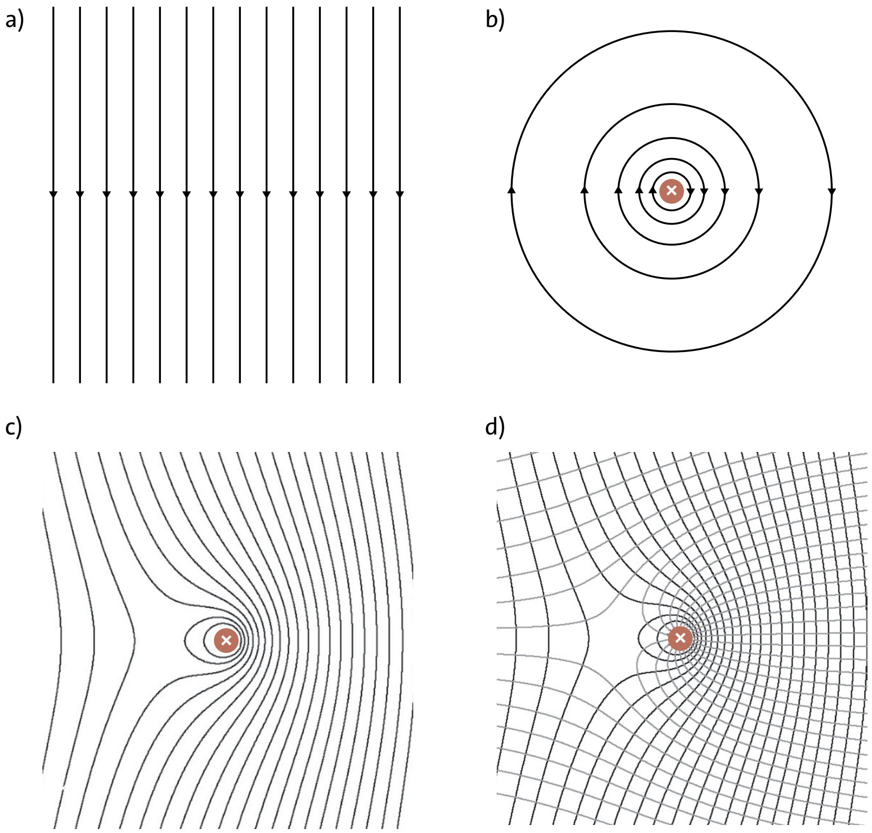


Abb. 2.48 (a) Homogenes Feld; (b) elektrischer Strom mit seinem Feld; (c) Gesamtfeld; (d) Gesamtfeld mit Feldflächen(d)

> Ein Leiter mit einem elektrischen Strom wird quer zur Richtung der Feldlinien des Feldes ohne den Leiter gedrückt.
>
> Der entsprechende Impulsstrom hat die Stärke
> $$F = I \cdot \Delta s \cdot B. \quad (2.6)$$

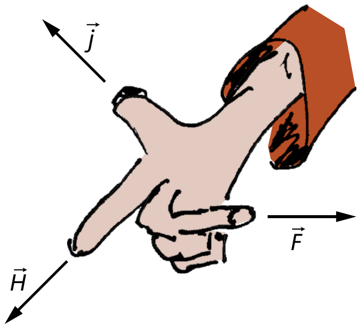


Abb. 2.49 Drei-Finger-Regel der rechten Hand

In diesem Gesetz treten drei verschiedene Richtungen auf:

1. Richtung des elektrischen Stroms (= Richtung des Stromdichtevektors $\vec{j}$)
2. Richtung des Flussdichtevektors $\vec{B}$ (= Richtung des Feldstärkevektors $\vec{H}$)
3. Richtung des Impulsstromvektors $\vec{F}$

Den Zusammenhang zwischen diesen Richtungen kann man sich mithilfe der *Drei-Finger-Regel* der rechten Hand merken, Abb. 2.49: Wenn der Daumen in die elektrische Stromrichtung weist und der Zeigefinger in die Feldstärkerichtung, dann zeigt der abgeknickte Mittelfinger die Richtung des Impulsstromvektors an. Aber wie soll man sich das merken? Der erste Finger (Daumen) steht für die „Ursache" (elektrischer Strom), der zweite Finger (Zeigefinger) für die „Vermittlung" (magnetisches Feld) und der dritte Finger (Mittelfinger) steht für die „Wirkung" (Impulsstrom), den Fingern entspricht also die Reihenfolge der Buchstaben U-V-W.

Kreisbahnen geladener Teilchen

Wir wenden Gleichung (2.6) auf einen Strahl von geladenen Teilchen an, etwa Elektronen, die durch ein magnetisches Feld fliegen, und zwar quer zur Feldrichtung. Wir betrachten einen Ausschnitt der Länge Δs aus dem Strahl, Abbildung 2.50.

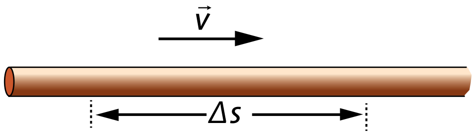


Abb. 2.50 Ausschnitt aus einem Strahl geladener Teilchen

Wir berechnen den Impulsstrom, der in dieses Teilchenpaket hineinfließt, als Funktion seiner Ladung und seiner Geschwindigkeit. Dazu drücken wir in Gleichung (2.6) die Stromstärke mithilfe von

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}.$$

aus. Hier ist ΔQ die Ladung des Teilchenpakets und Δt die Zeit, die diese Ladung braucht, um den Weg Δs zu durchlaufen. Außerdem ersetzen wir

$$\Delta s = v \cdot \Delta t,$$

wo v die Geschwindigkeit ist, mit der sich die Teilchen bewegen. Wir erhalten:

$$F = I \cdot \Delta s \cdot B = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot v \cdot \Delta t \cdot B = \Delta Q \cdot v \cdot B$$

Gewöhnlich hat man es mit Teilchen zu tun, die die Elementarladung e tragen. In diesem Fall können wir ΔQ durch e ersetzen.

> Geladene Teilchen, die sich in einem magnetischen Feld bewegen, bekommen über das Feld Querimpuls:
> $F = e \cdot v \cdot B$
> e = elektrische Ladung der Teilchen
> v = Geschwindigkeit der Teilchen

Wieder gilt für die Richtungen die Drei-Finger-Regel, wobei statt des Stromdichtevektors der Geschwindigkeitsvektor genommen werden muss.

In vektorieller Form lautet die Beziehung

$$\vec{F} = e \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

Diese Regel ist interessant. Wir stellen uns ein Teilchen vor, das sich in einem homogenen magnetischen Feld bewegt, und zwar im rechten Winkel zu den Feldlinien. Seine Bahn verläuft also auf einer Feldfläche. Das Teilchen bekommt nun über das Feld ständig Querimpuls: Die Richtung des Impulses, die es bekommt, ist in jedem Augenblick quer zu der des Impulses, den es gerade hat. Es wird also abgelenkt.

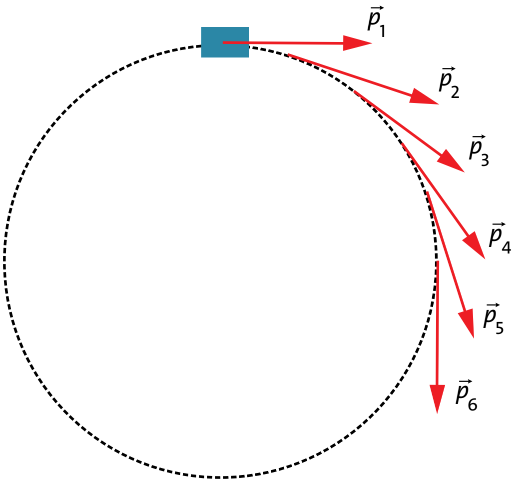


Abb. 2.51 Das Teilchen bekommt in jedem Augenblick neuen Impuls, dessen Richtung quer zur Richtung des Impulses ist, den es gerade hat. Das Bild zeigt die Impulsvektoren zu sechs verschiedenen Zeitpunkten.

Wir hatten früher gesehen, dass genau das zu einer Kreisbewegung führt, Abb. 2.51. Die Teilchen beschreiben also im homogenen magnetischen Feld eine Kreisbahn.

Die Änderungsrate des Impulses eines Körpers, der eine Kreisbewegung ausführt, hatten wir durch seine Geschwindigkeit v, seine Masse m und seinen Bahnradius r ausgedrückt:

$$\frac{dp}{dt} = m\frac{v^2}{r}$$

Weil die Impulsänderungsrate gleich der Impulsstromstärke ist, d.h.

$$\frac{dp}{dt} = F,$$

erhalten wir

$$m\frac{v^2}{r} = e \cdot v \cdot B.$$

Wir dividieren beide Seiten der Gleichung durch v und bringen r auf eine Seite.

> Teilchen im magnetischen Feld
> $$r = \frac{m \cdot v}{e \cdot B} \qquad (2.7)$$
> Der Bahnradius ist groß, wenn das Teilchen schwer und schnell ist, und er ist klein, wenn die Feldstärke groß ist.

Falls das magnetische Feld nicht homogen ist, stellt r den Krümmungsradius der Bahn in jedem Augenblick dar.

Die Gleichung sagt uns, dass man Teilchenstrahlen mithilfe magnetischer Felder „manipulieren" kann. So kann man insbesondere Elektronenstrahlen bündeln und ablenken, so wie man Lichtstrahlen mithilfe von Linsen bündelt und in Prismen ablenkt.

Angewendet wird dieses Verfahren in Elektronenmikroskopen, in Bildröhren und in Teilchenbeschleunigern.

e/*m*-Bestimmung

Gleichung (2.7) enthält zwei Größen, die das Teilchen charakterisieren: seine Masse m und seine elektrische Ladung e. Beide Werte sind sehr klein, und daher schwer zu messen. Die Gleichung ermöglicht es aber wenigstens, das Verhältnis von beiden zu messen.

Man erzeugt einen Elektronenstahl in einem homogenen magnetischen Feld. Die Bahn der Elektronen lässt sich leicht sichtbar machen. Aus Gleichung (2.7) folgt

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{r \cdot B}$$

Alle Größen auf der rechten Seite der Gleichung lassen sich leicht messen. Wenn man nun noch mit einer anderen Methode die Elementarladung misst, so kann man die Masse des Elektrons berechnen.

Zur Erinnerung:
$e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$
$m = 0{,}911 \cdot 10^{-30}\ \mathrm{kg}$

Geladene Teilchen folgen den magnetischen Feldlinien

Wir haben bisher angenommen, die Elektronen fliegen in einem homogenen Magnetfeld quer zu den Feldlinien. Was machen sie aber, wenn sie in eine andere Richtung starten? Stellen wir uns zunächst wieder ein homogenes Feld vor. Es soll einen großen Raumbereich ausfüllen; im Raum soll Vakuum herrschen, damit die Elektronen frei fliegen können. Wenn nun ein Elektron in irgendeine Richtung startet, so können wir seine Geschwindigkeit in zwei Komponenten zerlegen: eine quer zur Feldstärke und eine parallel zur Feldstärke. In anderen Worten: eine Komponente parallel zu einer Feldfläche und eine parallel zu einer Feldlinie. Um zu sehen, wie sich das Elektron bewegt, betrachten wir die beiden Beiträge einzeln. Zu der Geschwindigkeit quer zu den Feldlinien gehört eine Kreisbewegung; zu der Geschwindigkeit parallel zu den Feldlinien gehört eine normale geradlinige Bewegung. Wir haben also eine

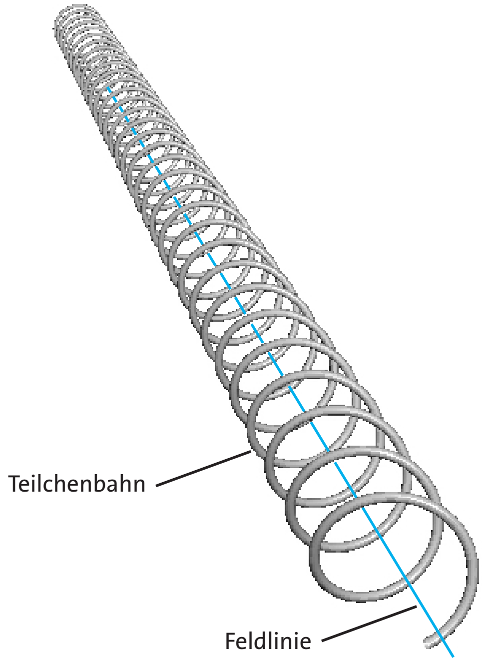


Abb. 2.52 Das Teilchen bewegt sich auf einer Schraubenbahn um eine Feldlinien herum.

Kreisbewegung und gleichzeitig eine normale Bewegung quer zu Kreis. Das Resultat ist eine Schraubenbewegung, Abb. 2.52.

Es gibt Situationen, in denen man die Bewegung so beschreiben kann: Die Elektronen folgen den magnetischen Feldlinien. Das ist besonders dann passend, wenn die Feldstärken sehr hoch sind. Das ist zum Beispiel der Fall in einem Fusions-Reaktor. Hier hat man magnetische Feldstärken von etwa $5 \cdot 10^6$ A/m. Die Teilchen sind Elektronen, Deuteronen und Tritonen. (Ein Deuteron besteht aus einem Proton und einem Neutron, ein Triton aus einem Proton und zwei Neutronen). Im Reaktor herrscht eine Temperatur von etwa 100 Millionen Kelvin. Das bedeutet, dass sich die Elektronen mit einer Geschwindigkeit von etwa $4 \cdot 10^7$ m/s bewegen. Wir wollen den Durchmesser ihrer Schraubenbahn berechnen:

$$r = \frac{m \cdot v}{e \cdot B} = \frac{10^{-30}\,\mathrm{kg} \cdot 4 \cdot 10^{7}\,\mathrm{m/s}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C} \cdot 5\ \mathrm{T}}$$
$$= 5 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{m}$$
$$= 50\ \mu\mathrm{m}$$

Die Schraube ist also sehr dünn im Vergleich zur Ausdehnung des ganzen Reaktors (einige Meter) und man kann mit gutem Recht sagen, die Elektronen folgen den Feldlinien.

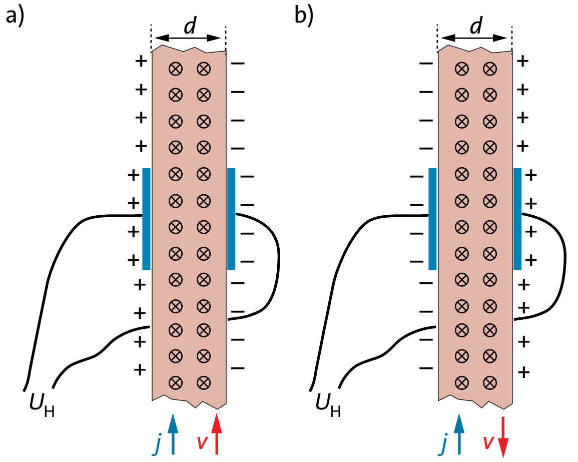


Abb. 2.53 Halleffekt. Richtung der magnetischen Feldstärke: in die Bildebene hinein.

Der Halleffekt

Man bringt einen flachen elektrischen Leiter, durch den ein elektrischer Strom fließt, in ein magnetisches Feld; die Feldstärkevektoren stehen senkrecht zur Leiterfläche und senkrecht zur Stromrichtung, Abb. 2.53.

Die Stromrichtung (Richtung des Stromdichtevektors) ist von untern nach oben. Wir nehmen zunächst an, wir hätten es mit positiven beweglichen Ladungsträgern zu tun, 2.53a. Ihre Bewegungsrichtung ist gleich der Stromrichtung. Das magnetische Feld drückt nun die Ladungsträger nach links (Drei-Finger-Regel der rechten Hand). Die positiven Ladungsträger sammeln sich auf der linken Seite an, dafür fehlen welche auf der rechten Seite, sodass diese sich negativ lädt. Damit ist ein elektrisches Feld entstanden, das die Ladungsträger nach rechts zieht. Kurz nach dem Einschalten des Strom stellt sich ein Zustand ein, in dem das magnetische Feld genau so stark nach links drückt, wie das elektrische nach rechts zieht, sodass sich die Ladungsträger geradeaus bewegen können. Das bedeutet, dass der Impulsstrom, der über das elektrische Feld kommt, nämlich

$$F_{el} = e \cdot E\,,$$

gleich dem Impulsstrom

$$F_{mag} = e \cdot v \cdot B$$

sein muss, der über das magnetische Feld kommt. Es ist also:

$$E = v \cdot B$$

Dieses Auftreten einer elektrischen Aufladung nennt man den *Halleffekt*.

Die elektrische Feldstärke E hängt mit der entstehenden Spannung U_H zwischen links und rechts zusammen über

$$U_H = E \cdot d\,.$$

Es ist also

Halleffekt $\qquad U_H = v \cdot B \cdot d \qquad$ (2.8)

U_H lässt sich leicht messen.

Für den Halleffekt gibt es die verschiedensten Anwendungen. Wir wollen zwei davon ansprechen.

Vorzeichen der Ladungsträger

Wir hatten gesehen: Wenn die beweglichen Ladungsträger positiv geladen sind, lädt sich in Abb. 2.53a die linke Seite positiv auf. Wir nehmen nun an, derselbe elektrische Strom komme durch negative Ladungsträger zu Stande, Abb. 2.53b. Damit die Stromrichtung dieselbe bleibt wie vorher, müssen die Ladungsträger in der Abbildung von oben nach unten fließen. In Bezug auf ihre Bewegungsrichtung werden sie nun nach rechts abgelenkt, d.h. von uns aus gesehen nach links. (Wir müssen in der Drei-Finger-Regel die Ablenkungsrichtung umkehren, weil die Teilchen negativ geladen sind.) Die (von uns aus) linke Seite lädt sich also negativ auf, die rechte positiv. Wir können damit an der Aufladung erkennen, welches Vorzeichen die Ladungsträger haben.

Für die meisten Metalle sind die beweglichen Ladungsträger Elektronen, d.h. negative Teilchen. Für einige Metalle und für viele Halbleiter, sind die beweglichen Ladungsträger positive Teilchen, so genannte Löcher. Man kann sich ein Loch vorstellen als ein fehlendes Elektron in einem großen „Elektronensee", ähnlich wie man sich ein Bläschen im Mineralwasser als fehlendes Wasser vorstellen kann. Das Bläschen verhält sich wie ein Körper mit negativer Masse (es steigt ja nach oben, statt hinunter zu fallen). Entsprechend verhält sich ein Loch im Elektronensee eines elektrischen Leiters wie ein Teilchen mit positiver elektrischer Ladung.

Der Hallsensor

Man kann die Anordnung der Abb. 2.53 benutzen, um die magnetische Flussdichte oder Feldstärke zu messen. Man nennt sie dann einen Hallsensor. Wenn man durch den Sensor einen elektrischen Strom konstanter Stärke hindurch schickt, so ist die Spannung U_H proportional zur magnetischen Flussdichte bzw. Feldstärke. Wenn man U_H misst, misst man also gleichzeitig die magnetische Feldstärke. Die meisten Magnetfeldmessgeräte nutzen diesen Effekt aus. Da ein Hallsensor sehr billig und robust ist, verwendet man ihn auch als Sensor für irgendeine Position, etwa im Auto: Sind die Türen verschlossen? Ist der Sicherheitsgurt angelegt? Wie schnell dreht sich die Kurbelwelle? Immer ist irgendwo ein kleiner Magnet befestigt, und der Hallsensor stellt fest, ob sich der Magnet an der gewünschten Stelle befindet.

Aufgaben

1. Ein gerader Draht, in dem ein elektrischer Strom von 200 A fließt, verläuft senkrecht zu den Feldlinien des Magnetfeldes der Erde (Feldstärke 40 A/m). Welcher Impulsstrom fließt in ein Stück des Drahtes von 1 m Länge hinein?
2. Ein Elektronenstrahl tritt aus dem feldfreien Raum in ein homogenes magnetisches Feld mit $H = 2\,400$ A/m ein, Abb. 2.54. Welche kinetische Energie (in eV) müssen die Elektronen haben, damit sie das Feldgebiet im rechten Winkel zur Einfallsrichtung (in der Abbildung nach unten) wieder verlassen?
3. Zwei kleine Materialproben werden so mit Kontakten versehen, dass man einen elektrischen Strom in Längsrichtung hindurch schicken und quer dazu die Hallspannung U_H messen kann. Beide Proben sind 5 mm breit (Abstand der Kontakte zwischen denen die Hallspannung gemessen wird). Man bringt sie in ein magnetisches Feld der Flussdichte 0,2 T und lässt einen elektrischen Strom von 200 mA fließen. Man misst an der einen eine Hallspannung von 0,12 mV, an der anderen 0,36 μV. Wie groß ist die Geschwindigkeit der Ladungsträgen in den beiden Fällen? Was könnte die Ursache für den großen Unterschied sein?
4. Eine Salzwasserlösung wird mit 1,1 m/s durch ein 2 cm dickes Glasrohr gepumpt. An einer Stelle läuft das Rohr durch ein magnetisches Feld von 3 T, quer zur Richtung der Feldstärkevektoren. Wie groß ist die Hallspannung? Wie wirkt es sich auf die Hallspannung aus, dass das Wasser gleich viele positive wie negative Ionen enthält?

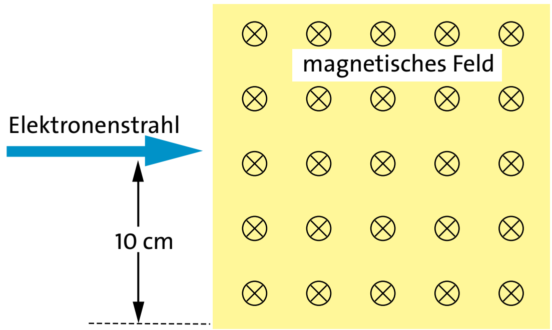


Abb. 2.54 Zu Aufgabe 2

3 DAS ZUSAMMENSPIEL VON ELEKTRISCHEN UND MAGNETISCHEN FELDERN

3.1 Analogie in der Elektrodynamik

Wir haben viel über zwei Erscheinungsbereiche der Natur gelernt: zuerst über elektrische, dann über magnetische. Sicher hast du bemerkt, dass es Ähnlichkeiten zwischen beiden gibt. Man sagt, es bestehe eine *Analogie*. Die beiden Bereiche haben die gleiche begriffliche und mathematische Struktur.

Tabelle 3.1 enthält in zwei Spalten Elemente, die sich entsprechen: Namen von Begriffen, physikalische Größen und Formeln. Die Tabelle enthält auch einige

elektrisches Feld	**magnetisches Feld**
elektrische Ladung Q	magnetische Ladung Q_m
elektrisches Potenzial φ	magnetisches Potenzial φ_m
elektrisch geladenes Teilchen (Elektron, Proton,..)	magnetisch geladene Teilchen gibt es nicht.
elektrischer Strom; Stromstärke I	magnetische Ströme gibt es nicht.
Polarisation $\vec{P}$	Magnetisierung $\vec{M}$
elektrische Feldstärke $\vec{E}$	magnetische Feldstärke $\vec{H}$
$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$	$\vec{F} = Q_\mathrm{m} \cdot \vec{H}$
kugelsymmetrische Ladungsverteilung $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}$	kugelsymmetrische Ladungsverteilung $H = \frac{1}{4\pi\mu_0}\frac{Q_\mathrm{m}}{r^2}$
Im Innern eines elektrischen Leiters ist $\vec{E} = 0$	Im Innern eines weichmagnetischen Materials ist $\vec{H} = 0$
mechanische Spannung $\sigma_\parallel = -\frac{\varepsilon_0}{2}\left\|\vec{E}\right\|^2 \quad \sigma_\perp = \frac{\varepsilon_0}{2}\left\|\vec{E}\right\|^2$	mechanische Spannung $\sigma_\parallel = -\frac{\mu_0}{2}\left\|\vec{H}\right\|^2 \quad \sigma_\perp = \frac{\mu_0}{2}\left\|\vec{H}\right\|^2$
Energiedichte $\rho_E = \frac{\varepsilon_0}{2}\left\|\vec{E}\right\|^2$	Energiedichte $\rho_E = \frac{\mu_0}{2}\left\|\vec{H}\right\|^2$
Kondensator	**Spule**
$Q = C \cdot U$ Kapazität C $\quad C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$	$\Phi = (1/n) \cdot L \cdot I$ Induktivität L $\quad L = \mu_0 n^2 \frac{A}{l}$
Energie $E = \frac{C}{2}U^2$	Energie $E = \frac{L}{2}I^2$
Abklingen der elektrischen Spannung $U = U_0 e^{-t/\tau} \quad \tau = RC$	Abklingen der elektrischen Stromstärke: $I = I_0 e^{-t/\tau} \quad \tau = \frac{L}{R}$

Tab. 3.1 Analogie zwischen elektrischen und magnetischen Erscheinungen

Elektrizität	Magnetismus	Gravitation
elektrische Ladung Q	magnetische Ladung Q_m	Masse m
elektrisches Potenzial φ	magnetisches Potenzial φ_m	Gravitationspotenzial ψ_m
elektrische Feldstärke $\vec{E}$	magnetische Feldstärke $\vec{H}$	Gravitationsfeldstärke $\vec{g}$
$\vec{F} = Q \cdot E$	$\vec{F} = Q_\mathrm{m} \cdot \vec{H}$	$\vec{F} = m \cdot \vec{g}$
kugelsymmetrische Ladungsverteilung $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}$	kugelsymmetrische Ladungsverteilung $H = \frac{1}{4\pi\mu_0}\frac{Q_\mathrm{m}}{r^2}$	kugelsymmetrische Massenverteilung $g = G\frac{m}{r^2}$

Tab. 3.2 Analogie zwischen Elektrizität, Magnetismus und Gravitation

Dinge, die in der anderen Spalte keine Entsprechung haben. Schließlich enthält sie auch –grau unterlegt– Einträge, die wir bisher nicht angesprochen hatten: Sie waren in unserem Zusammenhang nicht wichtig.

Obwohl es im Augenblick nicht unser Thema ist, wollen wir bei dieser Gelegenheit noch an eine weitere Analogie erinnern. Man kann zu den beiden Bereichen noch einen dritten hinzunehmen: die Gravitation, Tabelle 3.2. Hier geht die Analogie nicht so weit – aus einem einfachen Grund: Während sowohl die elektrische als auch die magnetische Ladung positiv und negativ sein kann, gibt es nur positive Massen. So gibt es zu einigen Effekten der Elektrizität und des Magnetismus kein Gravitationsanalogon. Dass am Ende die Gravitation doch die reichhaltigere Physik darstellt, versteht man erst, wenn man die schwierige Allgemeine Relativitätstheorie kennt.

Eine wichtige Erscheinung haben wir nicht in die Tabelle eingetragen: Ein elektrischer Strom ist die Ursache für ein magnetisches Feld. Dieses Phänomen zeigt, dass Elektrizität und Magnetismus nicht nur analog aufgebaut sind, sondern dass sie eng miteinander zusammenhängen. Wenn wir unsere Analogie anwenden, könnten wir die folgende Erwartung formulieren:

So wie ein elektrischer Strom ein magnetisches Feld erzeugt, könnte vielleicht ein magnetischer Strom ein elektrisches Feld erzeugen.

Nun wissen wir aber, das es keine magnetischen Ströme gibt. Also gibt es auch keine Umkehrung dieses Satzes? Wir werden in diesem Kapitel sehen, dass es diese Umkehrung gibt.

3.2 Die Induktion

An eine Spule wird ein Voltmeter angeschlossen. Bewegt man einen Pol eines Dauermagneten in die Spule hinein, Abb. 3.1, so schlägt das Voltmeter aus – allerdings nur so lange, wie sich der Magnetpol bewegt. Entfernt man den Magnetpol wieder aus der Spule, so schlägt das Messinstrument noch einmal aus, diesmal in die entgegengesetzte Richtung.

Die Richtung des Ausschlags hängt auch davon ab, ob man den Nord- oder den Südpol in die Spule bewegt.

Wir untersuchen, was passiert, wenn man die Spule bei dem Experiment überbrückt und schließen statt des Voltmeters ein Amperemeter an. Auch das Amperemeter schlägt beim Hineinbewegen des Magnetpols

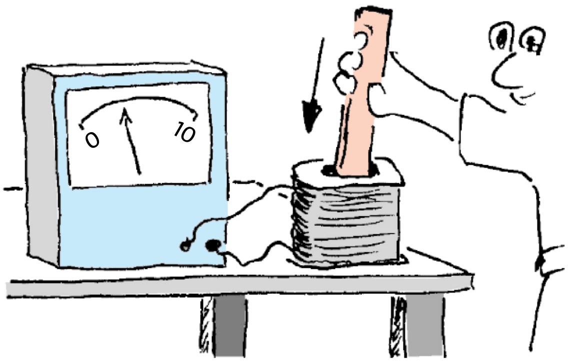


Abb. 3.1 Das Voltmeter schlägt aus, so lange sich der Dauermagnet bewegt.

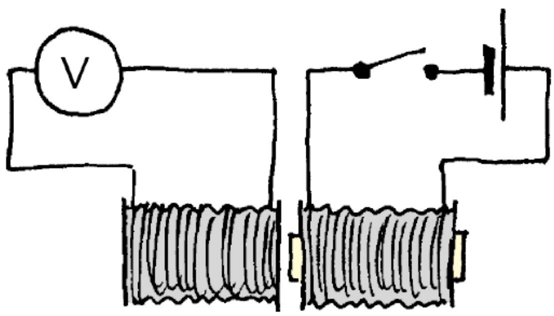


Abb. 3.2 Schaltet man den Elektromagneten ein oder aus, so ändert sich die magnetische Feldstärke in der Spule, und es wird eine Spannung induziert.

aus und beim Herausbewegen wieder (wie du es wahrscheinlich nicht anders erwartet hast).

Man nennt diese Vorgänge *Induktion*. Man sagt, beim Bewegen des Magneten werde eine elektrische Spannung oder ein elektrischer Strom induziert.

Man kann eine Spannung (oder einen Strom) noch auf eine andere Art induzieren, und zwar ohne dass sich irgendetwas bewegt: indem man neben die Spule einen Elektromagneten stellt, so dass dessen Feld in die Spule hineinreicht, Abb. 3.2. Schaltet man den Elektromagneten ein oder aus, so wird wieder eine Spannung induziert.

> Ändert sich die magnetische Feldstärke in einer Spule, so entsteht zwischen den Anschlüssen der Spule eine elektrische Spannung. Bei geschlossenem Stromkreis fließt ein elektrischer Strom. Man nennt diesen Vorgang Induktion.

Wir führen schließlich noch eine andere Variante des Induktionsexperiments aus. Wir schieben in die Spule einen Weicheisenkern hinein und verlängern die Enden des Kerns so, dass der ganze Kern ein „U" bildet. In die Spule kann nun kein magnetisches Feld mehr eindringen. Gibt es jetzt auch keine Induktion mehr? Wir nähern den Enden des Weicheisenkerns einen Dauermagneten, Abb. 3.3, bis die Pole des Magneten diese Enden berühren und beobachten, dass das Voltmeter ausschlägt. Wie ist das möglich? Das Eisen in der Spule ist magnetisiert worden, seine Magnetisierung hat sich geändert.

> Auch wenn sich die Magnetisierung des Materials in der Spule ändert, wird eine Spannung induziert.

Wir hatten gesehen, dass man aus magnetischer Feldstärke $\vec{H}$ und Magnetisierung $\vec{M}$ eine einzige Größe machen kann, die magnetische Flussdichte $\vec{B}$:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{M} + \vec{H})$$

Wir können daher unsere bisherigen Beobachtungen so zusammenfassen:

> Ändert sich die magnetische Flussdichte in einer Spule, so entsteht zwischen den Anschlüssen der Spule eine elektrische Spannung.

Wir untersuchen nun, wovon der Wert der induzierten Spannung abhängt. Dazu wählen wir eine besonders einfache Anordnung: Eine kleine flache Spule wird in das homogene Feld einer großen, langen Spule

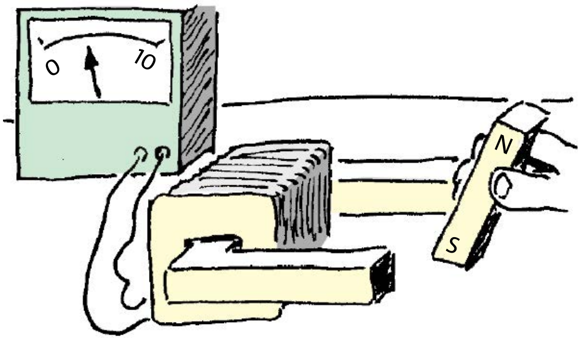


Abb. 3.3 Auch die Änderung der Magnetisierung im Innern der Spule verursacht eine Induktionsspannung.

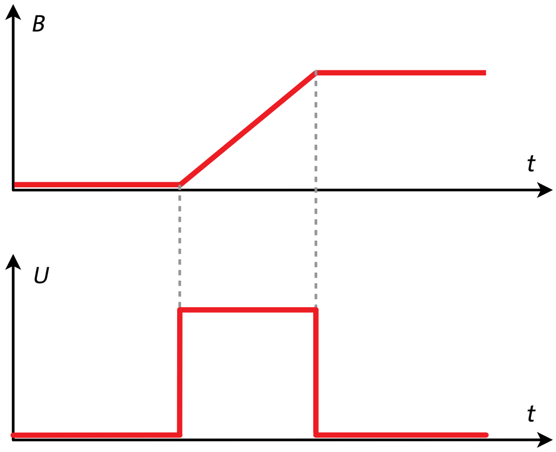


Abb. 3.4 Ändert sich die Flussdichte linear mit der Zeit, so ist die induzierte Spannung zeitlich konstant.

gebracht. An die kleine Spule wird ein Voltmeter angeschlossen. Ändert man die elektrische Stromstärke in der großen Spule, so ändert sich die magnetische Feldstärke, und zwischen den Anschlüssen der kleinen wird eine Spannung induziert.

Wir schließen nun die große Spule an ein Netzgerät, das einen Strom liefert, der linear mit der Zeit wächst. Dadurch erhält man ein magnetisches Feld, dessen Flussdichte linear mit der Zeit wächst, Abb. 3.4.

Das geht natürlich nur für eine begrenzte Zeit, aber doch lange genug für unsere Beobachtung. Man stellt fest, dass die an der kleinen Spule induzierte Spannung zeitlich konstant ist. Also:

$$\text{Wenn } \frac{dB}{dt} = \text{const gilt, so ist } U = \text{const.}$$

Ändert man die Flussdichte schneller, d.h. wird dB/dt größer, so wird auch die induzierte Spannung größer. Genauer: Wenn man dB/dt verdoppelt, so wird auch die induzierte Spannung doppelt so groß. U ist also zu

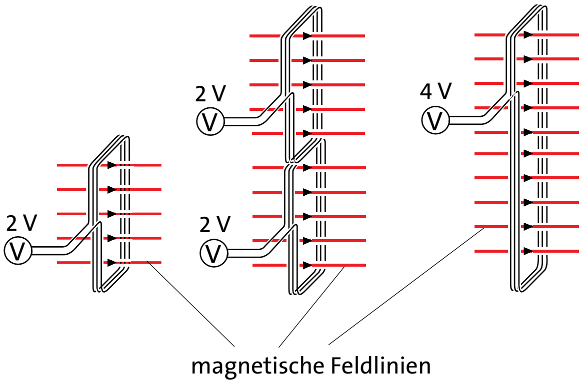


Abb. 3.5 Die Flussdichte wächst mit der Zeit. Bei doppelter Spulenfläche wird auch die doppelte Spannung induziert.

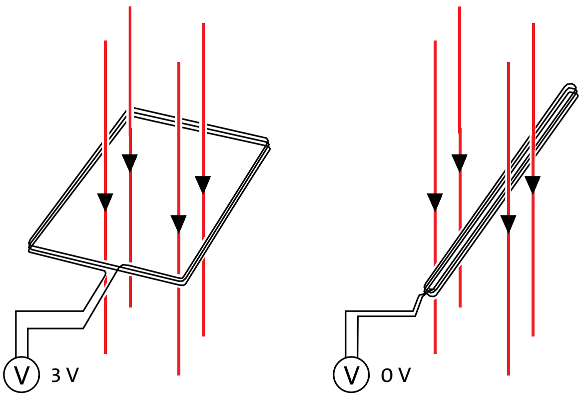


Abb. 3.6 Die Flussdichte ist zeitlich konstant. Die Spule wird so verformt, dass sich die Fläche, durch die Feldlinien hindurchtreten, verkleinert. Auch bei diesem Vorgang wird eine Spannung induziert.

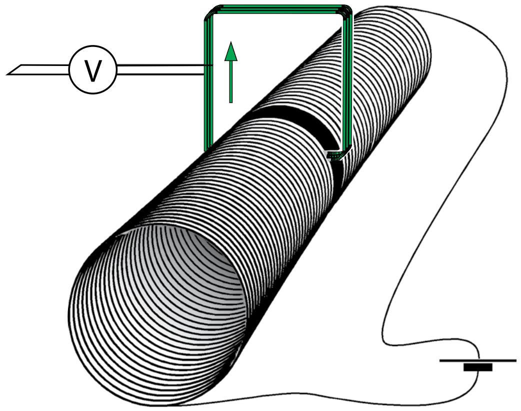


Abb. 3.7 Wenn man die kleine, quadratische Spule aus der großen herauszieht, vermindert sich die Fläche, durch die Feldlinien hindurchtreten.

dB/dt proportional:

$$U \sim \frac{dB}{dt}. \qquad (3.1)$$

Wir untersuchen nun noch eine andere Art, wie man die Induktionsspannung beeinflussen kann.

Ersetzt man die kleine Spule durch eine andere, die sich von der ersten nur in der Querschnittsfläche A unterscheidet (die Zahl der Windungen soll dieselbe bleiben), so stellt man fest, dass die induzierte Spannung proportional zu dieser Fläche ist:"

$$U \sim A \qquad (3.2)$$

Dieses Ergebnis hätte man voraussehen können. Eine Spule mit der doppelten Fläche ist gleichwertig zu zwei Spulen, die nebeneinander liegen und in Reihe miteinander verbunden sind, Abb. 3.5.

Ersetzt man schließlich die Spule durch eine andere, die sich von der ersten nur in der Windungszahl unterscheidet, so findet man, dass die induzierte Spannung proportional zur Windungszahl n ist:

$$U \sim n \qquad (3.3)$$

Auch dieses Ergebnis ist nicht überraschend: Eine Spule mit der Windungszahl $2n$ ist gleichwertig zu zwei in Reihe angeschlossenen Spulen, die je eine Windungszahl n haben.

Die Ergebnisse (3.1), (3.2) und (3.3) lassen sich zusammenfassen zu einer einzigen Beziehung:

$$U \sim nA\frac{dB}{dt}. \qquad (3.4)$$

Man darf nun das Proportionalzeichen durch ein Gleichheitszeichen ersetzen, denn die Flussdichte ist so definiert worden, dass in Gleichung (3.4) kein weiterer Faktor auftritt. Es ist also:

$$U = nA\,\frac{dB}{dt}. \qquad (3.5)$$

Gleichung (3.5) ist fast schon unser Endergebnis. Wir hatten früher das Produkt $A \cdot B$ abgekürzt:

$$A \cdot B = \Phi$$

Φ ist der magnetische Fluss. Damit bekommen wir aus Gleichung (3.5) das *Induktionsgesetz*:

$$U = n\frac{d\Phi}{dt} \qquad \text{Induktionsgesetz} \qquad (3.6)$$

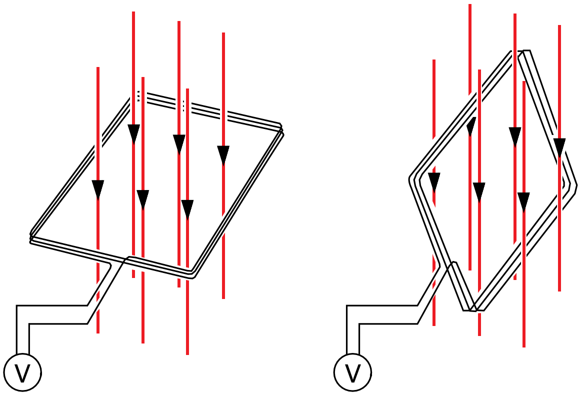


Abb. 3.8 Auch durch Verdrehen der Spule verändert man den magnetischen Fluss, der durch sie hindurchgeht.

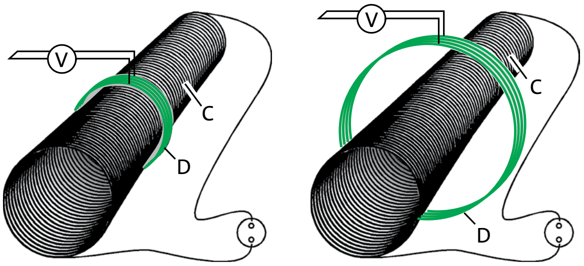


Abb. 3.9 Die induzierte Spannung ist links und rechts gleich, denn der sich ändernde Fluss durch D ist beide Male gleich.

Es enthält in dieser Formulierung allerdings mehr, als wir ursprünglich hineingesteckt haben. Um eine Spannung zu induzieren, haben wir den magnetischen Fluss $\Phi = A \cdot B$ geändert, und um den Fluss zu ändern, haben wir die Flussdichte B geändert. Wenn Gleichung (3.6) richtig ist, müsste aber auch dann eine Induktionsspannung entstehen, wenn man B konstant lässt und dafür die Fläche A ändert. Abbildung 3.6 zeigt eine Methode, wie man es anstellen kann.

Es geht aber auch noch einfacher: Man bewegt die Spule aus dem konstanten Magnetfeld heraus, Abb. 3.7. Die Fläche, durch die Feldlinien hindurchlaufen, wird kleiner, und damit auch der magnetische Fluss. Es wird wieder eine Spannung induziert. Ebenso natürlich, wenn man die Spule wieder ins Feld hinein bewegt.

Eine besonders praktische Art, den magnetischen Fluss zu verändern, zeigt Abb. 3.8: Die Spule wird gedreht. Auch hierbei verändert sich der Fluss, und es entsteht eine Induktionsspannung. In dieser Form macht man sich die Induktion im Generator zunutze.

Eine interessante Variante eines Induktionsexperiments zeigt Abb. 3.9. Man ändert die elektrische Stromstärke, und damit auch die Flussdichte in Spule C. Spule D, zwischen deren Anschlüssen eine Spannung induziert wird, befindet sich völlig außerhalb von C. Die Querschnittsfläche ist im linken Experiment kleiner als im rechten. Der Wert der induzierten Spannung hängt jetzt aber nicht mehr vom Flächeninhalt von D ab, denn der magnetische Fluss ist auf die Querschnittsfläche von C beschränkt und befindet sich daher in beiden Experimenten ganz und gar innerhalb der Querschnittsfläche von D.

Aufgaben

1. Die Flussdichte eines homogenen magnetischen Feldes ändert sich innerhalb von 2 Sekunden gleichmäßig von 0 T auf 0,3 T. In dem Feld befindet sich eine flache Spule mit 200 Windungen. Die Spulenfläche liegt parallel zu den Feldflächen des magnetischen Feldes, der Flächeninhalt beträgt 8 cm^2. Wie groß ist die Spannung, die zwischen den Spulenanschlüssen entsteht?
2. Die Flussdichte eines homogenen magnetischen Feldes ändert sich mit der Zeit, und zwar so, wie es Abb. 3.10 zeigt. Im Feld befindet sich ein geschlossener Metallring. Die Ringfläche liegt quer zu den Feldlinien. Zeichne qualitativ den zeitlichen Verlauf des elektrischen Stroms im Ring in das I-t-Diagramm ein.
3. Im Innern einer großen, 0,5 m langen Spule mit 2000 Windungen befindet sich eine kleine, flache Spule mit n = 500 und A = 15 cm^2. Beide Spulen sind gleich orientiert.
(a) Berechne die magnetische Feldstärke in der großen Spule wenn ein elektrischer Strom von 10 A fließt.
(b) Berechne daraus die magnetische Flussdichte.
(c) In welcher Zeit muss die elektrische Stromstärke in der großen Spule von 0 A auf 10 A zunehmen, damit in der kleinen eine Spannung von 100 V induziert wird?
4. In einer langen, dünnen Spule, Querschnittsfläche 2 cm^2, nimmt die Flussdichte mit 0,2 T/s zu, Abb. 3.11. Die Spule ist von einem Ring aus einem schlecht leitenden Material umgeben. Der Widerstand des Rings beträgt 200 Ω. Wie groß ist die Stromstärke des im Ring induzierten Stroms?

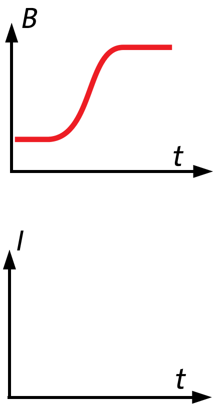


Abb. 3.10 Zu Aufgabe 2

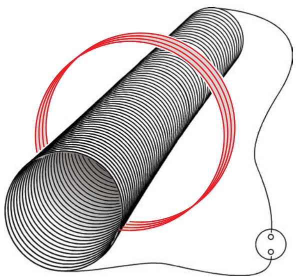


Abb. 3.11 Zu Aufgabe 4

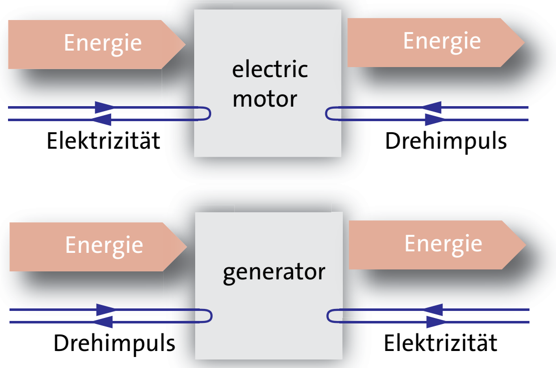


Abb. 3.12 Flussbilder von Elektromotor und Generator

3.3 Der Generator

Ein Generator ist eine Maschine, die sich in jedem Kraftwerk befindet. Er tut gerade das Umgekehrte von dem, was ein Elektromotor tut. Während ein Elektromotor Energie mit dem Energieträger Elektrizität bekommt und mit dem Träger Drehimpuls abgibt, Abb. 3.12a, bekommt der Generator die Energie mit dem Energieträger Drehimpuls und gibt sie mit der Elektrizität wieder ab, Abb. 3.12b.

Kleine Generatoren werden oft anders bezeichnet: Beim Fahrrad heißen sie Dynamo, beim Auto Lichtmaschine.

Der Aufbau eines Generators unterscheidet sich im Prinzip nicht von dem eines Elektromotors. Manche Elektromotoren kann man sogar direkt als Generator betreiben. Man braucht dazu nur die elektrische Energiequelle durch einen elektrischen Energieempfänger, z.B. eine Glühlampe zu ersetzen. Dreht man nun an der Welle, so leuchtet die Lampe.

Um die Funktionsweise zu verstehen, betrachten wir eine besonders einfache Version des Generators: Eine rechteckige, flache Spule wird im homogenen Feld eines Dauermagneten gedreht, Abb. 3.13. Dabei ändert sich ständig der magnetische Fluss durch die Spule. Wir wollen berechnen, wie er sich ändert, d.h. wie die Funktion $\Phi(t)$ aussieht. Daraus können wir dann, mithilfe des Induktionsgesetzes, die induzierte Spannung als Funktion der Zeit bestimmen.

Abb. 3.14 zeigt die Anordnung im Querschnitt. Die eine Seitenlänge der Spule sei l, die andere b. Die Spulenfläche A_0 ist also

$$A_0 = l \cdot b$$

In Abb. 3.14 ist nur b zu sehe

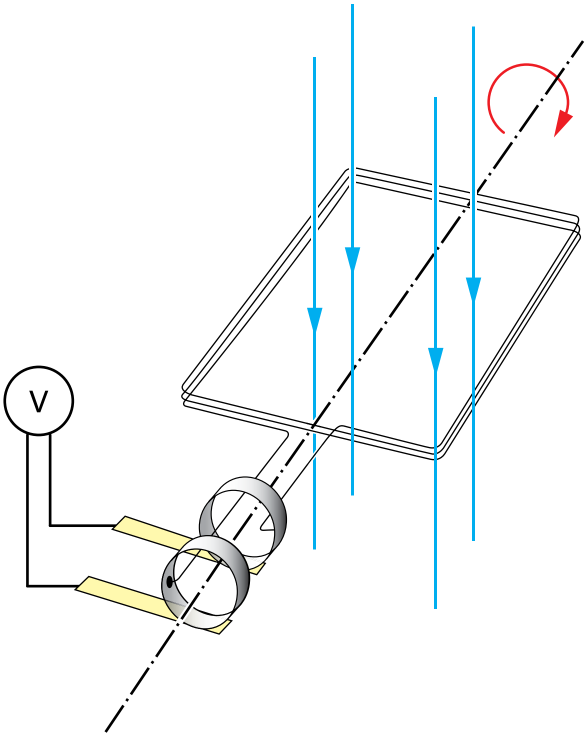


Abb. 3.13 Einfacher Generator: Eine rechteckige, flache Spule wird in einem homogenen magnetischen Feld gedreht. Der magnetische Fluss durch die Spule ändert sich dabei periodisch.

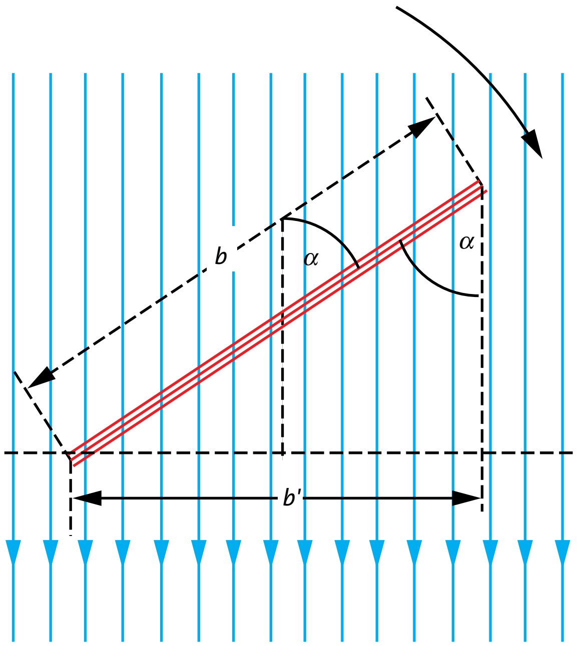


Abb. 3.14 Querschnitt durch die Anordnung von Abb. 3.13. Der magnetische Fluss durch die Spule berechnet sich aus der Projektion der Spulenfläche auf eine Ebene senkrecht zu den Feldlinien.

Die Spule wird mit der Winkelgeschwindigkeit

$$\omega = \frac{\alpha}{t}.$$

gedreht. Der Winkel α muss im Bogenmaß angegeben werden, d.h. der Wert des vollen Kreiswinkels ist 2π. Die Winkelgeschwindigkeit ist zeitlich konstant. Daher nimmt α linear mit der Zeit zu:

$$\alpha = \omega \cdot t \qquad (3.7)$$

Um den magnetischen Fluss

$$\Phi = B \cdot A$$

zu berechnen, dürfen wir hier nicht die Fläche A_0 der Spule einsetzen. Die Fläche, die von magnetischem Fluss durchstoßen wird, ist nur die Projektion dieser Fläche auf eine Ebene quer zu den Feldlinien des magnetischen Feldes. Und diese Projektion ändert sich im Laufe der Zeit. Sie hat ihr Maximum, wenn die Spule senkrecht zu den Feldlinien steht. Sie ist null, wenn die Spule parallel zu den Feldlinien steht.

Aus Abb. 3.14 geht hervor, wie man diese Fläche berechnet. Mit

$$\sin\alpha = \frac{b'}{b}$$

wird

$$A = l \cdot b' = l \cdot b \cdot \sin\alpha = A_0 \cdot \sin\alpha .$$

Mit Gleichung (3.7) wird daher

$$A(t) = A_0 \cdot \sin(\omega t)$$

Daraus folgt der magnetische Fluss als Funktion der Zeit:

$$\Phi(t) = B \cdot A_0 \cdot \sin(\omega t) \qquad (3.8)$$

Der magnetische Fluss durch die Spule ändert sich also mit der Zeit gemäß einer Sinusfunktion. Um die induzierte Spannung zu berechnen, setzen wir Gleichung (3.8) in das Induktionsgesetz ein:

$$U(t) = n \cdot \frac{d\Phi}{dt} = n \cdot B \cdot A_0 \cdot \frac{d(\sin(\omega t))}{dt}.$$

Mit

$$\frac{d(\sin(\omega t))}{dt} = \omega \cdot \cos(\omega t)$$

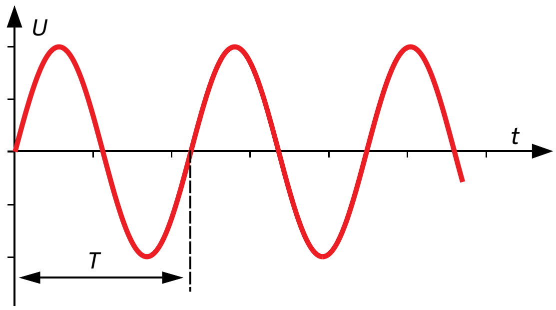


Abb. 3.15 Zeitlicher Verlauf der Spannung, die der Generator von Abb. 3.13 erzeugt.

ergibt sich daraus

$$U(t) = n \cdot B \cdot A_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)$$

Wir fassen die Konstanten vor der Cosinusfunktion zusammen:

$$U_0 = n \cdot B \cdot A_0 \cdot \omega$$

und erhalten für die induzierte Spannung:

$$U(t) = U_0 \cdot \cos(\omega t)$$

Bei unserer Rechnung ist eine Cosinusfunktion herausgekommen. Durch verschieben des Zeitnullpunkts kann man daraus aber auch eine Sinusfunktion machen. Wir hätten dann

$$U(t) = U_0 \cdot \sin(\omega t)$$

Der Verlauf der Spannung mit der Zeit ist in Abbildung 3.15 dargestellt.

Richtige, technische Generatoren sind komplizierter gebaut als der, den wir gerade betrachtet haben. Das physikalische Prinzip, nach dem sie arbeiten, ist aber dasselbe wie bei unserem Rechteckspulengenerator. Und der Grund dafür, dass sie eine Sinusspannung erzeugen, ist auch derselbe.

Aufgaben

1. Erfinde einen Generator, der eine Spannung erzeugt, deren Vorzeichen nicht wechselt.
2. Bleibt die Sinus-Spannung eine Sinus-Spannung, wenn die rotierende Spule nicht rechteckig, sondern kreisförmig ist?
3. Bleibt die Sinus-Spannung eine Sinus-Spannung, wenn das magnetische Feld nicht homogen ist?

3.4 Wechselspannung und Wechselstrom

Eine Spannung, die eine sinusförmige Zeitabhängigkeit hat, nennt man eine *Wechselspannung*. Legt man eine Wechselspannung an einen Widerstand, so fließt ein *Wechselstrom*.

Mit

$$U = R \cdot I$$

wird

$$I(t) = \frac{U_0 \cdot \sin(\omega t)}{R} = I_0 \cdot \sin(\omega t).$$

Wir haben hier U_0/R durch I_0 abgekürzt. Den Vorfaktor vor der Sinus- (oder der Cosinus-) Funktion nennt man *Amplitude*. U_0 ist also die Amplitude der Spannung, I_0 die der Stromstärke.

In Abb. 3.15 ist auch die Periodendauer T eingezeichnet. Es ist diejenige Dauer, in der eine volle Sinusschwingung durchlaufen wird. Für $t = 0$ hat die Sinusfunktion einen Nulldurchgang, bei $t = T$, hat sie, nachdem sie eine volle Schwingung durchlaufen hat, wieder einen. Die Periodendauer ist also der zeitliche Abstand zwischen zwei benachbarten, zueinander äquivalenten Zeitpunkten. Bei $t = T$ ist das Argument der Sinusfunktion gleich 2π. Es gilt also

$$\omega T = 2\pi$$

oder

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \qquad (3.9)$$

Die Frequenz f, die ein Maß für die Zahl der Schwingungen pro Zeitdauer ist, hängt mit der Periodendauer zusammen gemäß

$$f = \frac{1}{T}. \qquad (3.10)$$

Gleichungen (3.9) und (3.10) kann man kombinieren zu

$$\omega = 2\pi f.$$

Der Faktor ω im Argument der Sinusfunktion ist also bis auf einen Faktor 2π gleich der Frequenz. Da er in der Physik sehr oft vorkommt, gibt man ihm einen eigenen Namen: *Kreisfrequenz*.

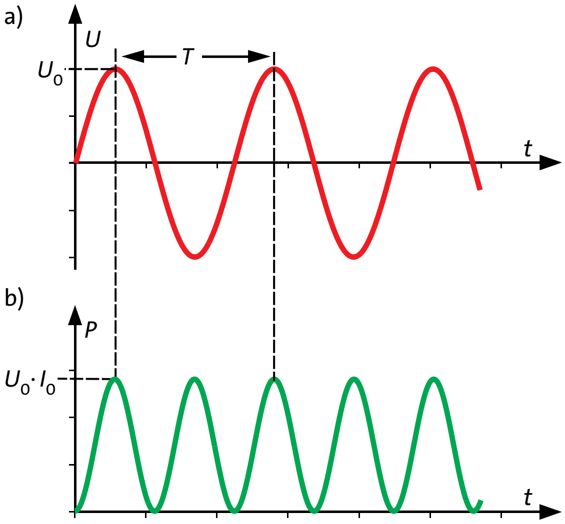


Abb. 3.16 (a) Wechselspannung, die an einem Widerstand liegt, (b) Energiestrom, der zum Widerstand fließt; beide als Funktion der Zeit

Hier noch einige Daten zur Wechselspannung der Steckdose. Du weißt, dass die Frequenz 50 Hertz beträgt:

$$f = 50 \text{ Hz}$$

Die Wechselspannung durchläuft also in jeder Sekunde 50 volle Schwingungen.

Einer der beiden Kontakte der Steckdose ist geerdet, sein Potenzial φ_1 beträgt 0 V. Man nennt die entsprechende Leitung den *Nullleiter*. Damit folgt

$$U = \varphi_2 - \varphi_1 = \varphi_2 - 0 \text{ V} = \varphi_2 .$$

Der Spannungswert ist also gleich dem Potenzialwert desjenigen Steckdosenkontakts, der nicht geerdet ist.

Die Spannung der Steckdose beträgt bekanntlich 230 Volt. So sagt man wenigstens. Was bedeuten aber diese 230 Volt? Die Spannung ändert sich doch ständig. Um zu verstehen, was es mit dieser Angabe auf sich hat, betrachten wir einen elektrischen Widerstand – also einen Energieverbraucher –, der an eine Wechselspannungsquelle angeschlossen ist. Der Energiestrom, der zum Widerstand fließt, ist

$$P = U(t) \cdot I(t) = U_0 \cdot \sin(\omega t) \cdot I_0 \cdot \sin(\omega t)$$
$$U_0 \cdot I_0 \cdot \sin^2(\omega t)$$

Auch der Energiestrom ändert sich also mit der Zeit. Der Verlauf von $P(t)$ ist in Abb. 3.16b dargestellt. Abb. 3.16a zeigt noch einmal die Spannung. Die Funktion

$P(t)$ hat im Wesentlichen denselben Verlauf wie die Sinusfunktion der Spannung, nur schwingt sie
- zwischen 0 und +1, statt zwischen −1 und +1;
- doppelt so schnell.

(Im Mathematikunterricht lernt man die Beziehung

$$\sin^2 \alpha = \frac{1-\cos(2\alpha)}{2}.$$

kennen.)

Dass der Energiestrom $P(t)$ immer positiv bleibt, ist physikalisch leicht zu verstehen: Er fließt immer zum Widerstand hin, egal ob der elektrische Strom in die eine oder in die andere Richtung fließt.

Wir interessieren uns nun für den zeitlichen Mittelwert $\overline{P}$ der Energiestromstärke. Abb. 3.16 zeigt, dass

$$\overline{P} = \frac{U_0 \cdot I_0}{2}.$$

ist. Wir definieren nun die *Effektivspannung*:

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}};$$

außerdem die *Effektivstromstärke*:

$$I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{eff}}}{R} = \frac{U_0}{R \cdot \sqrt{2}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}.$$

und drücken die mittlere Energiestromstärke durch U_{eff} und I_{eff} aus:

$$\overline{P} = \frac{U_0 \cdot I_0}{2} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_0}{\sqrt{2}} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}.$$

Wenn man U_{eff} mit I_{eff} multipliziert, erhält man also die mittlere Energiestromstärke. Das heißt, man kann mit U_{eff} und I_{eff} so umgehen, wie mit einer Gleichspannung und einem Gleichstrom, denn für diese gilt ja auch:

$$\overline{P} = P = U \cdot I$$

Zurück zur Steckdose: Die 230 Volt der Steckdose sind die Effektivspannung. Auch das, was ein Voltmeter anzeigt, wenn man eine Wechselspannung misst, ist die Effektivspannung, und ein Amperemeter zeigt die effektive Stromstärke an.

Du hast gesehen, wie die Wechselspannung zustande kommt. Man könnte denken, dass eine solche Spannung unpraktisch ist, und dass es besser wäre, sie gleich nach dem Generator gleichzurichten, oder von vornherein einen Gleichstromgenerator einzusetzen. Tatsächlich gibt es etwas kompliziertere Generatoren, die eine Gleichspannung liefern.

Dass man das nicht tut, hängt damit zusammen, dass Wechselspannungen gegenüber Gleichspannungen einen entscheidenden Vorteil haben: Man kann sie auf bequeme Art vergrößern und verkleinern. Hierzu benutzt man einen Transformator.

Aufgaben

1. Welchen Wert hat die Amplitude der Wechselspannung der Steckdose?
2. Begründe anhand von Abb. 3.16, dass der Mittelwert von P gleich $U_0 \cdot I_0/2$ ist.
3. Jemand meint, der Mittelwert der Energiestromstärke P sei gleich dem Produkt aus dem Mittelwert der Spannung U und dem Mittelwert der elektrischen Stromstärke I. Ist das richtig?

3.5 Der Transformator

Fernseher, Computer und alle anderen elektronischen Geräte brauchen zum Betrieb eine viel kleinere Spannung als die 230 Volt der Steckdose. Will man diese Geräte ans Netz anschließen, so muss die Spannung von 230 Volt auf einen kleineren Wert „heruntertransformiert" werden. Zu diesem Zweck setzt man zwischen Gerät und Steckdose einen Transformator.

Will man Energie elektrisch über große Entfernungen transportieren, so ist es zweckmäßig, eine hohe Spannung zu verwenden. Die Energieverluste beim Transport sind geringer, als wenn man eine niedrige Spannung verwendet. Man setzt daher unmittelbar hinter den Generator einen Transformator, der die Spannung hinauftransformiert. Die Energie wird dann mit einer Hochspannungsleitung über eine große Entfernung transportiert. Am Bestimmungsort wird die Spannung mit einem weiteren Transformator wieder heruntertransformiert.

Selbstverständlich soll im Transformator keine Energie verloren gehen, und das erreicht man auch nahezu.

Es ist also

$$P_1 = P_2.$$

Der Index 1 bezieht sich auf den Eingang, der Index 2 auf den Ausgang des Transformators. Mit

$$P = U \cdot I$$

folgt

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2. \tag{3.11}$$

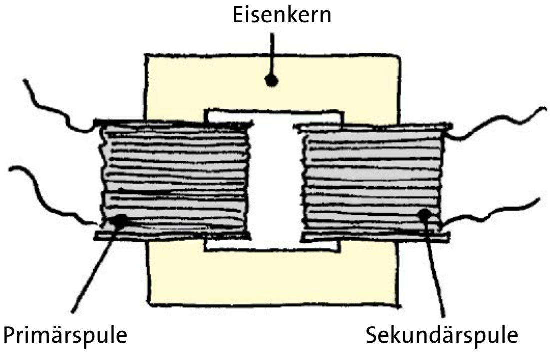


Abb. 3.17 Ein Transformator besteht aus einem Weicheisenkern, auf den zwei Spulen gewickelt sind.

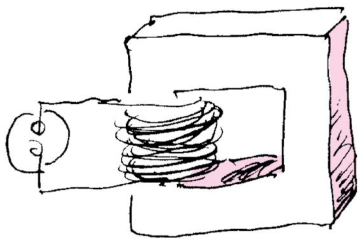


Abb. 3.18 Transformator ohne Sekundärspule. Fließt in der (Primär-)Spule ein Wechselstrom, so ändert sich die Magnetisierung im Eisenkern sinusartig.

Wenn der Transformator die Spannung um einen bestimmten Faktor hinaufsetzt, so wird die Stromstärke um denselben Faktor vermindert. Wird die Spannung verzehnfacht, so nimmt die elektrische Stromstärke auf ein Zehntel ab, so dass der Energiestrom gleich bleibt.

Wie funktioniert ein Transformator? Die Erscheinung, die man sich zu Nutze macht, ist auch hier die Induktion.

Ein Transformator besteht aus einem Eisenkern mit zwei Spulen, Abb. 3.17. Die Anschlüsse der *Primärspule* bilden den Eingang für die Energie, die der *Sekundärspule* den Ausgang.

Wir betrachten zunächst einen Transformator, dem die Sekundärspule fehlt, Abb. 3.18. Dieses Gebilde kann man auch als Elektromagnet auffassen, bei dem man vergessen hat, den Eisenkern mit einem Spalt zu versehen, vergleiche mit Abb. 2.42.

Verbindet man die noch vorhandene Primärspule mit einer Wechselspannungsquelle, so fließt in der Spule ein Wechselstrom. Dieser hat zur Folge, dass der Eisenkern magnetisiert wird. Dabei folgt die Magnetisierung dem elektrischen Strom: Sie wechselt periodisch ihre Richtung. Wir nehmen nun die Sekundärspule wieder hinzu. Solange in der Primärspule ein Wechselstrom fließt, findet im Innern der Sekundärspule eine ständige Änderung der Magnetisierung, und damit der magnetischen Flussdichte statt, was zur Folge hat, dass zwischen den Anschlüssen der Sekundärspule eine Spannung entsteht. Wenn an der Primärspule eine Sinusspannung liegt, so hat auch die an der Sekundärspule induzierte Spannung einen sinusförmigen Zeitverlauf.

Wie schafft man es nun, eine Spannung mithilfe eines Transformators hinunter- oder hinaufzusetzen? Die Höhe der induzierten Spannung hängt von der Zahl der Windungen der beiden Spulen ab. Wir wollen untersuchen, in welcher Weise.

Wir bauen dazu Transformatoren zusammen aus Spulen mit verschiedenen Windungszahlen. Man stellt zunächst fest, dass, wenn die Windungszahlen von Primär- und Sekundärspule gleich sind, auch Primär- und Sekundärspannung übereinstimmen. Hat die Sekundärspule doppelt so viele Windungen wie die Primärspule, so ist auch die Sekundärspannung doppelt so hoch wie die Primärspannung. Allgemein gilt:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_2}{n_1} \, .$$

Mit Gleichung (3.11) erhält man daraus

$$n \cdot I_1 = n_2 \cdot I_2 \, .$$

Aufgaben

1. Die beiden Spulen eines Transformators haben 1000 bzw. 5 000 Windungen. Es steht eine Wechselspannung von 230 V zur Verfügung. Welche Spannungen kann man mit dem Transformator herstellen?
2. Die Primärspule eines Transformators ist an die Steckdose angeschlossen. An der Sekundärspule wird eine Spannung von 11,5 V gemessen. Was kann man über die Windungszahlen der Spulen des Transformators sagen? Im Sekundärstromkreis fließt ein elektrischer Strom von 2 A. Wie stark ist der Strom im Primärkreis?
3. Ein Transformator hat eine Primärspule mit 1 000 Windungen und eine Sekundärspule mit 10 000 Windungen. Die Primärspule wird an die Steckdose angeschlossen. Es fließt ein Primärstrom von 100 mA. Wie groß sind Sekundärspannung und Sekundärstromstärke?
4. Durch den Transformator in Abb. 3.19 fließt ein Energiestrom von 100 kW. Welche Anforderungen sind an die Zuleitungen, welche an die Wegleitungen zu stellen?

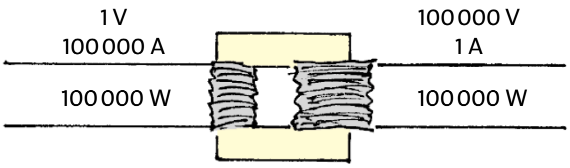


Abb. 3.19 Zu Aufgabe 4

Aufgaben (Fortsetzung)

5. Ein Kraftwerk liefert einen Energiestrom von 60 MW. Hiermit soll ein Industriegebiet versorgt werden. Die Leitung hat einen Gesamtwiderstand (Hin- und Rückleitung) von 0,1 Ω. Betrachte zwei Fälle: Die Spannung, die zur Übertragung verwendet wird, beträgt (1) 3 000 V oder (2) 300 000 V. (a) Wie ist die elektrische Stromstärke in den beiden Fällen. (b) Welche Spannung entsteht zwischen Anfang und Ende der Leitungen? (c) Welche Spannung bleibt für den Verbraucher übrig? (d) Wie groß ist der Energieverlust?

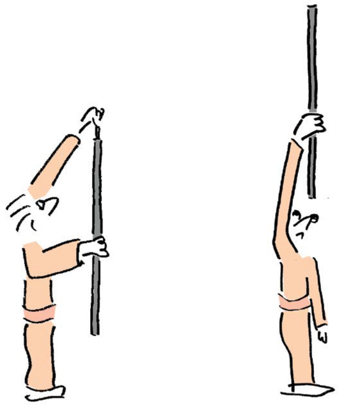


Abb. 3.20 Links: Willy lässt einen Magneten in ein offenes Kupferrohr hineinfallen; rechts: Es dauert eine Weile bis der Magnet unten wieder herauskommt.

3.6 Ein etwas merkwürdiger Generator – „magnetische Ströme“

Man braucht ein Kupferrohr und einen starken Stabmagneten, dessen Außendurchmesser etwas kleiner ist als der Innendurchmesser des Rohres.

Wir halten das Rohr senkrecht und lassen kleine Gegenstände hindurchfallen. So sieht man, dass das Rohr nicht verstopft ist. Wir stecken dann den Magneten in die obere Rohröffnung hinein, Abb. 3.20. Erstaunlicherweise fällt er nicht einfach durch das Rohr hindurch. Er taucht zwar schließlich am unteren Rohrende auf, hat sich aber für die Bewegung viel Zeit genommen.

Während die nichtmagnetischen Gegenstände mit hoher Geschwindigkeit herauskommen, also viel Energie haben (aus dem Gravitationsfeld), hat der Magnet fast keine kinetische Energie. Warum fällt er so langsam? Wo ist die Energie geblieben, die er eigentlich haben sollte?

Während er sich nach unten bewegt, haben wir im Material des Rohres ein sich änderndes magnetisches Feld. Es wird daher im Kupfer ein elektrischer Strom induziert. Die entsprechenden Stromlinien sind Kreise um die Rohrachse. Der Strom fließt nur dort wo sich das magnetische Feld ändert, d.h. in der Nähe der Pole. Es gibt also einen elektrischen Strom in der Nähe des einen Pols und einen in der Nähe des anderen.

Der Strom in der Nähe des positiven Magnetpols (des Nordpols) fließt in eine Richtung, der in der Nähe des negativen Pols in die andere. Für die Richtung dieser Strom gilt eine einfache Regel, Abb. 3.21: Wenn der Daumen der linken Hand in die Bewegungsrichtung des positiven Pols weist, so zeigen die gekrümmten Finger die Richtung des induzierten elektrischen Stroms an. Achtung! Es ist kein Druckfehler: Es ist wirklich die linke Hand, die man nehmen muss.

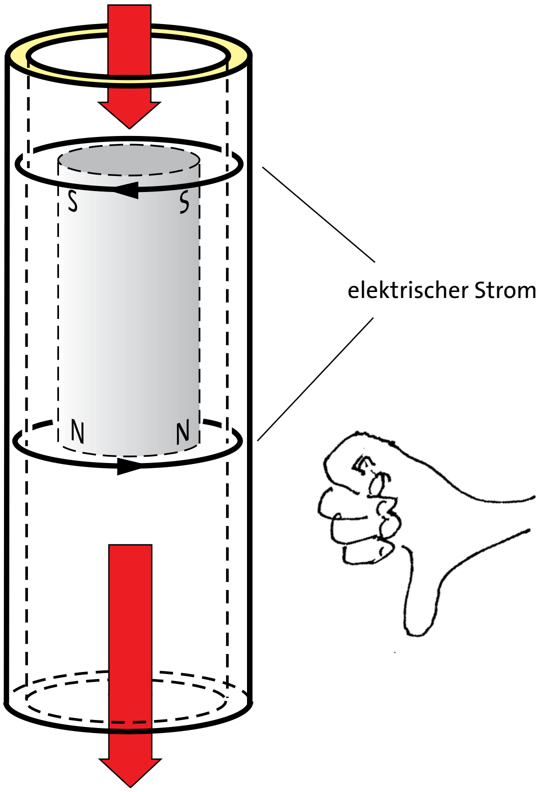


Abb. 3.21 Der Daumen der linken Hand weist in die Bewegungsrichtung des positiven Magnetpols (die Richtung des „magnetischen Stroms“), die gekrümmten Finger zeigen die Richtung des induzierten Stroms an.

Wir können diese Regel noch etwas umformulieren. Man kann sie sich dann leichter merken.

Wenn im Kupferrohr ein Strom fließt, so muss sich dort ein elektrisches Feld befinden. Wir erinnern uns: Es gilt

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}.$$

Es fließt nur dann ein elektrischer Strom wenn die elektrische Feldstärke von null verschieden ist. Das elektrische Feld stellt einen Antrieb für den elektrischen Strom dar.

Wir können also auch sagen:

> Ein sich änderndes magnetisches Feld erzeugt ein elektrisches Feld.

Dieser Satz ist nichts anderes als eine neue Formulierung des Induktionsgesetzes.

Und schließlich noch eine dritte Art, den Sachverhalt zu beschreiben: Es bewegt sich magnetische Ladung von oben nach unten. So wie wir bewegte elektrische Ladung als elektrischen Strom bezeichnen, können wir die bewegte magnetische Ladung als magnetischen Strom interpretieren. Damit können wir die Regel auch so formulieren:

> Jeder magnetische Strom ist von einem elektrischen Feld umgeben. Die Feldlinien umschlingen den Strom. Zeigt der Daumen der *linken* Hand in die Richtung des magnetischen Stroms, so weisen die gekrümmten Finger in die Richtung der elektrischen Feldstärke.

Normalerweise spricht man nicht von magnetischen Strömen; man sagt sogar, es gebe gar keine magnetischen Ströme. Als Begründung führt man an, dass es keine magnetisch geladenen Teilchen gibt. Diese Aussage kann man allerdings etwas abschwächen. Wir sehen an unserem Beispiel: Es gibt hier für kurze Zeit einen magnetischen Strom. Kurz darauf kommt aber gleich ein magnetischer Strom der entgegengesetzten Richtung: Der negative Magnetpol, der sich nach unten bewegt ist gleichwertig zu einem positiven Strom nach oben. Wir können also auch sagen: nach jedem magnetischen Strom kommt ein anderer der entgegengesetzten Richtung. Das bedeutet, dass es zwar keine magnetischen Gleichströme geben kann, wohl aber magnetische Wechselströme.

Material	Übergangstemperatur
Zn	0,875 K
Al	1,2 K
Pb	7,2 K
Nb_3Sn	18 K
Nb_3Ge	22,3 K
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	110 K
$YBa_2Cu_3O_7$	92 K

Tab. 3.3

3.7 Supraleiter

Es gibt eine Reihe von Stoffen, die ihren elektrischen Widerstand verlieren, wenn man sie unter eine bestimmte Temperatur abkühlt, Tabelle 3.3. Man nennt diese Stoffe, wenn sie sich im widerstandslosen Zustand befinden, *Supraleiter*. Die Übergangstemperatur vom normalen in den supraleitenden Zustand liegt bei manchen dieser Stoffe relativ hoch: bei etwa –180 °C. Man kann solche Stoffe recht leicht in den supraleitenden Zustand bringen, indem man sie mit flüssigem Stickstoff kühlt.

Supraleiter sind aber nicht nur deshalb interessant, weil sie keinen elektrischen Widerstand haben. Sie haben außerdem überraschende magnetische Eigenschaften.

Wir bauen eine Anordnung aus Dauermagneten auf, so dass das Feld über ihnen in der Mitte eine Delle hat, Abb. 3.22.

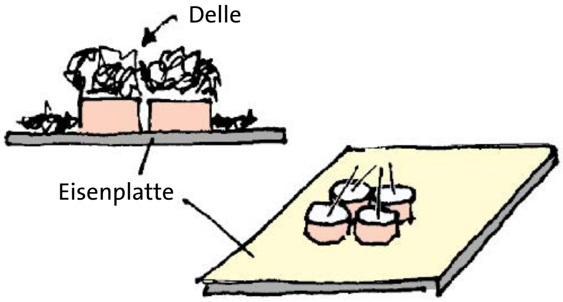


Abb. 3.22 Das magnetische Feld hat oben eine Delle.

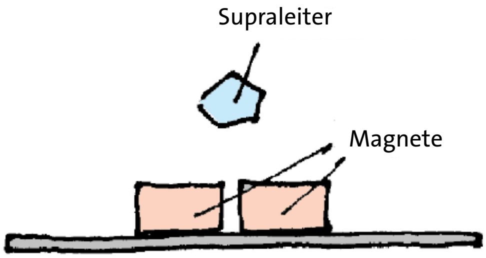


Abb. 3.23 Der Supraleiter wird durch das magnetische Feld in der Schwebe gehalten.

Wir nähern dem Magneten von oben her ein kleines Stück supraleitenden Materials und lassen es los. Der Supraleiter fällt nicht hinab, sondern er schwebt über den Magneten, Abb. 3.23. Man kann ihn drehen, oder auch etwas zur Seite stoßen: Er bleibt in der Schwebe (natürlich nur so lange bis er sich aufwärmt und in den normalen Zustand zurückkehrt).

Der Supraleiter wird offensichtlich von den Magneten abgestoßen. Er verhält sich damit gerade umgekehrt wie ein Stück Weicheisen, das ja stets angezogen wird. Wie lässt sich das erklären? Sobald der Supraleiter in die Nähe eines Magneten kommt, beginnen Ströme in ihm zu fließen, und diese sind so gerichtet, dass sich Abstoßung ergibt. In einem normal leitenden (also nicht supraleitenden) Körper würden diese induzierten Ströme gleich wieder aufhören zu fließen, sie würden durch den Widerstand des Materials abgebremst. Beim Supraleiter fließen die einmal „angeworfenen" Ströme aber weiter, denn einen Widerstand, der diese Ströme bremsen könnte, gibt es ja nicht.

Eine genauere Untersuchung, die wir hier aber nicht durchführen können, zeigt außerdem

- dass die Ströme nur ganz dicht unter der Oberfläche des Supraleiters fließen;
- dass das magnetische Feld nicht in den Supraleiter eindringt;
- dass die Feldflächen von außen senkrecht in den Supraleiter einmünden.

> Bringt man einen Supraleiter in ein magnetisches Feld, so beginnen an seiner Oberfläche elektrische Ströme zu fließen. Das Feld wird aus seinem Innern verdrängt. Die Feldflächen münden senkrecht auf die Oberfläche ein, und sie enden an der Oberfläche.

Kommen dir diese Aussagen bekannt vor? Blättere zurück zu Abschnitt 2.6. Supraleiter haben Eigenschaften, die denen von weichmagnetischen Stoffe sehr ähnlich sind. Wie die weichmagnetischen Stoffe, so lassen auch Supraleiter das magnetische Feld nicht in sich herein. Sie erreichen das aber durch einen anderen „Trick" als die Weichmagneten: nicht durch das Ausbilden von magnetischen Polen, sondern durch das Anwerfen von elektrischen Strömen.

Abb. 3.24 zeigt die Felder von zwei miteinander verwandten Anordnungen:

- im oberen Teilbild einem Magnetpol, der sich in geringem Abstand über der ebenen Oberfläche eines weichmagnetischen Körpers befindet; (der zweite Magnetpol ist so weit entfernt, dass er uns nicht stört);

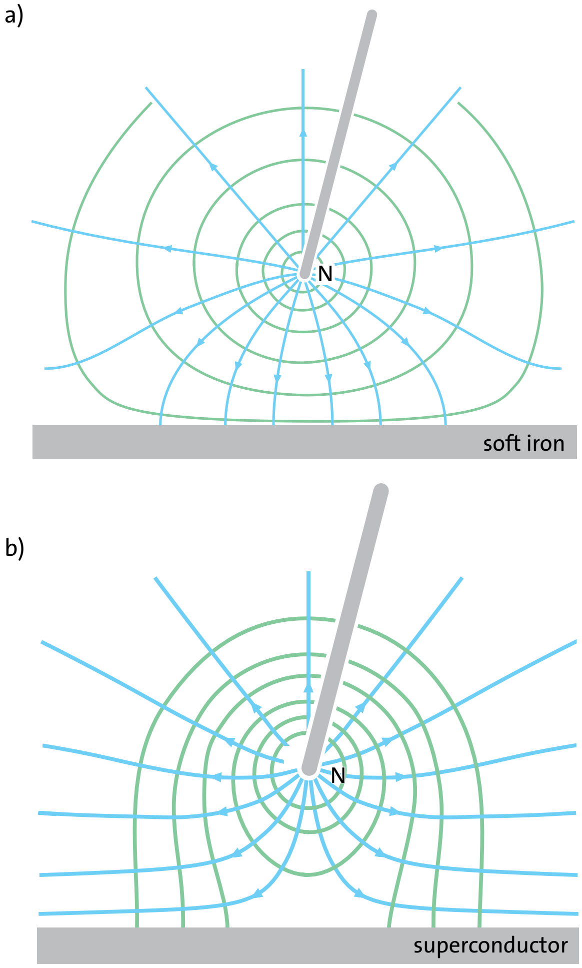


Abb. 3.24 (a) Einzelner Magnetpol über einem Körper aus Weicheisen. An der Oberfläche des Weicheisens ist ein weiterer Magnetpol entstanden. (b) Einzelner Magnetpol über einem Supraleiter. An der Oberfläche des Supraleiters sind ringförmige elektrische Ströme entstanden.

- im unteren Teilbild einem Magnetpol über einem supraleitendem Körper.

An der Oberfläche des Weicheisens hat sich magnetische Ladung angesammelt. Die Ladungsverteilung ist drehsymmetrisch. Das Symmetriezentrum und das Maximum der Ladungsverteilung befinden sich senkrecht unter dem Magnetpol. Die Feldlinien des Feldes enden an den magnetischen Ladungen, und zwar so, dass sie senkrecht auf der Oberfläche stehen. Der Magnetpol zieht also an dem Weicheisenstück.

An der Oberfläche des Supraleiters sind ringförmige Ströme entstanden. Das Zentrum der Ringe befindet sich unter dem Magnetpol. Die Feldflächen des Feldes enden auf diesen Strömen, und zwar so, dass sie

weichmagnetisches Material	supraleitendes Material
verdrängt das magnetische Feld aus seinem Innern	verdrängt das magnetische Feld aus seinem Innern
bildet an seiner Oberfläche magnetische Pole (magnetische Influenz)	bildet an seiner Oberfläche elektrische Ströme
Die magnetischen Feldlinien enden an den Polen.	Die magnetischen Feldflächen enden an den Strömen.
Die magnetischen Feldlinien münden senkrecht in die Oberfläche ein.	Die magnetischen Feldflächen münden senkrecht in die Oberfläche ein.
Das magnetische Feld zieht an der Oberfläche.	Das magnetische Feld drückt auf die Oberfläche.

Tab. 3.4 Analogie zwischen weichmagnetischem und supraleitendem Material

senkrecht auf der Oberfläche stehen. Das magnetische Feld drückt also auf den Supraleiter.

> Das magnetische Feld drückt auf die Oberfläche des Supraleiters.

In Tabelle 3.4 sind die beiden Materialien noch einmal gegenüber gestellt.

Aufgaben

1. Ein zylinderförmiger Stabmagnet befindet sich in einem langen supraleitenden Rohr, Abb. 3.25a. Zeichne die magnetischen Feldlinien ein. In Abb. 3.25b passt der Magnet gerade in das Rohr hinein. Wie verlaufen die magnetischen Feldlinien hier? Was für elektrische Ströme fließen im Rohr?
2. Willy, Abb. 3.20, möchte den Stabmagneten durch ein supraleitendes Rohr fallen lassen. Was passiert?

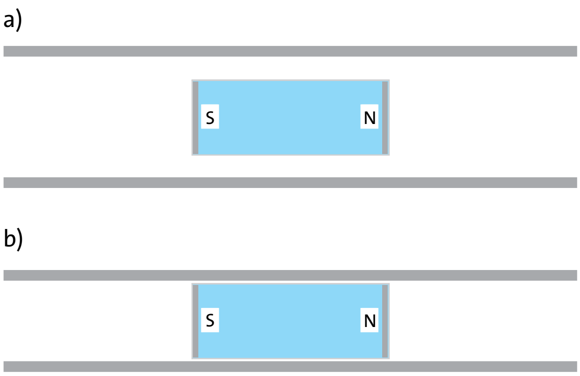


Abb. 3.25 Zu Aufgabe 1

3.8 Induzierte elektrische Felder – das Zusammenspiel von elektrischen und magnetischen Feldern

Wir kommen noch einmal auf die Grundlagen der Induktion zurück und betrachten den in Abb. 3.26 dargestellten Induktionsvorgang: Das sich ändernde magnetische Feld verursacht in dem ringförmigen, geschlossenen Leiter einen elektrischen Strom.

Ein elektrischer Strom kommt dadurch zustande, dass ein elektrisches Feld an den Ladungsträgern in Richtung des Leiters zieht. Wenn das bei einem Induktionsstrom auch zutrifft, so müsste in dem Leiter ein elektrisches Feld entstanden sein. Wir ziehen die Schlussfolgerung:

> Durch Änderung der Feldstärke eines magnetischen Feldes wird in dessen Umgebung ein elektrisches Feld erzeugt.

Dieser Satz gilt nun aber nicht nur in dem Fall, dass man einen elektrischen Leiter in das magnetische Feld bringt. Er gilt auch dann, wenn der Leiter nicht vorhanden ist. Immer, wenn sich ein magnetisches Feld ändert, entsteht ein elektrisches Feld.

Es ist im Allgemeinen eine komplizierte Aufgabe, die Verteilung der elektrischen Feldstärke eines solchen Feldes zu berechnen. Bei bestimmten einfachen Magnetfeldänderungen entsteht aber auch ein einfaches elektrisches Feld. Abb. 3.27 zeigt einen Elektromagneten, dessen Stromstärke zunimmt, so dass auch die Flussdichte zunimmt und ein elektrisches Feld induziert wird. Dargestellt sind die Flussdichtelinien und die Feldlinien des induzierten elektrischen Feldes.

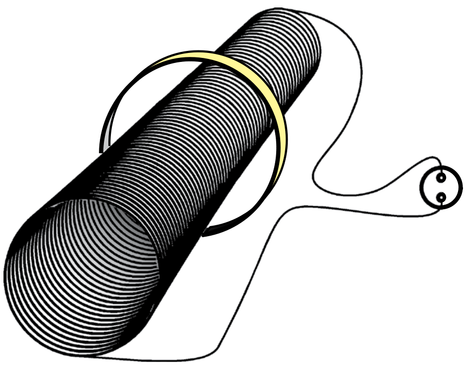


Abb. 3.26 Das sich ändernde magnetische Feld verursacht in dem ringförmigen elektrischen Leiter einen elektrischen Strom.

Die Feldlinien des elektrischen Feldes umschlingen die Flussdichtelinien.

Du hast dich inzwischen an die Analogie gewöhnt, die zwischen elektrischem und magnetischem Feld besteht. Es wird dich daher nicht wundern, dass auch der Satz, mit dem wir es gerade zu tun hatten, ein Analogon hat:

> Durch Änderung der Feldstärke eines elektrischen Feldes wird in dessen Umgebung ein magnetisches Feld erzeugt.

Der direkte experimentelle Beweis dieser Behauptung ist nicht so einfach wie im Fall des vorhergehenden Satzes über die Änderung des magnetischen Feldes. Indirekte Beweise gibt es aber in Hülle und Fülle, und wir werden solche im Folgenden ansprechen. Abb. 3.28 zeigt, wie das entstehende magnetische Feld in einem einfachen Fall aussieht. In dem Leiter fließt ein elektrischer Strom. Solange dieser Strom fließt, nimmt die elektrische Ladung auf den Platten des Kondensators zu, und das hat zur Folge, dass auch die elektrische Feldstärke zwischen den Kondensatorplatten zunimmt. Hier umschlingen die Feldlinien des magnetischen Feldes die Feldlinien des elektrischen. Du weißt von früher, dass auch die Zuleitungen zum Kondensator von einem magnetischen Feld umgeben sind, dessen Feldlinien den Leiter umschlingen. Du siehst also, dass sich das magnetische Feld so verhält, als hätten wir einen geschlossenen elektrischen Stromkreis vor uns. Die Unterbrechung durch den Kondensator hat auf das magnetische Feld keinen Einfluss.

Aus Abbildung 3.28 kann man eine einfache Regel ablesen. Sie stellt eine Variante einer altbekannten Regel dar: „Orientiere den Daumen der rechten Hand in die Richtung des elektrischen Stroms. Die gekrümmten Finger zeigen dann in die Richtung der Feldlinien des magnetischen Feldes.“:

> Orientiere den Daumen der *rechten* Hand in die Richtung der zunehmenden elektrischen Feldstärke. Die gekrümmten Finger zeigen dann in die Richtung der Feldlinien des magnetischen Feldes.

Abb. 3.27 zeigt, dass eine analoge Regel für die Induktion, also die Erzeugung elektrischer Felder gilt:

> Orientiere den Daumen der linken Hand in die Richtung der zunehmenden magnetischen Flussdichte. Die gekrümmten Finger zeigen dann in die Richtung der Feldlinien des elektrischen Feldes.

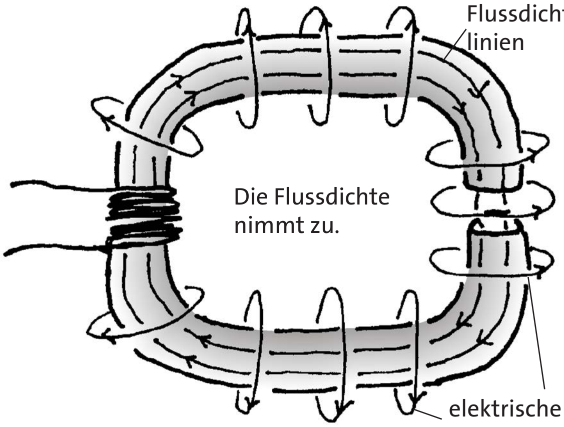


Abb. 3.27 Die elektrischen Feldlinien umschlingen das sich ändernde magnetische Feld und die sich ändernde Magnetisierung.

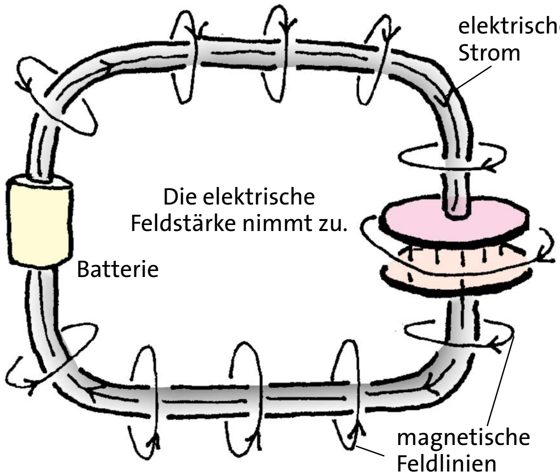


Abb. 3.28 Die magnetischen Feldlinien umschlingen das sich ändernde elektrische Feld und den elektrischen Strom.

Beachte, dass man einmal die rechte und einmal die linke Hand nehmen muss. Und beachte, dass die Feldstärke zunehmen muss. Nimmt sie ab, so muss die Richtung des Daumens umgekehrt werden, damit die Finger die korrekten Feldlinienrichtungen anzeigen.

Die Berechnung der räumlichen Verteilung und der zeitlichen Änderung der elektrischen und der magnetischen Feldstärke ist Gegenstand der *Maxwellschen Theorie*.

James Clerk Maxwell veröffentlichte seine Theorie im Jahr 1873. Sie ist eine der bedeutendsten Theorien der Physik. Sie gestattet nicht nur, die elektrischen und magnetischen Feldstärkeverteilungen zu berechnen. Sie sagt uns auch, wie man aus den Feldstärken die

Energie und die mechanischen Spannungen der Felder gewinnt.

Maxwells Theorie beruht zum großen Teil auf Ideen von Michael Faraday. Faraday hat unter Anderem die Induktion entdeckt. Sein größtes Verdienst ist aber die Entdeckung des elektrischen und magnetischen Feldes. Vor Faraday hatte man die elektrischen und magnetischen Kraftwirkungen als *Fernwirkungen* erklärt: Ein elektrisch geladener Körper übt auf einen anderen eine Kraft aus, ohne dass es dabei irgendeine Verbindung zwischen den beiden Körpern gibt. Diese Vorstellung wurde zwar von Anfang an als unbefriedigend empfunden. Man hatte aber noch keinen Hinweis auf die Existenz dessen, was später von Faraday „Feld" genannt wurde.

3.9 Elektromagnetische Wellen

Wir sind nun so weit, dass wir eine Entdeckung machen könnten, wenn sie nicht Maxwell vor über hundert Jahren schon gemacht hätte.

Wir werfen noch einmal einen Blick auf die beiden Regeln, die wir im vorigen Abschnitt formuliert hatten:

1. *Durch die Änderung der Feldstärke eines magnetischen Feldes wird in dessen Umgebung ein elektrisches Feld erzeugt.*
2. *Durch die Änderung der Feldstärke eines elektrischen Feldes wird in dessen Umgebung ein magnetisches Feld erzeugt.*

Wir betrachten ein magnetisches Feld, dessen Feldstärke sich ändert. Nach Satz 1 entsteht in seiner Umgebung ein elektrisches Feld. Wenn die Änderung gleichmäßig ist, wenn sich also die magnetische Feldstärke *linear* mit der Zeit ändert, so ist die Feldstärke des entstehenden elektrischen Feldes *zeitlich konstant.* Wenn aber die Änderung der magnetischen Feldstärke nicht linear mit der Zeit ist, so entsteht ein elektrisches Feld, dessen Feldstärke sich ebenfalls ändert.

Eine sich ändernde elektrische Feldstärke hat aber, nach Satz 2, ein magnetisches Feld zur Folge. Die Änderung der magnetischen Feldstärke kann nun wieder ein elektrisches Feld verursachen, die Änderung von dessen Feldstärke wieder ein magnetisches und so weiter.

Was wir hier gerade beschrieben haben ist die Entstehung einer *elektromagnetischen Welle.*

Elektrische und magnetische Felder bewegen sich durch den Raum, indem das eine, wenn es vergeht, das andere erzeugt.

Das Aussehen der Felder, die sich wechselweise erzeugen, kann sehr kompliziert sein. Es gibt aber Fälle, in denen die räumliche Verteilung der Feldstärken und ihre zeitlichen Änderungen sehr einfach sind. Wir wollen solche Spezialfälle untersuchen.

Wir betrachten dabei nur, wie die Welle selbst aussieht und fragen nicht danach, wie man sie erzeugt. Die Erklärung der Erzeugung ist viel schwieriger als die Erklärung der Welle selbst. (Es ist ähnlich, wie wenn man Wasserwellen auf dem Meer betrachtet und dabei nur untersucht, wie die Wellen von einer Stelle zur anderen kommen, und wie sie sich dabei verformen, ohne jedoch danach zu fragen, wie die Wellen erzeugt worden sind.)

3.10 Die „Rechteckwelle"

Unser erstes Beispiel ist eine „Rechteckwelle". Sie ist weder technisch interessant, noch in der Natur von Bedeutung, hat aber den Vorteil, dass einige allgemeine Eigenschaften elektromagnetischer Wellen besonders deutlich zu Tage treten. Abb. 3.29 zeigt die Welle zu zwei verschiedenen Zeitpunkten, zwei „Momentaufnahmen". Der elektrische und magnetische Feldstoff befindet sich in einem plattenförmigen, in y- und in z-Richtung unendlich ausgedehnten Bereich der Dicke Δx. Die Bewegungsrichtung ist die x-Richtung. Die elektrischen Feldlinien liegen quer zur Laufrichtung der Welle, in Abb. 3.29 in y-Richtung. Die magnetischen Feldlinien liegen auch quer zur Laufrichtung; außerdem aber auch quer zu den elektrischen Feldlinien, in Abb. 3.29 in z-Richtung.

Wir betrachten eine beliebige Gerade g, die parallel zur x-Achse verläuft. Wenn man sich auf dieser Gerade von links nach rechts bewegt, befindet man sich zunächst in einem Gebiet, in dem die elektrische und die magnetische Feldstärke null sind. An einer bestimmten Stelle x' kommt man ins Innere der Welle. Dort haben die Feldstärken konstante Werte. Bei $x'+\Delta x$ gehen die Feldstärken wieder auf null zurück. Dieser Verlauf der Feldstärken ist in Abb. 3.30a dargestellt. Genauer: Es sind die y-Komponente der elektrischen Feldstärke (die einzige von null verschiedene Komponente) und die z-Komponente der magnetischen Feldstärke als Funktion von x dargestellt. Du verstehst jetzt, warum wir den Namen „Rechteckwelle" gewählt haben. Beachte, dass das Bild für jede Gerade, die parallel zu x-Achse liegt gleich aussieht. Abb. 3.30b zeigt das entsprechende Bild für einen späteren Zeitpunkt. Man sieht auf die-

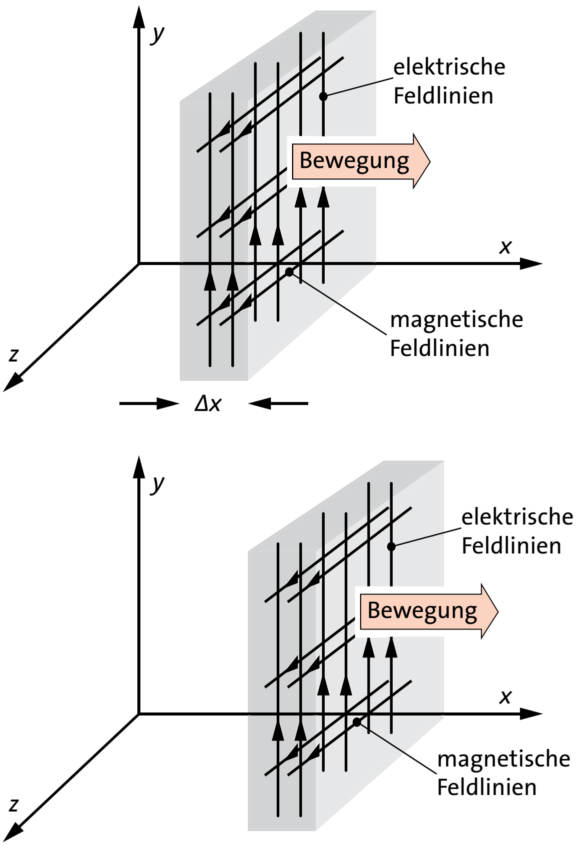


Abb. 3.29 „Momentaufnahmen" einer einfachen elektromagnetischen Welle. Die Bilder entsprechen zwei kurz aufeinander folgenden Zeitpunkten.

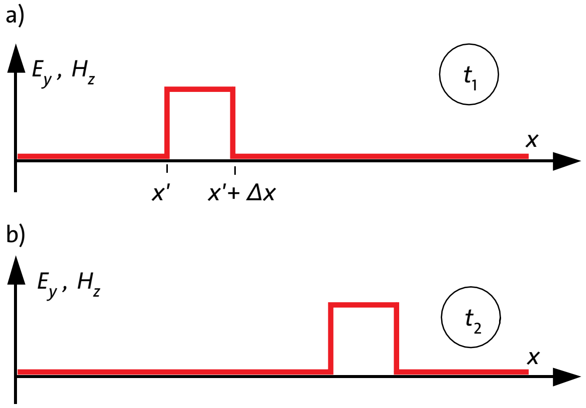


Abb. 3.30 Elektrische und magnetische Feldstärke der Welle von Abb. 3.29 als Funktion der Ortskoordinate x zu zwei verschiedenen Zeitpunkten t_1 und t_2.

sen Abbildungen, dass sich das Feld von links nach rechts bewegt.

Andere elektromagnetische Wellen können sich von diesem speziellen Beispiel in vielerlei Hinsicht unterscheiden, einige Eigenschaften haben sie aber mit der hier betrachteten Welle gemeinsam, etwa die folgende:

> In jedem beliebigen Punkt einer elektromagnetischen Welle stehen Laufrichtung, elektrische Feldstärke und magnetische Feldstärke senkrecht aufeinander.

Und noch eine andere Eigenschaft ist charakteristisch für elektromagnetische Wellen: die Energiedichte des elektrischen Feldes ist gleich der des magnetischen Feldes:

$$\frac{\varepsilon_0}{2}\left|\vec{E}\right|^2 = \frac{\mu_0}{2}\left|\vec{H}\right|^2 . \tag{3.12}$$

Das bedeutet, dass die Beträge von elektrischer und magnetischer Feldstärke in einem ganz bestimmten Verhältnis zueinander stehen. Aus Gleichung (3.12) folgt nämlich:

> In einer elektromagnetischen Welle ist
>
> $$\sqrt{\varepsilon_0}\left|\vec{E}\right| = \sqrt{\mu_0}\left|\vec{H}\right|.$$

Die Geschwindigkeit, mit der elektromagnetische Wellen im Vakuum und auch in Luft laufen, bezeichnet man mit c. Sie beträgt

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}. \tag{3.14}$$

Einsetzen der Werte der elektrischen und magnetischen Feldkonstante liefert etwa 300 000 km/s.

> Die Geschwindigkeit, mit der sich elektromagnetische Wellen bewegen, beträgt 300 000 km/s.

Diese Geschwindigkeit lässt sich recht leicht messen. Man kann also mit einer solchen Messung die Gültigkeit der Beziehung (3.14) überprüfen.

3.11 Energietransport mit elektromagnetischen Wellen

Anhand der Rechteckwelle können wir noch eine weitere allgemeine Gesetzmäßigkeit erkennen. Wie hängt die Richtung, in die die Welle läuft, mit der Richtung von elektrischer und magnetischer Feldstärke zusammen? Wir hatten schon gesehen, dass sie quer zu beiden steht – in Abb. 3.29 in der Richtung

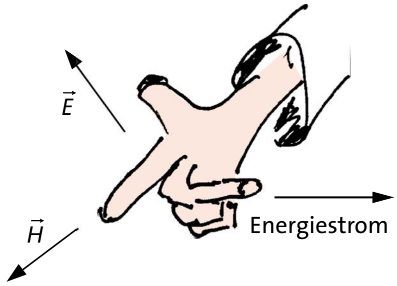


Abb. 3.31 Drei-Finger-Regel für den Energiestrom im elektromagnetischen Feld

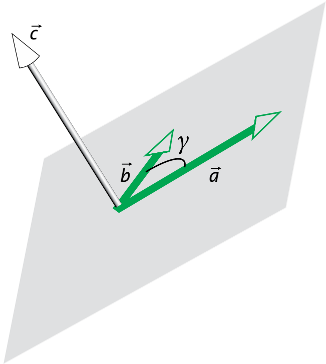


Abb. 3.32 Der Produktvektor $\vec{c}$ steht senkrecht auf der von $\vec{a}$ und $\vec{b}$ aufgespannten Ebene.

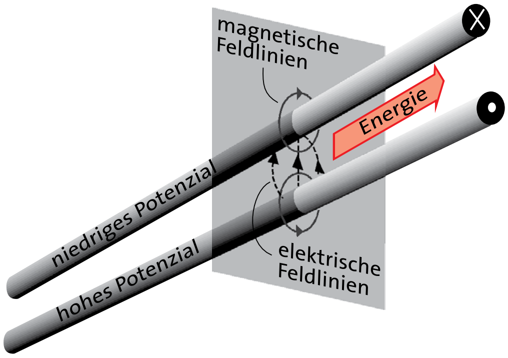


Abb. 3.33 Nur außerhalb der Leiter sind elektrische und magnetische Feldstärke von null verschieden; nur dort fließt Energie.

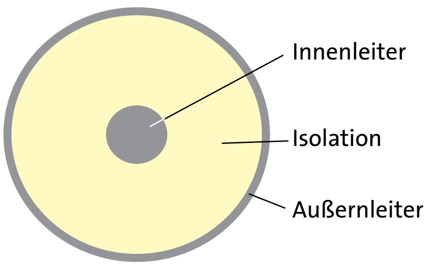


Abb. 3.34 Querschnitt durch ein Koaxialkabel. Der Außenleiter befindet sich auf Erdpotenzial.

der x-Achse. Wir kennen aber noch keine Regel, die es uns gestattet zu entscheiden, ob die Welle in die positive oder in die negative x-Richtung läuft. Wir wollen diese Regel aus Abb. 3.29 ablesen.

Man spreizt die ersten drei Finger (Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger) der rechten Hand so auseinander, dass sie ein rechtwinkliges Dreibein bilden, Abb. 3.31. Man orientiert den Daumen in die Richtung der elektrischen Feldstärke und den Zeigefinger in die Richtung der magnetischen Feldstärke. Der Mittelfinger weist dann in die Laufrichtung der Welle. Dies ist gleichzeitig die Richtung, in die die Energie der Welle fließt. Der Mittelfinger zeigt also die Richtung des Energiestromdichtevektors an.

> *Drei-Finger-Regel der rechten Hand:*
> Daumen – elektrische Feldstärke
> Zeigefinger – magnetische Feldstärke
> Mittelfinger – Richtung des Energiestroms der Welle

Den Betrag der Energiestromdichte erhält man als Produkt der beiden Feldstärken.

$$\left|\vec{j}_E\right| = \left|\vec{E}\right| \cdot \left|\vec{H}\right| \qquad (3.15)$$

Die Gleichung lässt sich noch verallgemeinern, sodass sie nicht nur für den Fall gilt, in dem elektrischer und magnetischer Feldstärkevektor senkrecht aufeinander stehen.

Um diese allgemeinere Gleichung zu verstehen, müssen wir noch eine mathematische Definition kennen lernen: die Definition des Vektorprodukts, Abb. 3.32.

$$\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$$

Der Produktvektor $\vec{c}$ ist durch die folgenden Regeln definiert:

Richtung von $\vec{c}$: senkrecht zur Ebene, die durch $\vec{a}$ und $\vec{b}$ aufgespannt wird;
Betrag von of $\vec{c}$: $|\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \sin\gamma$
Hier ist γ der Winkel zwischen $\vec{a}$ und $\vec{b}$.

Für die Energiestromdichte im elektromagnetischen Feld gilt nun:

$$\vec{j}_E = \vec{E} \times \vec{H} \qquad (3.16)$$

Diese Gleichung macht nicht nur eine Aussage über den Betrag von $\vec{j}_E$; sie sagt uns auch, wie die Richtung des „Produktvektors" ist. Die Formel gilt nicht nur für solche elektromagnetischen Felder, die wir „Welle" nennen; sie gilt für jedes Feld.

Wir können jetzt auch eine Frage beantworten, der wir bisher etwas aus dem Weg gegangen sind. Wo genau fließt die Energie, wenn man ein normales, zweiadriges elektrisches Kabel verwendet? Eine nahe liegende Antwort wäre: „Im Kabel, wo denn sonst?" Aber diese Antwort ist falsch. Im Kabel fließt die elektrische Ladung, und im Kabel bewegen sich die Elektronen. Nur die Energie fließt dort nicht. Wo sie fließt, sehen wir in Abb. 3.33.

Da ein elektrischer Strom fließt, haben wir ein magnetisches Feld, dessen Feldlinien die Leiter umschlingen; und da zwischen den Leitern eine elektrische Spannung herrscht, haben wir ein elektrisches Feld, dessen Feldlinien vom einen zum anderen Leiter laufen. Außerhalb der Leiter haben wir also ein elektrisches und ein magnetisches Feld. Die Feldlinien beider Felder liegen in Ebenen senkrecht zu den Leitern. Nach Gleichung (3.15) oder (3.16) haben wir daher eine Energieströmung parallel zu den Leitern.

Aufgaben

1. Ein Radiosender emittiert eine elektromagnetische Welle mit 10 kW. Die Antenne ist so gebaut, dass die Strahlung nur in einen bestimmten Winkelbereich geht. In einer Entfernung von 10 km hat das Strahlenbündel eine Breite von 2,5 km und eine Höhe von 1 km. (Diese Angaben sind sehr grob. Bei einer echten Antenne nimmt die Intensität von der Vorwärtsrichtung ausgehend nach den Seiten hin stetig ab.) Berechne die Energiestromdichte an dieser Stelle, d.h. in 10 km Entfernung von der Antenne. Berechne die elektrische und die magnetische Feldstärke. Vergleiche mit der Energiestromdichte des Sonnenlichts.
2. Abb. 3.34 zeigt ein Koaxialkabel im Querschnitt: Der eine Leiter ist ein gewöhnlicher Draht; der andere Leiter umgibt den Draht zylinderförmig in einem gewissen Abstand. Koaxialkabel sind geeignet für die Übertragung elektrischer Wechselstromsignale sehr hoher Frequenz. Der Außenleiter befindet sich auf Erdpotenzial. Zeichne magnetisch und elektrische Feldlinien ein. Wo und in welche Richtung fließt die Energie.

3.12 Sinuswellen

Wir kommen zu einem realistischeren Beispiel für eine elektromagnetische Welle: die ebene Sinuswelle. Abb. 3.35 zeigt, etwas vereinfacht, eine „Momentaufnahme" einer Sinuswelle, die in x-Richtung läuft. Auch hier sind die Feldstärken nur von x, nicht aber von y und z abhängig.

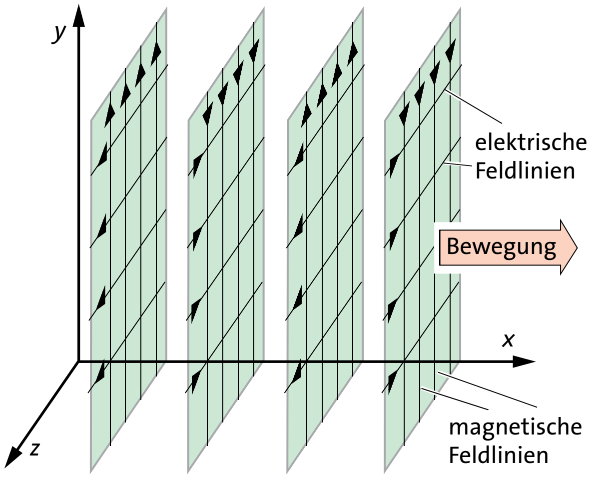


Abb. 3.35 „Momentaufnahme" einer elektromagnetischen Sinuswelle

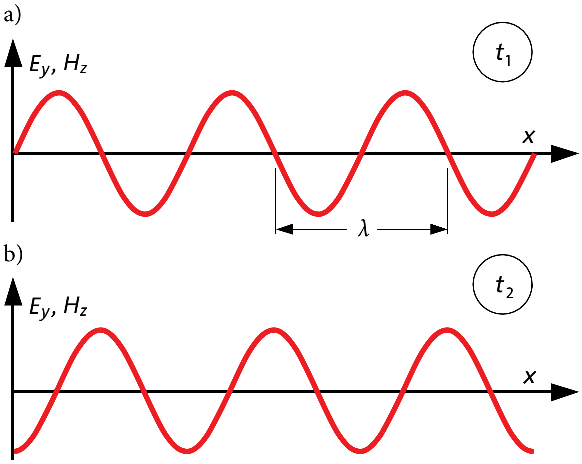


Abb. 3.36 Elektrische und magnetische Feldstärke der Welle von Abb. 3.31 als Funktion der Ortskoordinate x zu zwei verschiedenen Zeitpunkten t_1 und t_2

Die x-Abhängigkeit ist in Abb. 3.36a dargestellt. Sie ist eine Sinusfunktion. Zu einem etwas späteren Zeitpunkt ist die Sinuswellenlinie ein Stück vorgerückt, Abb. 3.36b. Den Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Maxima oder auch Minima oder Nulldurchgängen nennt man die *Wellenlänge* λ der Welle.

Auch für diese Welle gelten die Regeln:

- elektrische Feldstärke, magnetische Feldstärke und Laufrichtung stehen senkrecht aufeinander;
- die Beträge hängen an jeder Stelle gemäß Gleichung (3.13) zusammen;
- die Welle bewegt sich mit der Geschwindigkeit $c = 300\,000$ km/s.

Die Welle besteht also aus flächigen Bereichen hoher Feldstärken, die sich nach rechts bewegen, und die voneinander getrennt sind durch Bereiche niedriger Feldstärken. Da dort, wo die Feldstärken hoch sind, auch viel Energie steckt, bedeutet das, dass auch die Energie in diesen nach rechts laufenden flächigen Paketen transportiert wird.

Elektromagnetische Wellen begegnen uns auf Schritt und Tritt, sowohl als natürliche Erscheinung, als auch erzeugt mit technischen Mitteln. Dabei ist besonders interessant, dass es elektromagnetische Wellen mit sehr, sehr unterschiedlichen Wellenlängen gibt. Die kürzesten, die man beobachtet hat, sogenannte harte Gammastrahlung, haben eine Wellenlänge von 10^{-22} m. Andererseits werden zur Radioübertragung Wellen von bis zu 10^4 m Wellenlänge verwendet. Zwischen diesen Extremen (die eigentlich gar keine Extreme sind, denn es gibt keinen Grund dafür, dass man nicht auch noch kürzere oder noch längere Wellen erzeugen könnte) liegen die Röntgenstrahlen, das ultraviolette, das gewöhnliche, „sichtbare“ Licht, die Infrarotstrahlung, die Mikrowellen und die Wellen, die für UKW und Fernsehen verwendet werden, Abb. 3.37.

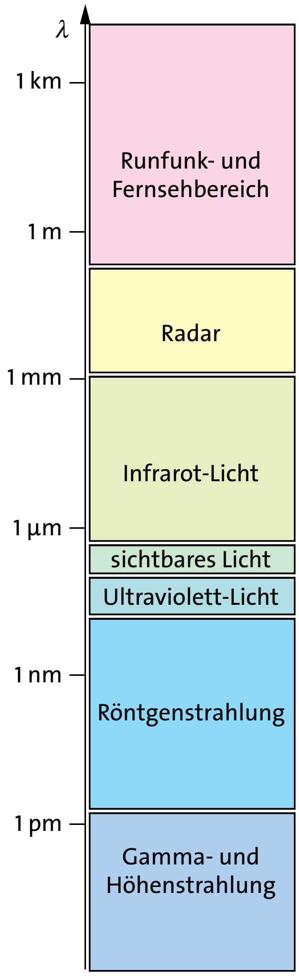


Abb. 3.37 Die verschiedenen Wellenlängenbereiche der elektromagnetischen Wellen

Naturkonstanten und Formeln

Naturkonstanten	
$\mu_0 = 1{,}257 \cdot 10^{-6}\ (\mathrm{V\,s})/(\mathrm{A\,m})$	magnetische Feldkonstante
$\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ (\mathrm{A\,s})/(\mathrm{V\,m})$	elektrische Feldkonstante
$m_{\mathrm{el}} = 9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg}$	Masse des Elektrons
$e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$	Elementarladung

Energie und Energieströme	
$P = U \cdot I$	Energiestromstärke bei elektrischem Energietransport
$E = \frac{C}{2}U^2,\quad E = \frac{L}{2}I^2$	Energie im elektrischen Feld eines Kondensators/im magnetischen Feld einer Spule
$\rho_E = \frac{\varepsilon_0}{2}\lvert\vec{E}\rvert^2,\quad \rho_E = \frac{\mu_0}{2}\lvert\vec{H}\rvert^2$	Energiedichte im elektrischen/magnetischen Feld
$\Delta E = (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot \Delta Q$	Energieänderung eines geladenen Körpers beim Durchlaufen einer Potenzialdifferenz

Impulsströme	
$F = Q \cdot \lvert\vec{E}\rvert$	Impulsstrom in elektrisch geladenes Teilchen im elektrischen Feld
$F = Q_{\mathrm{m}} \cdot \lvert\vec{H}\rvert$	Impulsstrom in einen Magnetpol im magnetischen Feld
$F = I \cdot \Delta s \cdot B$	Impulsstrom in elektrisch geladenes Teilchen im magnetischen Feld
$\sigma_\perp = \frac{\varepsilon_0}{2}\lvert\vec{E}\rvert^2,\quad \sigma_\parallel = -\frac{\varepsilon_0}{2}\lvert\vec{E}\rvert^2$	mechanische Spannungen im elektrischen Feld
$\sigma_\perp = \frac{\mu_0}{2}\lvert\vec{H}\rvert^2,\quad \sigma_\parallel = -\frac{\mu_0}{2}\lvert\vec{H}\rvert^2$	mechanische Spannungen im magnetischen Feld

Berechnung von Feldstärken	
$\lvert\vec{E}\rvert = \frac{U}{d}$	elektrische Feldstärke des Kondensatorfeldes
$H = I \cdot \frac{n}{\ell}$	magnetische Feldstärke des Feldes in einer Spule (ℓ = Länge der Spule)
$H = \frac{I}{\ell}$	magnetische Feldstärke des Feldes eines elektrischen Leiters (ℓ = Kreisumfang)

Naturkonstanten und Formeln (Fortsetzung)

Änderungsraten	
$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = I$	Änderungsrate der elektrischen Ladung gleich elektrische Stromstärke (Erhaltung der elektrischen Ladung)
$n \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = U$	Änderungsrate des magnetischen Flusses gleich elektrische Spannung (Induktionsgesetz)

Gleichungen, die ein Bauelement charakterisieren	
$U = R \cdot I, \quad R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\ell}{A}$	charakterisiert Ohmschen Widerstand
$Q = C \cdot U, \quad C = \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$	charakterisiert Kondensator
$n \cdot \Phi = L \cdot I, \quad L = n^2 \mu_0 \cdot \frac{A}{\ell}$	charakterisiert Spule
$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$	lokales Ohmsches Gesetz

Periodendauer	
$T = 2\pi\sqrt{L \cdot C}$	Periodendauer eines elektrischen Schwingkreises