



Der Karlsruher Physikkurs

für die Sekundarstufe I

Band 2

Daten - Elektrizität - Licht

Der Karlsruher Physikkurs

Ein Lehrbuch für den Unterricht in der Sekundarstufe I

- Band 1: Energie - Impuls - Entropie
- **Band 2: Daten - Elektrizität - Licht**
- Band 3: Reaktionen - Wellen - Atome

Herrmann

Der Karlsruher Physikkurs

Auflage 2014

Bearbeitet von

Prof. Dr. *Friedrich Herrmann*
Karen Haas
Dr. *Matthias Laukenmann*,
Dr. *Lorenzo Mingirulli*
Dr. *Petra Morawietz*
Dr. *Peter Schmälzle*

Abbildungen: *F. Herrmann*



Lizensiert unter Creative Commons

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/>

15

Daten und Datenträger

15.1 Datentransporte

Jedes Haus steht über Leitungen und Öffnungen mit der Außenwelt in Verbindung. Auf den Abbildungen 15.1 und 15.2 ist ein Haus mit solchen Verbindungen im Querschnitt dargestellt. Um das Bild nicht zu unübersichtlich zu machen, wurde ein Teil der Verbindungen in Abb. 15.1, ein anderer in Abb. 15.2 dargestellt. Dabei wurden die Leitungen nach einem bestimmten Prinzip geordnet. Alle in Abb. 15.1 gezeichneten Verbindungen dienen einem gemeinsamen Zweck und alle in Abb. 15.2 dargestellten einem anderen gemeinsamen Zweck.

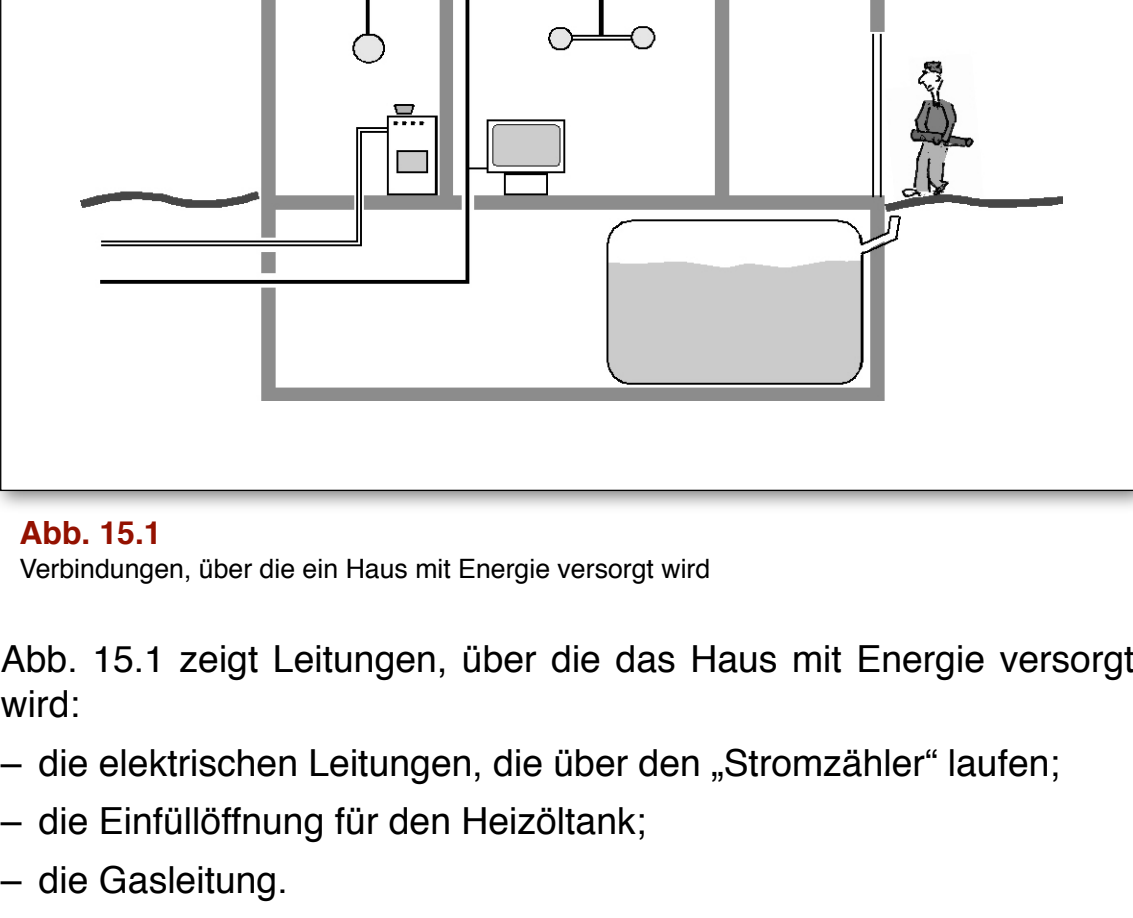


Abb. 15.1 Verbindungen, über die ein Haus mit Energie versorgt wird

Abb. 15.1 zeigt Leitungen, über die das Haus mit Energie versorgt wird:

- die elektrischen Leitungen, die über den „Stromzähler“ laufen;
- die Einfüllöffnung für den Heizöltank;
- die Gasleitung.

Ein Mann trägt Holz für den Kamin ins Haus. Energie wird also manchmal auch durch die Tür ins Haus gebracht. Andere Häuser haben noch weitere Zuleitungen oder Öffnungen für die Energie:

- die Kellerluke (für Holz und Kohle);
- eine Fernwärmeleitung;
- eine Leitung, durch die warmes Wasser vom Sonnenkollektor ins Haus fließt.

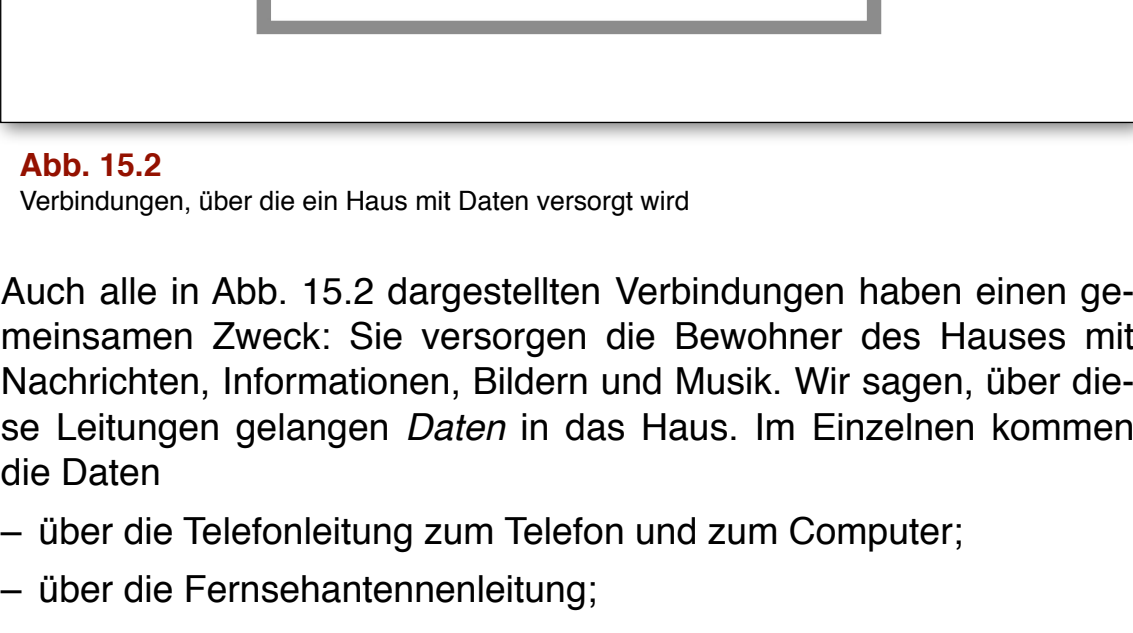


Abb. 15.2 Verbindungen, über die ein Haus mit Daten versorgt wird

Auch alle in Abb. 15.2 dargestellten Verbindungen haben einen gemeinsamen Zweck: Sie versorgen die Bewohner des Hauses mit Nachrichten, Informationen, Bildern und Musik. Wir sagen, über diese Leitungen gelangen *Daten* in das Haus. Im Einzelnen kommen die Daten

- über die Telefonleitung zum Telefon und zum Computer;
- über die Fernsehantennenleitung;
- mit Zeitungen und Briefen durch den Briefkastenschlitz;
- durch das Dach und die Wände hindurch mit Radiowellen, sogenannten elektromagnetischen Wellen, die von der Antenne des Transistorradios oder vom Handy aufgefangen werden;
- durch das offene Fenster, durch das der Nachbar etwas herüber ruft.

Auch Daten können durch die Tür ins Haus gelangen: Die Frau hat einen USB-Stick und eine DVD in ihrer Tasche.

Weitere, im Bild nicht dargestellte Datenleitungen, die in ein Haus führen können, sind:

- die Klingelleitung;
- die Kabelfernsehleitung.

Wir hatten früher gesehen, dass für jeden Energietransport ein Energieträger gebraucht wird. Entsprechend braucht man für jeden Datentransport einen *Datenträger*. Im Fall des Hauses von Abb. 15.2 gelangen Daten mit Hilfe der folgenden Träger ins Hausinnere:

- Elektrizität;
- Schall;
- Radiowellen;
- Briefe, Zeitungen etc.

Außerdem kann Licht als Datenträger auftreten. Wenn man fernsieht, gelangen vom Bildschirm Daten mit dem Träger Licht in unsere Augen. Auch Telefongespräche werden teilweise mit Licht übertragen. Als Leitungen werden dabei anstelle der sonst üblichen Kupferdrähte *Lichtleiter* verwendet.

Für jeden Datentransport wird ein Träger gebraucht. Elektrizität, Schall, Radiowellen und Licht können als Datenträger benutzt werden.

Natürlich kann jede Nachricht mit jedem beliebigen Träger transportiert werden. Die Nachricht „Schreib eine E-Mail“ wird in Abb. 15.3 mit vier verschiedenen Trägern überbracht.

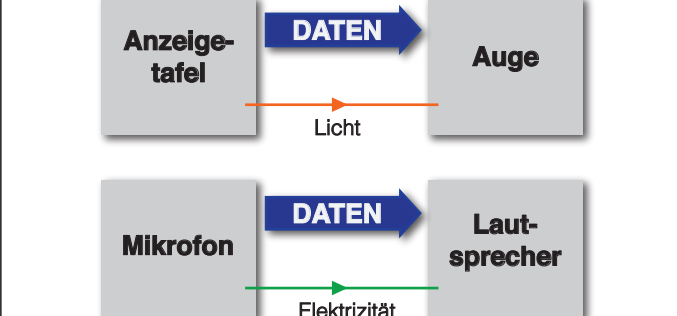
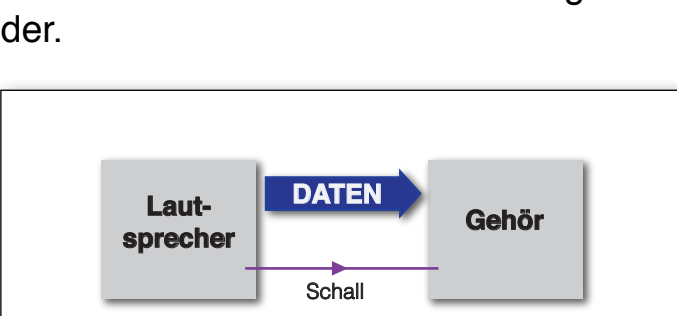
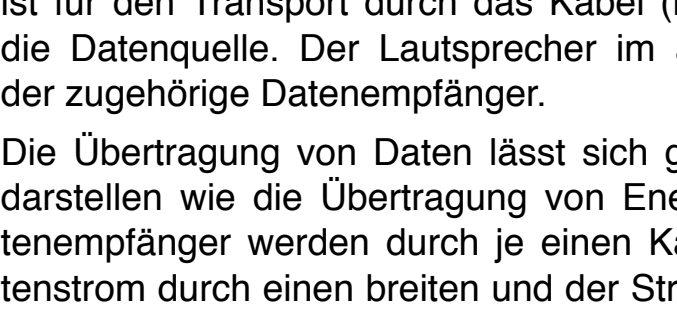
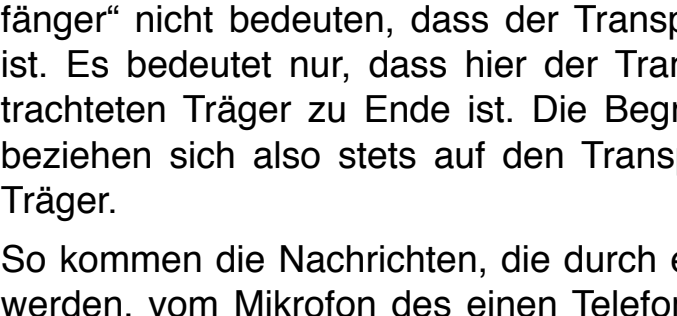


Abb. 15.3 Ein und dieselbe Nachricht wird mit verschiedenen Trägern übermittelt.

Zu jedem Datentransport gibt es einen Anfang und ein Ende: die *Datenquelle* und den *Datenempfänger*. Wenn eine Person A einer anderen Person B etwas sagt, so ist A (genauer: das Stimmorgan von A) die Datenquelle und B (genauer: das Gehör von B) der Datenempfänger.

Das Wort „Quelle“ muss aber nicht bedeuten, dass hier die Daten erzeugt werden; es bedeutet lediglich, dass hier der Transport mit einem bestimmten Träger beginnt. Ebenso muss das Wort „Empfänger“ nicht bedeuten, dass der Transport hier endgültig zu Ende ist. Es bedeutet nur, dass hier der Transport mit dem gerade betrachteten Träger zu Ende ist. Die Begriffe Quelle und Empfänger beziehen sich also stets auf den Transport mit einem bestimmten Träger.

So kommen die Nachrichten, die durch ein Telefonkabel übertragen werden, vom Mikrofon des einen Telefonapparats. Dieses Mikrofon ist für den Transport durch das Kabel (mit dem Träger Elektrizität) die Datenquelle. Der Lautsprecher im anderen Telefonapparat ist der zugehörige Datenempfänger.

Die Übertragung von Daten lässt sich genauso in einem Flussbild darstellen wie die Übertragung von Energie. Datenquelle und Datenempfänger werden durch je einen Kasten symbolisiert, der Datenstrom durch einen breiten und der Strom des Datenträgers durch einen dünnen Pfeil. Abb. 15.4 zeigt drei Beispiele für Datenflussbilder.

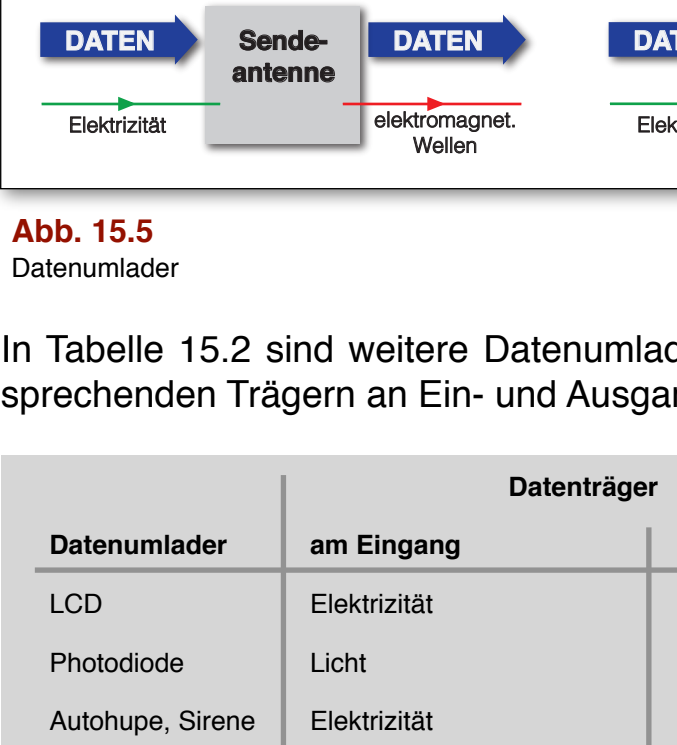


Abb. 15.4 Einige Datenflussbilder

In Tabelle 15.1 sind weitere Quelle-Empfänger-Paare zusammen mit den entsprechenden Trägern aufgeführt.

Datenquelle	Datenträger	Datenempfänger
Sendeanterie	Elektromagnet. Wellen	Empfangsantenne
Empfangsantenne	Elektrizität	Fernsehapparat
Sprechorgan	Schall	Mikrofon

Tabelle 15.1

An Energietransporten sind oft Geräte beteiligt, deren Aufgabe es ist, Energie von einem auf einen anderen Träger umzuladen. Das Entsprechende trifft auf Datentransporte zu: Bei Datentransporten werden Daten oft von einem auf einen anderen Träger umgeladen. Das bedeutet, dass diese Geräte Quelle und Empfänger in einem sind.

So werden in einem Lautsprecher die Daten von Elektrizität auf Schall umgeladen. Der Lautsprecher ist also Empfänger für einen Transport mit dem Träger Elektrizität und Quelle für einen Transport mit dem Träger Schall. Die symbolische Darstellung von Datenumladern liegt damit auf der Hand. Abb. 15.5 zeigt einige Beispiele.

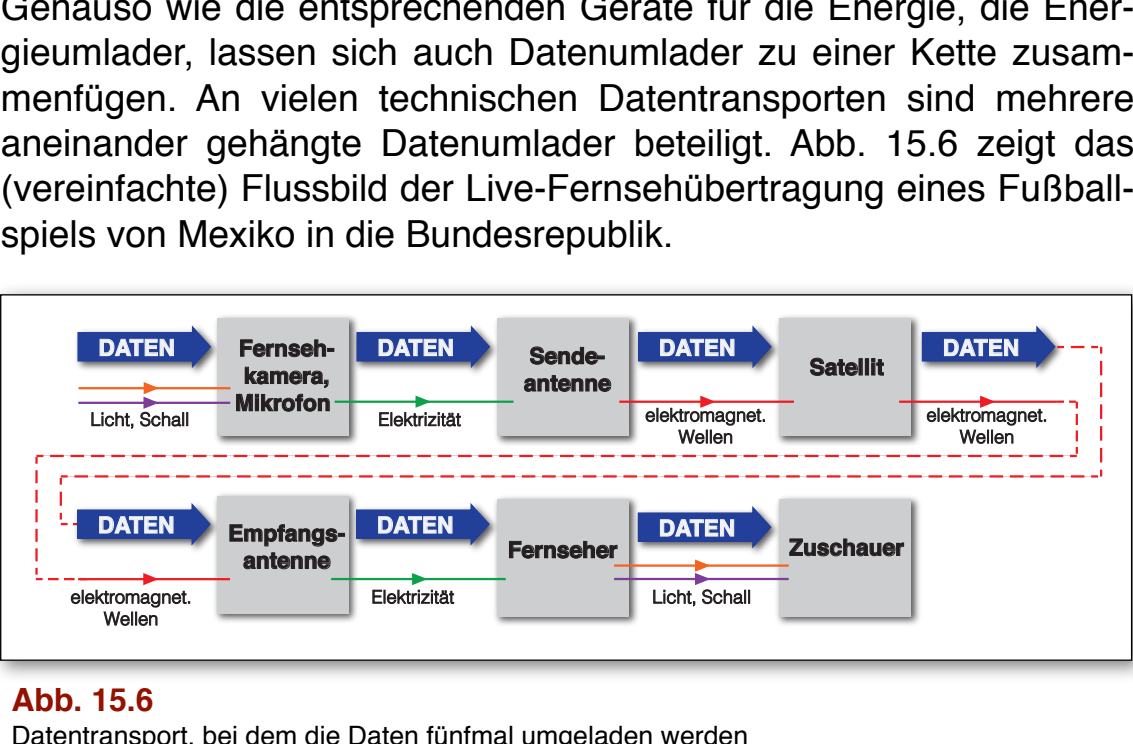


Abb. 15.5 Datenumlader

In Tabelle 15.2 sind weitere Datenumlader zusammen mit den entsprechenden Trägern an Ein- und Ausgang aufgeführt.

Datenumlader	Datenträger	
	am Eingang	am Ausgang
LCD	Elektrizität	Licht
Photodiode	Licht	Elektrizität
Autohupe, Sirene	Elektrizität	Schall
Radioapparat	elektromagnetische Wellen	Schall

Tabelle 15.2

Man sieht, dass es zu jedem Gerät, das Daten von einem Träger A auf einen Träger B umlädt, ein Gegenstück gibt, d.h. ein Gerät, das Daten von B auf A lädt. So ist das Mikrofon das Gegenstück zum Lautsprecher, und die Videokamera tut das Entgegengesetzte von dem, was ein Fernseh Bildschirm tut.

Einige der Geräte von Abb. 15.5 muss man an die Steckdose anschließen, damit sie funktionieren. Sie werden über die Steckdose mit Energie versorgt. Man darf aber diesen Energieeingang nicht mit dem Dateneingang des Geräts verwechseln. Die Nachrichten und Bilder gelangen über die Antenne und das Fernsehgerät in den Fernseher hinein, nicht über die Netzsteckdose.

Genauso wie die entsprechenden Geräte für die Energie, die Energiumlader, lassen sich auch Datenumlader zu einer Kette zusammenfügen. An vielen technischen Datentransporten sind mehrere aneinander gehängte Datenumlader beteiligt. Abb. 15.6 zeigt das (vereinfachte) Flussbild der Live-Fernsehübertragung eines Fußballspiels von Mexiko in die Bundesrepublik.

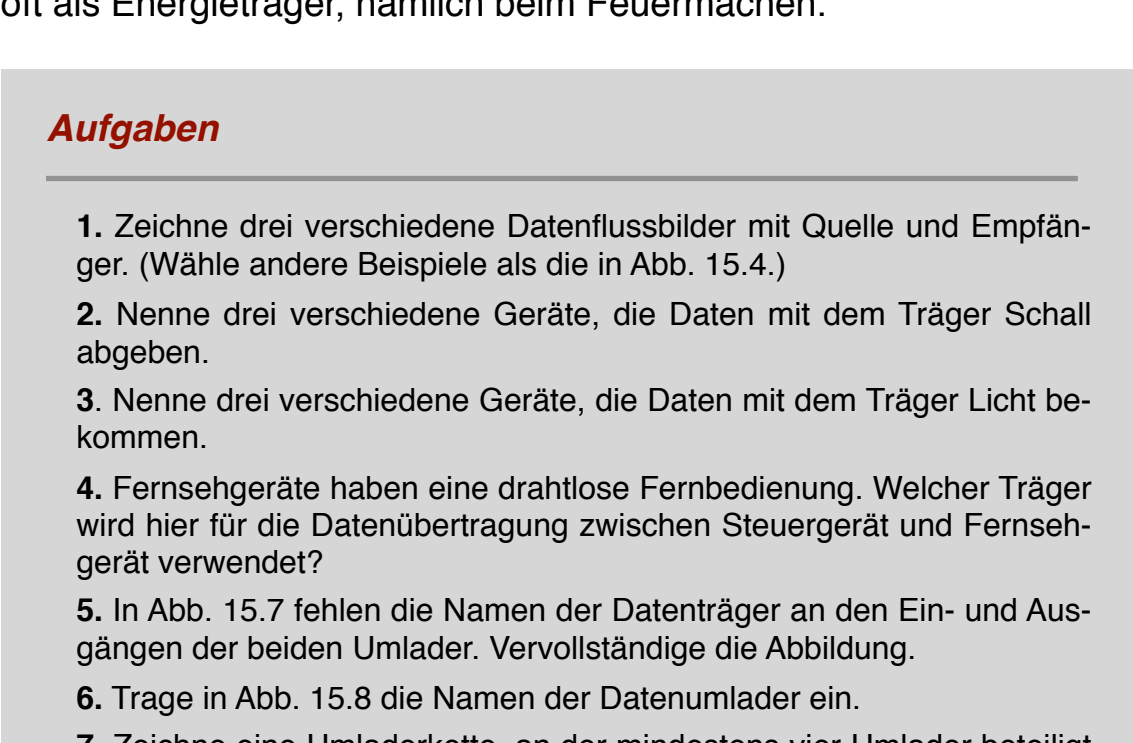


Abb. 15.6 Datentransport, bei dem die Daten fünfmal umgeladen werden

Nach den bisher betrachteten Beispielen sieht es so aus, als müsste das letzte Glied jeder Datenumladerkette ein Mensch sein. Diese Vermutung ist aber nicht richtig. Es gibt Datentransporte, bei denen weder am Anfang noch am Ende eine Person steht. Das ist z. B. bei Regelvorrichtungen der Fall. Für die Temperaturregelung der Wohnung befindet sich in einem der Zimmer ein Temperaturfühler, die Datenquelle. Dieser teilt dem Heizkessel mit, ob mehr oder weniger Heizöl verbrannt werden soll. Der Heizkessel ist hier der Datenempfänger. Datenträger ist in diesem Fall die Elektrizität.

Wenn am Ende einer Datenumladerkette ein Mensch steht, genauer: seine Augen oder sein Gehör, so benutzt man statt des Wortes Daten meist andere Wörter: Nachrichten, Informationen, Texte, Musik, Bilder, Lärm,... Für den Prozess der Übertragung ist es aber gleichgültig, wer der Adressat ist und welche Bedeutung die Daten für ihn haben. Wir benutzen daher in allen Fällen das Wort „Daten“.

Wir haben gesagt, „Licht, Elektrizität, Schall und Radiowellen können als Datenträger *benutzt werden*“, und nicht „Licht usw. *sind* Datenträger“. Ob diese Größen oder Stoffe als Datenträger oder ob sie als Energieträger zu bezeichnen sind, hängt nämlich nur davon ab, was man mit ihnen macht.

So wird man das Licht, das auf einen Sonnenkollektor fällt, als Energieträger bezeichnen und ebenso das Laserlicht, mit dem man ein feines Loch bohrt. Das Licht, das zur Übertragung einer Fernsehendung durch einen Lichtleiter geht, spielt dagegen die Rolle eines Datenträgers. Auch in diesem letzteren Fall transportiert das Licht natürlich Energie, aber dieser Energietransport ist für die Anwendung nicht wesentlich.

Ähnlich ist es bei der Elektrizität. Die Elektrizität, die in dem Kabel von Abb. 15.1 in das Haus fließt (genauer: durch das Haus), dient dem Energietransport; sie spielt hier die Rolle eines Energieträgers. In der Telefonleitung und in der Antennenleitung von Abb. 15.2 dagegen ist ihre technische Funktion die eines Datenträgers.

Ein weiteres Beispiel stellen Mikrowellen dar: Im Mikrowellenherd werden sie als Energieträger benutzt, beim Radar als Datenträger.

Die Druckwelle, die bei einer Sprengung Felsbrocken durch die Gegend schleudert, ist ein Beispiel für eine Schallwelle, die als Energieträger benutzt wird. Wir sind aber mehr daran gewöhnt, Schall als Datenträger zu verwenden.

Sogar die Zeitung, die man eigentlich als Datenträger kauft, endet oft als Energieträger, nämlich beim Feuermachen.

Aufgaben

1. Zeichne drei verschiedene Datenflussbilder mit Quelle und Empfänger. (Wähle andere Beispiele als die in Abb. 15.4.)
2. Nenne drei verschiedene Geräte, die Daten mit dem Träger Schall abgeben.
3. Nenne drei verschiedene Geräte, die Daten mit dem Träger Licht bekommen.
4. Fernsehgeräte haben eine drahtlose Fernbedienung. Welcher Träger wird hier für die Datenübertragung zwischen Steuergerät und Fernsehgerät verwendet?
5. In Abb. 15.7 fehlen die Namen der Datenträger an den Ein- und Ausgängen der beiden Umlader. Vervollständige die Abbildung.
6. Trage in Abb. 15.8 die Namen der Datenumlader ein.
7. Zeichne eine Umladerkette, an der mindestens vier Umlader beteiligt sind. (Wähle ein anderes Beispiel als das in Abb. 15.6.)

Abb. 15.7 Welches sind die Datenträger an Ein- und Ausgang?

Abb. 15.8 Um welche Datenumlader handelt es sich?

15.2 Die Datenmenge

A spricht mit B und C mit D. A und B sprechen schnell, C und D langsam. Zwischen A und B gehen dann in derselben Zeit mehr Daten hin und her als zwischen C und D.

Man kann diese Aussage machen, obwohl A und B über etwas ganz anderes sprechen als C und D, denn man vergleicht hier nicht die Bedeutung, sondern nur die Menge des Gesprochenen, die *Datenmenge*. Im vorliegenden Fall ist ein solcher Vergleich sehr einfach, aber oft stellt sich das Problem in einem schwierigeren Zusammenhang:

- Enthält ein einseitiges Fax mehr oder weniger Daten als ein einminütiges Telefongespräch?
- Ist die Datenmenge, die jemand innerhalb einer Minute aus dem Internet holt, größer oder kleiner als die, die bei einem fünfminütigen Telefongespräch übertragen wird?

Um diese Fragen zu beantworten, müssen wir Datenmengen messen können. Wir werden im Folgenden ein *Mengenmaß* für Daten kennen lernen. Wir kürzen diese neue Größe *Datenmenge* mit dem Buchstaben *H* ab. Die Maßeinheit der Datenmenge ist das bit.

Wir werden damit zum Beispiel angeben können, wie viel bit übertragen werden, wenn man eine Minute lang telefoniert, eine Stunde lang fernsieht oder fünf Minuten lang Rauchzeichen erzeugt.

Wie wir später noch sehen werden, hat dieses Mengenmaß eine große praktische Bedeutung: Daten übertragen und Daten speichern kostet Geld, und der Preis für die Übertragung bzw. den Speicher hängt von der Datenmenge ab, also von der Bit-Zahl.

Um zu sehen, was man unter einem bit versteht, betrachten wir ein sehr einfaches Beispiel einer Datenübertragung.

Willy und Lilly planen für nächsten Sonntag eine Radtour. Sie brauchen dazu die Erlaubnis ihrer Eltern. Willy hat die Erlaubnis schon, aber Lillys Eltern kommen erst am Samstag spät abends nach Hause. Lilly möchte aber Willy noch am Abend mitteilen, ob es klappt oder nicht, – allerdings ohne das Handy oder den Computer zu benutzen. Die Häuser, in denen die beiden wohnen, sind etwa 300 m voneinander entfernt, und die Fenster ihrer Zimmer befinden sich in Sichtweite. Wie kann Lilly Willy noch am Samstagabend mitteilen, ob aus der Radtour etwas wird?

Sie haben eine Idee. Sie verabreden, sich mit einer Taschenlampe, die man auf Rot und Grün stellen kann, zu verständigen: Um Punkt 10 Uhr gibt Lilly ein grünes Lichtzeichen, wenn sie mitfahren darf, und ein rotes, wenn sie nicht mitfahren darf.

Diese Art der Datenübertragung bewährt sich, und Willy und Lilly benutzen sie bei anderen Gelegenheiten wieder. Am nächsten Sonntagabend zum Beispiel soll Lilly von Willy über den Ausgang eines Tennisspiels informiert werden, das im Fernsehen übertragen wird, das sie sich aber nicht ansehen darf.

So verständigen sich Willy und Lilly über die verschiedensten Angelegenheiten. Nun bemerkt Bob, der in einem anderen Haus wohnt, dass sich Willy und Lilly gegenseitig Nachrichten übermitteln. Was kann Bob über diesen Vorgang aussagen? Er kann bestimmt nicht sagen, was der Inhalt der übertragenen Nachrichten ist. Er kann aber sehr wohl sagen, dass jede Nachricht so beschaffen ist, dass sie eine Auswahl aus zwei möglichen Nachrichten darstellt: Es werden ja nur zwei Zeichen verwendet.

Die Datenmenge, die jedes Mal, wenn sich Willy und Lilly über irgendetwas verständigen, übermittelt wird, ist immer gleich groß: Sie beträgt 1 bit.

Man kann diesen Sachverhalt auch so beschreiben: Zwischen Datenquelle und Datenempfänger wird eine Frage vereinbart, auf die es nur die Antworten „ja“ oder „nein“ gibt, also z. B.:

„Darfst du die Radtour machen?“

„Hat XY das Finale gewonnen?“

Wir nennen solche Fragen *Ja-Nein-Fragen*. Wir können also zusammenfassen:

1 bit ist die Datenmenge, die mit der Antwort auf eine Ja-Nein-Frage übertragen wird.

Natürlich ist es egal, was für Zeichen man zur Beantwortung der Frage benutzt. Man kann einfach die beiden Wörter „ja“ und „nein“ benutzen. Genauso gut kann man aber auch einen grünen und einen roten Lichtblitz verwenden, einen blauen und einen weißen oder einen kurzen und einen langen. Oder man kann die Nachricht elektrisch über eine zweiadrige Leitung übertragen, etwa mit Hilfe der beiden Zeichen „Strom eingeschaltet“ und „Strom ausgeschaltet“.

Es ist wichtig sich klar zu machen, dass die Datenmenge unabhängig vom Inhalt der Ja-Nein-Frage ist. Ob es bei der Frage um eine Nichtigkeit geht oder um etwas ungeheuer Wichtiges – die Antwort trägt immer 1 bit.

Wir kommen noch einmal auf Willy und Lilly zurück. Der Datenverkehr zwischen den beiden nimmt immer mehr zu, und schließlich passiert es, dass Willy an einem Abend gleich mehrere Ja-Nein-Fragen zu beantworten hat. Man verabredet daher, dass das Lichtzeichen für die erste Frage um 22:00 h abgeschickt wird, das Lichtzeichen für die zweite Frage um 22:05 h und das für die dritte um 22:10 h. Da mit jedem Zeichen ein bit übermittelt wird, ergibt das an diesem Abend zusammen 3 bit. Wir werden nun sehen, wie man mehrere bit auch mit einem einzigen Zeichen übertragen kann.

Nicht jede Nachricht lässt sich als Antwort auf eine Ja-Nein-Frage darstellen – im Gegenteil: auf die meisten Fragen sind mehr als nur zwei Antworten möglich. Diese Erfahrung müssen auch Willy und Lilly machen.

Im Fernsehen wird an zwei aufeinander folgenden Tagen ein spannender zweiteiliger Krimi gezeigt. Nach dem ersten Teil steht fest, dass eine der folgenden vier Personen einen Mord begangen hat:

- die Putzfrau
- der Briefträger
- die Schwester der Ermordeten
- der Ehemann der Ermordeten.

Willy und Lilly sind gespannt, wer sich als Täter herausstellen wird. Leider muss nun Lilly erfahren, dass am Abend des folgenden Tages ihre Tante zu Besuch kommen will und daher der Fernseher abgeschaltet bleiben soll. Willy muss ihr daher irgendwie mitteilen, wer der Täter ist.

Dabei gibt es allerdings ein Problem: Auf die Frage „Wer ist der Mörder?“ sind nicht zwei, sondern vier Antworten möglich. Das Problem wird aber schnell gelöst. Willy schlägt das folgende Verfahren vor: Es soll eine blaue Farbfolie beschafft werden, so dass er mit seiner Taschenlampe Licht vier verschiedener Farben erzeugen kann – rotes, grünes, blaues und weißes –, und man vereinbart die folgende Zuordnung:

- Putzfrau: grün
- Briefträger: rot
- Schwester: weiß
- Ehemann: blau

Eine solche Vereinbarung nennt man einen *Code*. Willys Verfahren würde zwar sicher funktionieren, aber Lilly hat noch eine andere Idee: „Wir kommen auch mit zwei Farben aus. Du musst mir dann aber zwei Zeichen nacheinander übermitteln. Mit dem ersten sagst du, ob es ein Mann oder eine Frau war und mit dem zweiten, ob der Täter mit der Ermordeten verwandt ist oder nicht.“ Lilly's Code sieht also so aus:

- Putzfrau: grün – grün
- Briefträger: rot – grün
- Schwester: grün – rot
- Ehemann: rot – rot

Einen solchen Code, bei dem nur zwei verschiedene Zeichen verwendet werden, nennt man einen *Binärcode*.

Willy und Lilly sind dabei, einen wichtigen Lehrsatz der Datentechnik zu entdecken. Wir wollen diesen Lehrsatz im Folgenden allgemeiner formulieren. Zunächst stellen wir Lilly's Methode graphisch dar, wir zeichnen einen *Entscheidungsbaum*, Abb. 15.9.

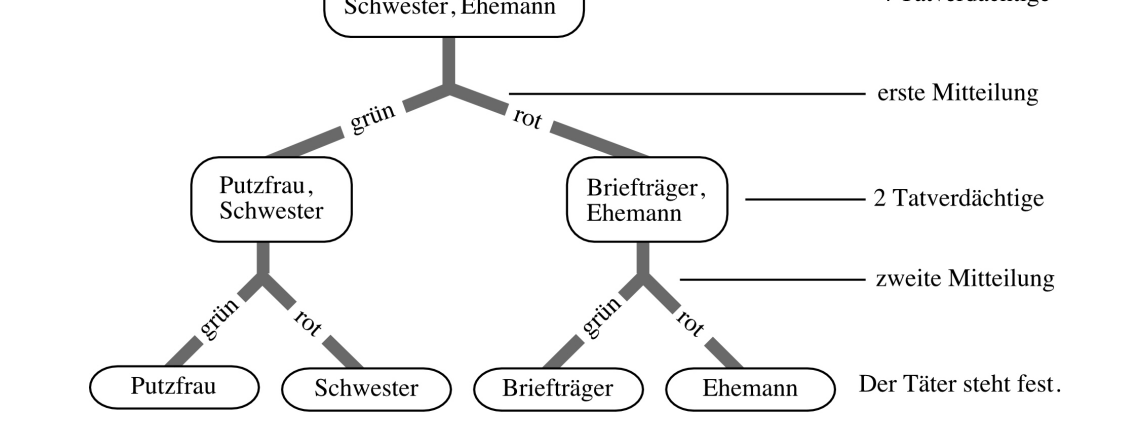


Abb. 15.9
Der Entscheidungsbaum zeigt, dass die Frage nach dem Mörder auf zwei Ja-Nein-Fragen zurückgeführt werden kann.

Die Frage „Wer ist der Mörder?“, auf die vier Antworten möglich sind, wird zurückgeführt auf zwei Fragen mit je zwei Antworten, d. h. auf zwei Ja-Nein-Fragen. Jede der übermittelten Antworten auf diese beiden Ja-Nein-Fragen trägt ein bit. Insgesamt wird also die Datenmenge $H = 2$ bit übertragen.

Nun haben wir aber gesehen, dass man die Nachricht, wer der Täter ist, auch mit einem einzigen Zeichen übertragen kann, nämlich dann, wenn man statt zwei verschiedener Farben vier zur Auswahl hat. Hieraus ergibt sich:

Eine Quelle, die über vier verschiedene Zeichen verfügt, sendet dem Empfänger mit einem Zeichen die Datenmenge $H = 2$ bit zu.

Unsere bisherigen Überlegungen zeigen, dass es von der Zeichenzahl der Quelle abhängt, wie viel bit mit jedem Zeichen übertragen werden. Bei einer Zeichenzahl von 2, d. h. bei einem Binärcode, wird mit jedem Zeichen 1 bit ausgesendet, bei einer Zeichenzahl von 4 sind es 2 bit pro Zeichen.

Es ist nun nicht mehr schwer herauszufinden, wie viel bit pro Zeichen transportiert werden, wenn für die Übertragung noch mehr unterschiedliche Zeichen verwendet werden: Man macht einfach eine Binärkodierung, d. h. man zerlegt die Übertragung in aufeinander folgende Ja-Nein-Übertragungen.

Bild 15.10 zeigt, wie man eine Antwort, die aus 8 möglichen Antworten ausgewählt wird, mit 3 Antworten auf Ja-Nein-Fragen übertragen kann. Es gibt nämlich gerade 8 verschiedene Folgen von Rot- und Grün-Signalen, und jeder Antwort entspricht eine solche Folge. Zusammen überträgt man also 3 bit.

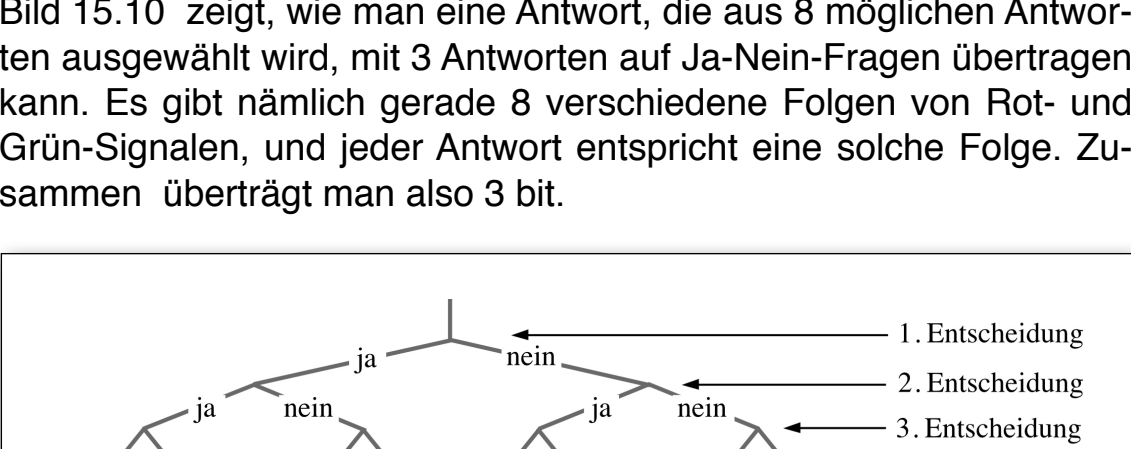


Abb. 15.10
Entscheidungsbaum für drei aufeinander folgende Ja-Nein-Fragen

Stehen 8 verschiedene Zeichen zur Verfügung, so kann man die 3 bit auch mit einem einzigen Zeichen übertragen.

Man sieht, wie sich diese Regel verallgemeinern lässt: Verfügt die Quelle über 16 verschiedene Zeichen, so werden mit einem Zeichen 4 bit übertragen, beträgt die Zeichenzahl 32, so hat man 5 bit pro Zeichen usw.

Beträgt die Zeichenzahl 2^n , so werden pro Zeichen n bit übertragen.

Zeichenzahl	bit/Zeichen
2	1
4	2
8	3
16	4
32	5
64	6
128	7
256	8
512	9
1 024	10
2 048	11
4 096	12
8 192	13
16 384	14
32 768	15
65 536	16
131 072	17
262 144	18
524 288	19
1 048 576	20
2 097 152	21
4 194 304	22

Wenn die Zeichenzahl gleich einer Potenz der Zahl zwei ist, können wir leicht angeben, wie viel bit pro Zeichen übertragen werden. Aber auch wenn die Zeichenzahl keine Zweierpotenz ist, kann die Bitzahl ausgerechnet werden – allerdings braucht man dazu ein mathematisches Werkzeug, das im Unterricht erst später behandelt wird. Immerhin können wir schon jetzt eine Abschätzung geben. Die Zeichenzahl betrage z. B. 25. Diese Zahl liegt zwischen den Zweierpotenzen $16 = 2^4$ und $32 = 2^5$. Daher werden in diesem Fall mit einem Zeichen zwischen 4 und 5 bit übertragen.

Aus Tabelle 15.3 kann man die Bitzahl näherungsweise ablesen, wenn man die Zeichenzahl kennt. Eine solche Tabelle lässt sich leicht mit dem Taschenrechner herstellen.

Tabelle 15.3

Aus einer bestimmten Zweierpotenz bekommt man die nächst höhere, indem man mit 2 multipliziert. So ist

$$2 \cdot 2^3 = 2^4 \text{ oder}$$

$$2 \cdot 8 = 16.$$

Genauso bekommt man die nächst niedrige, indem man durch 2 dividiert:

$$2^4 : 2 = 2^3 \text{ oder}$$

$$16 : 2 = 8.$$

Wir berechnen nun die nächst niedrige Zweierpotenz von 2^1 :

$$2^1 : 2 = 2^0 \text{ oder}$$

$$2 : 2 = 1.$$

Man kann also eine Zahl auch zur nullten Potenz erheben. Jede beliebige Zahl hoch Null ergibt 1 (die einzige Ausnahme ist die Null selbst, der Ausdruck 0^0 ist nicht definiert). Insbesondere ist auch $2^0 = 1$. Wir können damit Tabelle 15.3 vervollständigen. Beträgt die Zeichenzahl 1, so wird mit jedem Zeichen 0 bit übertragen. Ist das überraschend? Eigentlich nicht. Wenn Willy und Lilly verabreden, dass Willy heute Abend um 22 Uhr ein ganz bestimmtes Zeichen abschickt, so erfährt Lilly bestimmt nichts Neues, wenn das Zeichen bei ihr ankommt.

Wie sieht es aber im folgenden Fall aus: Willy verabredet mit Lilly, dass er um 22 h ein weißes Blinkzeichen sendet, falls der HSV ein bestimmtes Fußballspiel gewonnen hat. Hat der HSV nicht gewonnen, so sendet er kein Zeichen. Hier wird eindeutig eine Nachricht übertragen, aber es wird scheinbar nur ein Zeichen benutzt. Tatsächlich gibt es aber auch hier zwei Zeichen. Die Taschenlampe kann nämlich um 22 h entweder ein- oder ausgeschaltet sein. Die Zeichen sind also „hell“ und „dunkel“.

Eine ähnliche Situation liegt vor bei der Schulklingel, der Hausklingel, der Autohupe, der Sirene, etc. In allen diesen Fällen gibt es zwei Zeichen, z. B. „Schulglocke klingelt“ und „Schulglocke klingelt nicht“.

Daten umladen und Daten umkodieren sind zwei ganz ähnliche Vorgänge, und die Unterscheidung zwischen ihnen ist etwas willkürlich. Wir betrachten noch einmal die beiden Codes von Willy und Lilly. Man kann ohne weiteres Nachrichten, die mit Willy's Code, d. h. mit Licht vier verschiedener Farben, ankommen, in Lilly's Code, d. h. in Lichtzeichen zweier verschiedener Farben umkodieren, und diesen Vorgang graphisch genauso wie einen Umladevorgang darstellen, Bild 15.11.

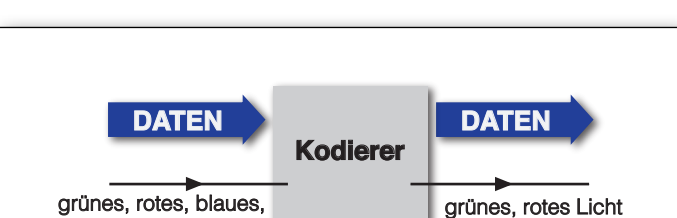


Abb. 15.11
Ein Umkodierer wird durch dasselbe Symbol dargestellt wie ein Datenumlader.

Bei vielen modernen Anwendungen der Datentechnik werden Daten binär codiert: Computer und Internet arbeiten mit Binärzeichen, ebenso wie der Taschenrechner, das Smartphone und der MP3-Player.

15.3 Beispiele für Datentransporte

Der Morse-Code

Bild 15.12 zeigt, wie man Telegramme übertragen hat. Quelle und Empfänger sind hier Teile eines elektrischen Stromkreises. Sie sind durch zwei Leitungen miteinander verbunden.

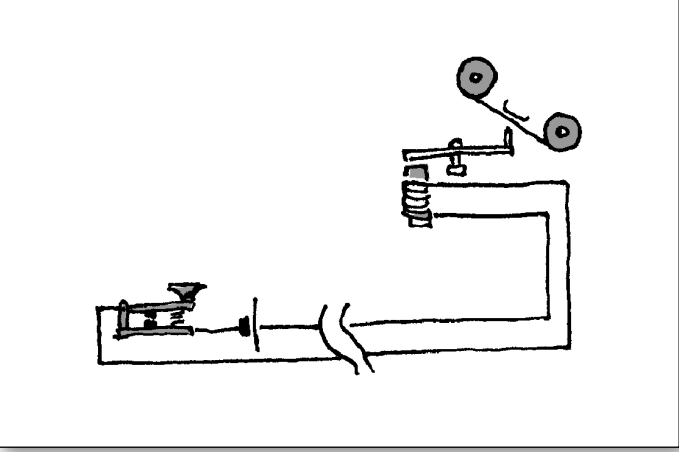


Abb. 15.12
Morseübertragung

Die Quelle ist eine Taste, durch die man den Stromkreis schließen kann. Wenn man den Stromkreis auf diese Weise schließt, drückt beim Empfänger ein Elektromagnet einen Schreibstift gegen ein vorbeilaufendes Papierband. Zur Datenübertragung wurde der Morse-Code verwendet, Bild 15.13. Der Morse-Code benutzt vier Zeichen: „Punkt“ (= kurzes Schließen des Stromkreises), „Strich“ (= längeres Schließen des Stromkreises), „kurze Pause“ (innerhalb eines Buchstabens) und „längere Pause“ (zwischen zwei Buchstaben). Da der Code vier Zeichen hat, werden pro Zeichen 2 bit übertragen. Der Morse-Code wird heute noch in der Schifffahrt und von Amateurfunkern verwendet.

a .---	l .--..	w .-.-.-	:	----
b -...-	m --	x -.-.-	1	-----
c -.-.-.	n --.	y -.-.-	2	-----
d -..--	o ---	z --.-.-	3	-----
e .-.	p .-.-.-	ä .-.-.-	4	-----
f .-.-.-	q -.-.-.-	ö -.-.-.-	5	-----
g -.-.-	r .-.-.	ü .-.-.-	6	-----
h-	s ...	ch -.-.-.-	7	-----
i ..-	t -	Punkt .-.-.-.-	8	-----
j .-.-.-	u .-.-	Komma -.-.-.-.-	9	-----
k -.-.-	v	? -.-.-.-.-	0	-----

Abb. 15.13
Der Morse-Code

Die Schrift

Eins der wichtigsten Verfahren, Daten zu speichern und zu transportieren, ist die Schrift. Wie viel bit enthält ein Schriftzeichen? Wir müssen zunächst feststellen, wie viele verschiedene Schriftzeichen es gibt: Groß- und Kleinbuchstaben, Ziffern, Satzzeichen, Rechenzeichen und andere Sonderzeichen. Auch der Zwischenraum zwischen zwei Buchstaben stellt ein Zeichen dar. Wir nehmen an, dass nur diejenigen Zeichen verwendet werden dürfen, die man mit der Tastatur des Computers erzeugen kann. Die Tastatur hat etwa 50 Tasten. Jede Taste ist doppelt belegt, d.h. je nachdem ob man die Umschalttaste drückt oder nicht wird ein anderes Zeichen geschrieben. Bei den Buchstabentasten sind das jeweils der Klein- und der Großbuchstabe. Insgesamt kann die Schreibmaschine also etwa 100 Zeichen, d.h. zwischen 2⁶ und 2⁷ Zeichen schreiben. Jedes Zeichen trägt damit knapp 7 bit.

Bilder

Ein Computer erzeugt auf seinem Bildschirm ein Bild. Welche Datenmenge hat der Computer dazu zum Bildschirm geschickt? Bei einem typischen Computer besteht das Bild aus etwa 1600 · 1200 = 1 920 000 Bildpunkten, den so genannten Pixeln. Wir nehmen als erstes an, es handle sich um einen Schwarz-Weiß-Bildschirm. Jeder Bildpunkt kann entweder schwarz oder weiß sein. Für jedes Pixel muss der Rechner 1 bit abschicken, für alle Punkte zusammen also rund 2 Mbit. Tatsächlich kann der Computer aber ein Farbbild erzeugen, wobei ein Bildpunkt beim Computer eine von 16 777 216 verschiedenen Farben annehmen kann. Da 16 777 216 = 2²⁴ ist, muss der Rechner für jeden Bildpunkt 24 bit abschicken, für das ganze Bild also

24 · 2 Mbit ≈ 50 Mbit.

Wenn ein Bild gespeichert wird, wird es gewöhnlich „komprimiert“. Man nutzt dabei aus, dass die Pixel von ganzen Bereichen des Bildes gleich aussehen. So wird eine Bilddatei mit der jpeg-Kodierung auf ein Zehntel bis ein Hunderstel verkleinert.

Die Datenmenge eines Messwerts

Wenn jemand eine Messung macht, bekommt er Daten über den Gegenstand, an dem er die Messung durchführt.

Eine Balkenwaage sei bis zu 5 kg belastbar. Der Gewichtssatz enthalte als kleinstes Gewichtsstück ein 1-g-Gewicht. Auf die Frage „Wie schwer ist der Gegenstand?“ kann die Waage damit 5000 verschiedene Antworten geben. Die Zeichenzahl ist also 5000 und die Datenmenge, die mit der Antwort kommt, etwa 12 bit. Eine moderne Analysenwaage liefert bis zu 20 bit pro Wägung.

Um die Datenmenge zu berechnen, die man beim Ablesen einer Analog-Skala, wie z. B. der Skala eines Thermometers, bekommt, muss man sich als Erstes darüber klar werden, welche benachbarten Werte auf der Skala noch unterschieden werden können. Beim Thermometer beträgt die Ablesegenauigkeit etwa 1°C. Wenn der Messbereich von –30°C bis +90°C geht, ergibt sich eine Zeichenzahl von 120. Wenn man die Temperatur abliest, bekommt man also etwa 7 bit.

Aufgaben

- 1. Im Bereich der Deutschen Post können 100 000 verschiedene Postleitzahlen benutzt werden. Wie groß ist die Datenmenge, die von einer Postleitzahl getragen wird?
- 2. Wie groß die Datenmenge einer Telefonnummer ist, hängt davon ab, ob man die Nummer aus einem Ortsnetz, aus dem nationalen Netz oder dem internationalen Netz auswählt. Schätze die Datenmenge einer Telefonnummer aus einem Ortsnetz mit 10 000 Anschlüssen ab.
- 3. Die chinesische Schrift kennt sehr viele verschiedene Zeichen. Normalerweise benutzt man etwa 2000. Wie viel bit trägt ein Schriftzeichen, wenn man von dieser Zahl ausgeht?
- 4. Eine Quelle sendet mit jedem Zeichen 5 bit aus. Über wie viel verschiedene Zeichen verfügt die Quelle?
- 5. Eine Quelle hat die Zeichenzahl 3. Zeichne für diese Quelle einen Entscheidungsbaum. (Er soll drei aufeinander folgende Entscheidungen umfassen.) Gib eine Abschätzung für die Datenmenge an, die ein Empfänger mit drei aufeinander folgenden Zeichen von dieser Quelle erhält.
- 6. Quelle A hat eine Zeichenzahl, die mit einer Zweierpotenz übereinstimmt. Quelle B hat eine doppelt so große Zeichenzahl. Was folgt hieraus für die Datenmengen, die beide Quellen pro Zeichen aussenden?
- 7. Ein Zaubertrick mit Karten:

Man benutzt 16 verschiedene Karten eines beliebigen Kartenspiels. Der Zauberer lässt einen Zuschauer eine Karte ziehen. Der Zuschauer betrachtet die Karte so, dass sie der Zauberer nicht sehen kann. Die Karte wird wieder in das Kartenspiel gesteckt, und die Karten werden gemischt. Der Zauberer deckt nun die Karten, eine nach der anderen, auf. Dabei legt er sie auf vier verschiedene Stapel: eine Karte auf den ersten, die nächste auf den zweiten, eine auf den dritten, eine auf den vierten, dann wieder eine auf den ersten usw., bis alle 16 Karten auf dem Tisch liegen. Der Zuschauer muss nun sagen, auf welchem der vier Stapel seine Karte liegt. Der Zauberer macht dann aus den vier Stapeln wieder ein Paket und breitet die Karten noch einmal in vier Stapeln aus, und noch einmal sagt der Zuschauer, auf welchem Stapel seine Karte liegt. Der Zauberer kennt jetzt die Karte, die sich der Zuschauer gemerkt hat: Er packt die vier Stapel wieder zusammen und blättert dann eine Karte nach der anderen auf, bis er zu der Karte kommt, die sich der Zuschauer gemerkt hatte.

Welche Datenmenge muss der Zauberer bekommen, um eine von 16 Karten zu identifizieren? Wie viel bit bekommt er jedes Mal, wenn der Zuschauer den Stapel bezeichnet, in dem sich die Karte befindet? Wie funktioniert der Trick?

15.4 Die Datenstromstärke

Immer wenn etwas strömt – es kann sich dabei um Wasser, Autos, Menschen, Energie, Elektrizität oder irgendwelche anderen Dinge, Stoffe oder physikalischen Größen handeln –, kann man nach der Stromstärke fragen. Wie wir wissen, erhält man die Stärke eines Stroms, indem man die Menge, die in einer bestimmten Zeit an irgend einer Stelle des Stroms vorbeifließt, durch die Zeit teilt, die diese Menge zum Vorbeifließen braucht.

Unter der Datenstromstärke an irgendeiner Stelle eines Übertragungsweges versteht man entsprechend den Quotienten aus der Datenmenge, die dort in einer bestimmten Zeit vorbeifließt, und der Zeit, die für das Vorbeifließen benötigt wurde:

$$\text{Datenstromstärke} = \frac{\text{Datenmenge}}{\text{Zeit}}$$

oder in Symbolen

$$I_H = \frac{H}{t}$$

Als Maßeinheit für die Datenstromstärke I_H ergibt sich bit/s. Je mehr bit in einer Sekunde übertragen werden, desto größer ist die Datenstromstärke.

Die Datenstromstärke ist eine nützliche Größe. Sie gestattet es, die Leistungsfähigkeit von Datenübertragungsvorrichtungen miteinander zu vergleichen. Wir betrachten einige Beispiele von Datenströmen.

Telefon und Radio

Wenn man telefoniert, fließt ein Datenstrom von etwa 50 kbit/s. Die Qualität der Übertragung von akustischen Daten per Telefon ist nicht sehr hoch. Für eine bessere Übertragung wird eine größere Datenstromstärke gebraucht. Daher ist die Datenstromstärke bei einer CD viel größer als beim Telefon. Sie beträgt etwa 1000 kbit/s. Auch die Datenmenge akustischer Daten kann vermindert werden, durch geschickte Kodierung und durch Weglassen von Information, die man gar nicht wahrnehmen würde. So wird die Datenmenge durch die MP3-Kodierung auf etwa ein Zehntel vermindert.

Fernsehen

Wir hatten früher (in Abschnitt 15.3) die Datenmenge eines einzigen, stehenden Fernsehbildes berechnet. Es ergab sich $H = 50$ Mbit. Nun werden bei einer Fernsehsendung 25 Bilder pro Sekunde übertragen. Dadurch entsteht der Eindruck einer stetigen Bewegung der Objekte auf dem Bildschirm. Aus diesen Werten ergibt sich die Stärke des Datenstroms, der vom Fernsehsender zum Fernsehempfänger fließt:

$$\begin{aligned} &50 \text{ Mbit/Bild} \cdot 25 \text{ Bilder/Sekunde} \\ &= 1250 \text{ Mbit/Sekunde} \approx 1000 \text{ Mbit/Sekunde.} \end{aligned}$$

Wieder gilt, dass dieser Datenstrom durch geeignetes Kodieren vermindert werden kann. In jedem Fall gilt aber die Regel:

Bei der optischen Wahrnehmung fließt ein Datenstrom der etwa 1000 mal so groß ist wie bei der akustischen Wahrnehmung.

Das Internet

Wenn man Daten aus dem Internet holt, wird die mittlere Datenstromstärke auf dem Bildschirm angezeigt. Sie hängt davon ab, wie stark das Netz gerade belastet ist und wo sich der Server befindet, von dem man die Daten holt. Sie kann bekanntlich sehr unterschiedlich sein.

Aufgaben

1. Ein mit der Computertastatur getipptes Zeichen trägt etwa 7 bit. Welche Stärke hat der Datenstrom, der von der Tastatur zum Rechner fließt, wenn mit 180 Anschlägen pro Minute getippt wird?
2. Du bist dabei, Daten aus dem Internet herunterzuladen. Die Datenstromstärke beträgt 25 kbit/s. Wie lange dauert der Empfang eines Buches? (Rechne mit 250 Seiten, 40 Zeilen pro Seite, 70 Zeichen pro Zeile und 7 bit pro Zeichen.)

16

Elektrizität und elektrische Ströme

Wie die Mechanik vom Impuls und dessen Übertragung handelt und die Wärmelehre von der Wärme und Wärmeübergängen, so beschäftigt sich die Elektrizitätslehre mit der Elektrizität und den Strömen der Elektrizität.

Was versteht man unter Elektrizität? Auf diese Frage können wir zunächst nur eine sehr grobe, provisorische Antwort geben. Was Elektrizität ist, wirst du aber umso besser verstehen, je weiter du dich in diesem und in den folgenden Kapiteln vorgearbeitet hast. Im Augenblick kann man die Frage etwa so beantworten: Elektrizität ist das, was in den Drähten des Kabels eines elektrischen Geräts „fließt“ – falls das Gerät eingeschaltet ist. Man kann sich Elektrizität vorstellen als eine Art Zeug, das sich irgendwo befindet, und das von einer Stelle zu einer anderen gelangen kann – ähnlich wie wir uns Impuls und Entropie als eine Art Zeug vorstellen können.

Wir sehen es einem Körper meist an, ob er Impuls hat oder nicht: Wir sehen es daran, ob er sich bewegt oder nicht. Wir „sehen“ es einem Körper auch an, ob er viel oder wenig Entropie enthält: Wir merken es an seiner Temperatur. Wir haben dagegen kein Sinnesorgan für den Elektrizitätsinhalt eines Gegenstandes. Man spürt zwar die Elektrizität, wenn man einen elektrischen Schlag bekommt, aber das wollen wir natürlich vermeiden, denn es ist gefährlich.

Du weißt, dass die Elektrizität in der Technik eine wichtige Rolle spielt. Du wirst in den folgenden Kapiteln die Funktionsweise einiger technischer Geräte kennen lernen. Man kann die technischen Anwendungen der Elektrizität in zwei große Bereiche einteilen.

Die eine Klasse von Anwendungen hat damit zu tun, dass man mit Hilfe der Elektrizität Energie übertragen und speichern kann. Die Elektrizität ist nämlich ein sehr praktischer Energieträger. Viele elektrische Geräte dienen daher dazu, Energie von Elektrizität auf einen anderen Energieträger oder von einem anderen Energieträger auf Elektrizität umzuladen. Zu diesen Geräten gehören z. B. Elektromotor, Generator und alle elektrischen Heizgeräte.

Bei der zweiten Klasse von technischen Anwendungen wird die Elektrizität zur Übertragung, zur Speicherung und Verarbeitung von *Daten* benutzt: von Musik, geschriebenen und gesprochenen Texten, von Bildern, Zahlen und anderen Zeichen. Man nennt diesen Bereich der Technik Elektronik.

In der Natur scheint die Elektrizität bei oberflächlicher Betrachtung keine große Bedeutung zu haben. Die einzige elektrische Erscheinung, die jeder kennt, ist das Gewitter. Aber der Schein trügt. Tatsächlich wird die Struktur der Mikrowelt, der Welt der Atome und Moleküle, zum großen Teil durch die Elektrizität bestimmt. Die Atome verdanken der Elektrizität ihren inneren Aufbau, und der Zusammenhalt der Atome untereinander wird erst durch die Elektrizität ermöglicht. Mit diesen Fragen beschäftigt sich die Atomphysik.

16.1 Der elektrische Stromkreis

Abb. 16.1 zeigt eine Glühlampe, die über einen Schalter an eine Batterie angeschlossen ist. Denselben Aufbau hat eine Taschenlampe. 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.

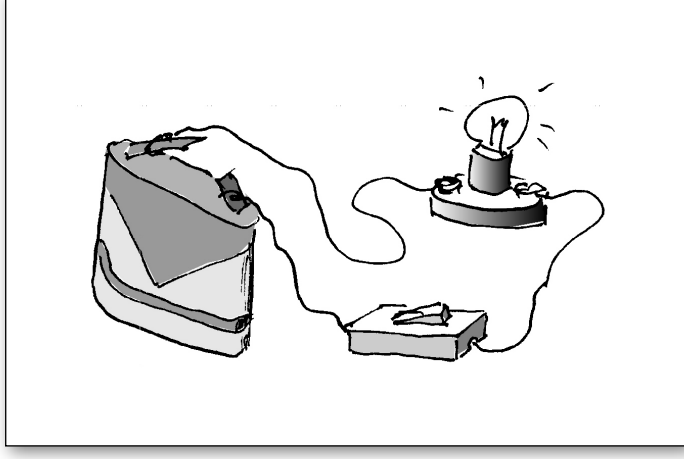


Abb. 16.1
Einfacher Stromkreis

Der Träger der Energie, die Elektrizität, nimmt einen anderen Weg: Die Elektrizität fließt „im Kreis herum“. Sie kommt an einem der beiden Anschlüsse, am Plusanschluss, 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 Minusanschluss der Batterie, und durch die Batterie hindurch wieder zum Plusanschluss. 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*.

Die Elektrizität kann nicht in jedem beliebigen Material fließen. Stoffe, in denen sie gut fließt, nennt man elektrische *Leiter*. Stoffe, in denen sie nicht fließen kann, nennt man elektrische *Nichtleiter*. Zu den Leitern gehören alle Metalle. Nichtleiter sind Luft, Glas und die meisten Kunststoffe.

Die Elektrizität ist eine physikalische Größe. Das Symbol für diese Größe ist Q . Sie wird gemessen in Coulomb, abgekürzt C.

Ein elektrischer Stromkreis hat eine Ähnlichkeit mit einem Hydraulikstromkreis, wie er zum Beispiel beim Bagger verwendet wird, Abb. 16.2. Auch hier fließt der Energieträger, nämlich das Hydrauliköl, in einem geschlossenen Stromkreis.

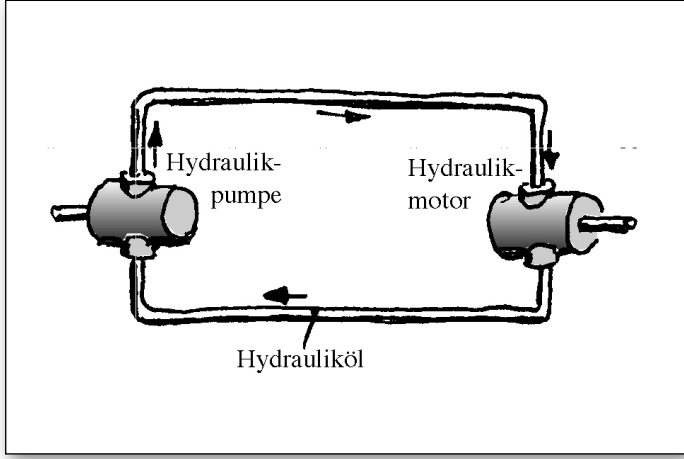


Abb. 16.2
Der Hydraulikstromkreis hat große Ähnlichkeit mit einem elektrischen Stromkreis.

Die Flussbilder, Abb. 16.3 und 16.4, lassen die Ähnlichkeit erkennen.

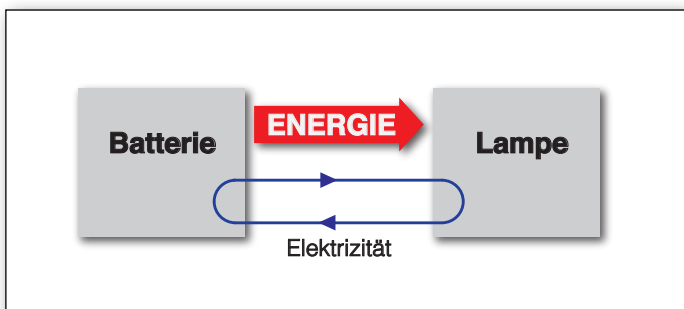


Abb. 16.3
Flussbild des elektrischen Stromkreises von Abbildung 16.1.

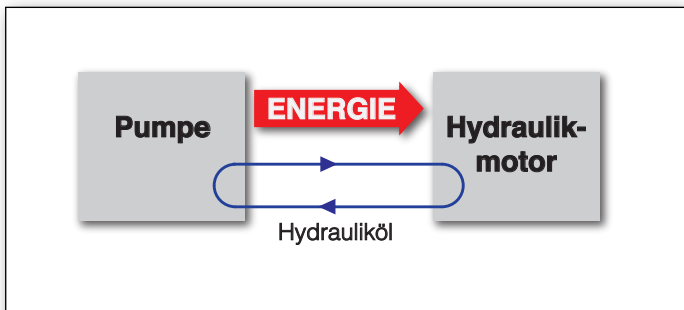


Abb. 16.4
Flussbild des Hydraulikstromkreises von Abbildung 16.2

So 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 uns die Batterie daher als eine *Elektrizitätspumpe* vorstellen.

Es gibt noch andere Quellen, die Energie mit dem Träger Elektrizität abgeben, d. h. andere Elektrizitätspumpen. Eine ist der Fahrraddynamo. Im Prinzip dasselbe Gerät befindet sich unter dem Namen Lichtmaschine in jedem Auto. Sehr große Dynamos, wie sie in Elektrizitätswerken stehen, nennt man Generatoren. Einen weiteren Typ von Elektrizitätspumpen stellen die Solarzellen dar. Während der Dynamo seine Energie mit dem Drehimpuls bekommt, empfängt die Solarzelle ihre Energie mit dem Licht.

Batterie, Dynamo und Solarzelle sind Elektrizitätspumpen.

Der Stromkreis von Abb. 16.1 sei zunächst unterbrochen. Wir schließen den Schalter, es fließt Elektrizität durch die Lampe. Woher kommt diese Elektrizität? 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 Plusanschluss, nur so viel Elektrizität abgeben, wie sie am Minusanschluss 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, die zu fließen beginnt, sobald man den Draht oder das Metallstück in einen Stromkreis einbaut.

Baut man einen elektrischen Stromkreis auf, so braucht man sich also nicht um das Füllen mit Elektrizität zu kümmern. Es ist so, als ob man Hydraulikstromkreise aufbaute aus Pumpen, Schläuchen und Motoren, die bereits mit Hydrauliköl gefüllt sind. Solche Stromkreise könnten sofort arbeiten, sie brauchten nicht erst noch mit Öl gefüllt zu werden.

Wir haben es im Folgenden viel mit elektrischen Stromkreisen zu tun, auch mit komplizierteren. Es lohnt sich daher, für ihre Darstellung Symbole einzuführen. Abb. 16.5 zeigt die Symbole einer Batterie, eines geöffneten Schalters, einer Glühlampe und eines Elektromotors. Ein Draht, d. h. eine Elektrizitätsleitung, wird einfach durch einen geraden Strich dargestellt.

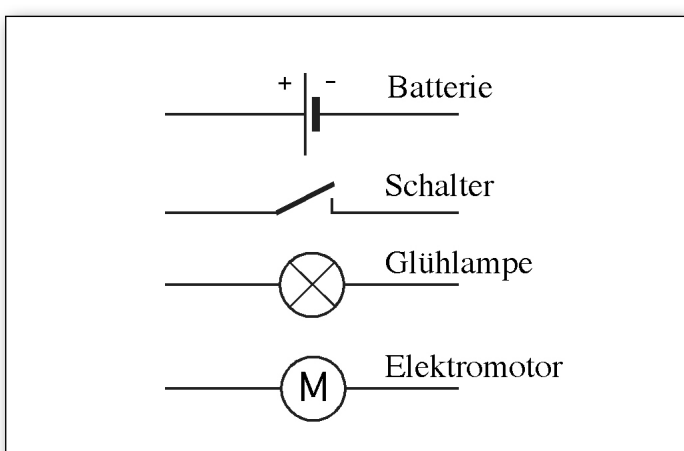


Abb. 16.5
Symbole einiger elektrischer Bauelemente: Batterie, geöffneten Schalter, Glühlampe und Elektromotor

In Abb. 16.6 ist der Stromkreis von Abb. 16.1 mit Hilfe dieser Symbole dargestellt, und zwar einmal mit geöffnetem und einmal mit geschlossenem Schalter.

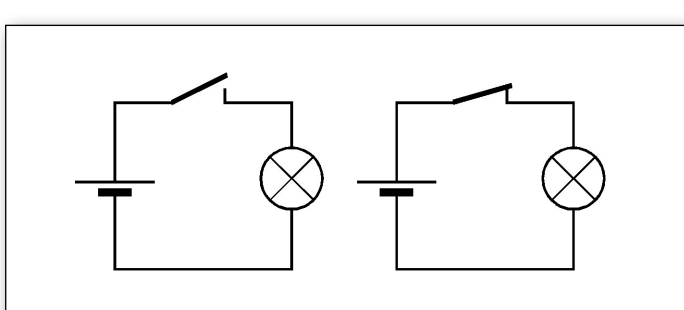


Abb. 16.6
Symbolische Darstellung des Stromkreises von Abbildung 16.1 mit zwei verschiedenen Schalterstellungen

Wir nennen einen Aufbau aus Drähten, Schaltern, Batterien, Lampen etc. oft eine *Schaltung*.

16.2 Die elektrische Stromstärke

Wir betrachten eine bestimmte Stelle P eines elektrischen Stromkreises, Abb. 16.7. An dieser Stelle kann pro Sekunde viel oder wenig Elektrizität vorbeifließen, je nachdem was für eine Batterie und was für eine Lampe wir verwenden. Man sagt, die *Stärke des elektrischen Stroms* kann größer oder kleiner sein. Ähnlich wie bei anderen Stromstärken (z. B. Energiestromstärke, Wasserstromstärke) legt man fest:

elektrische Stromstärke = $\frac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{Zeit}}$

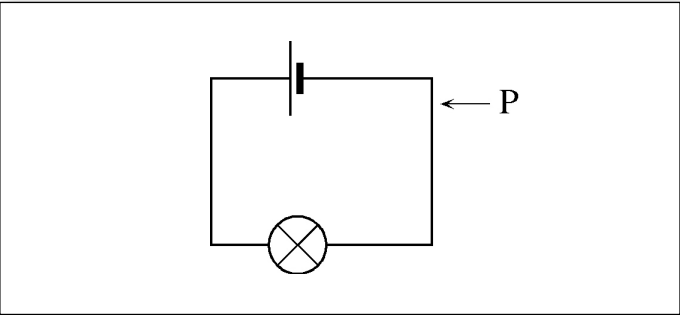


Abb. 16.7
An der Stelle P des Stromkreises fließt pro Sekunde eine bestimmte Menge Elektrizität vorbei.

Die elektrische Stromstärke kürzt man durch den Buchstaben *I* ab. Es ist also

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

Als Maßeinheit für die elektrische Stromstärke ergibt sich Coulomb/Sekunde = C/s.

Für diese zusammengesetzte Maßeinheit benutzt man meist einen eigenen Namen: *Ampere*, abgekürzt A. Es ist also A = C/s.

In Tabelle 16.1 sind die Namen der neuen Größen zusammen mit ihren Maßeinheiten und den jeweiligen Abkürzungen noch einmal zusammengefasst.

Name der Größe	Elektrizitätsmenge	elektrische Stromstärke
Abkürzung	Q	I
Name der Maßeinheit	Coulomb	Ampere
Abkürzung	C	A

Tabelle 16.1

Um uns eine Vorstellung davon zu machen, welche Ströme schwach sind und welche stark, wollen wir einige Messungen machen. Das Gerät, mit dem man elektrische Stromstärken misst, heißt *Ampere-meter*. Ein Amperemeter hat zwei Anschlüsse, Abb. 16.8.

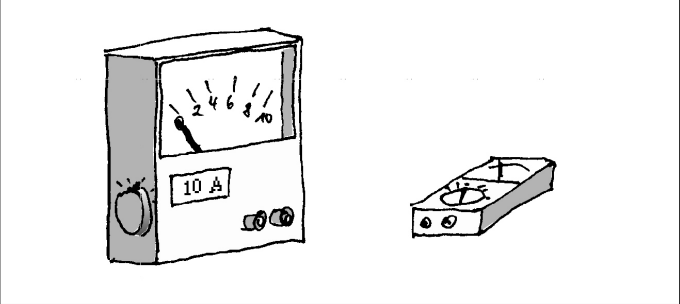


Abb. 16.8
Zwei Amperemeter

Um die Stärke des Stroms in dem Draht von Abb. 16.9a zu messen, trennt man den Draht durch, Abb. 16.9b. Dabei entstehen zwei neue Enden. Diese Enden verbindet man mit den Anschlüssen des Amperemeters, Abb. 16.9c. Die Elektrizität muss jetzt durch das Amperemeter hindurchfließen.

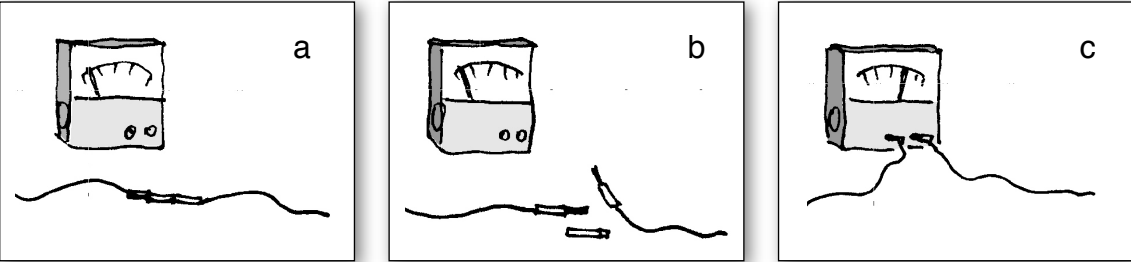


Abb. 16.9
Zur Messung der Stärke des elektrischen Stroms in einem Draht

Um die Stärke des elektrischen Stroms in einer Leitung zu messen, trennt man die Leitung durch und verbindet die beiden neu entstandenen Enden mit den Anschlüssen des Amperemeters.

Abb. 16.10 zeigt einen Stromkreis, in den ein Amperemeter eingebaut ist (Symbol des Amperemeters: ein Kreis mit dem Buchstaben A). Das Amperemeter zeigt 0,5 A an, einen für ein kleines Lämpchen typischen Wert.

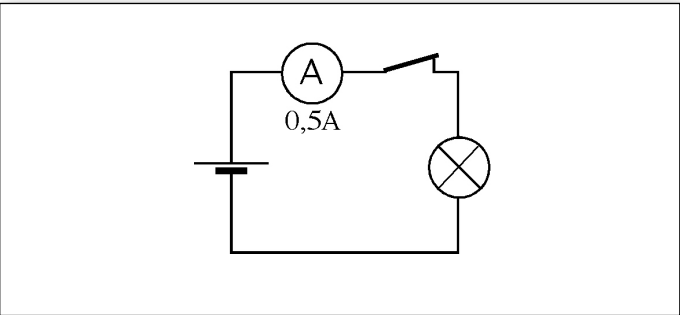


Abb. 16.10
Stromkreis von Abb. 16.1, in den ein Amperemeter eingebaut wurde

Setzt man das Amperemeter an eine andere Stelle des Stromkreises, Abb. 16.11, so zeigt es natürlich dasselbe an. An jeder Stelle des Stromkreises muss ja pro Sekunde dieselbe Elektrizitätsmenge fließen, oder genauer: durch jeden Querschnitt, den man durch den Draht legen kann.

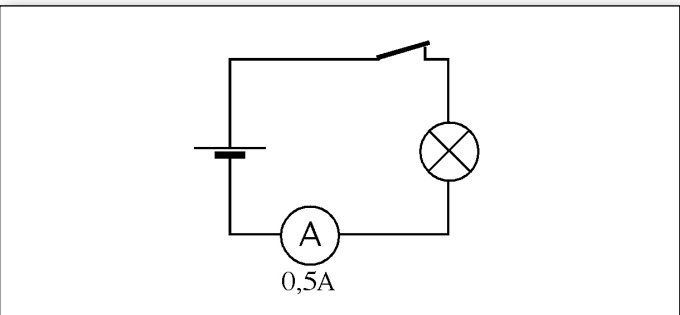


Abb. 16.11
Das Amperemeter zeigt immer denselben Wert an, egal an welcher Stelle des Stromkreises es sich befindet.

Wir können auch mehrere Amperemeter in den Stromkreis einbauen, ohne dass sich an der Stromstärke etwas ändern würde, Abb. 16.12. Jedes Amperemeter zeigt jetzt die Stromstärke 0,5 A an. Die Situation ist ähnlich, wie wenn man die Zeit, die jemand für einen Hundertmeterlauf braucht, mit drei Stoppuhren gleichzeitig misst.

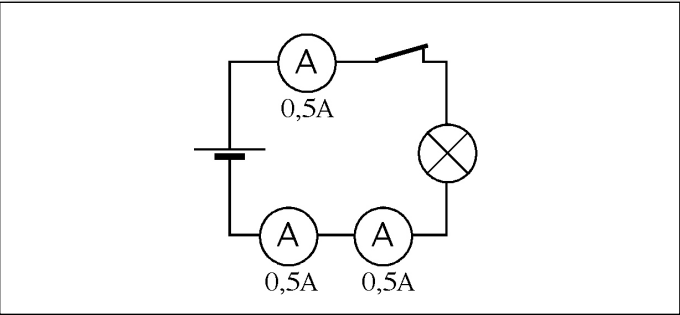


Abb. 16.12
Mehrere Amperemeter „hintereinander geschaltet“ zeigen dasselbe an wie ein einziges.

In Tabelle 16.2 sind einige typische Stromstärkewerte aufgeführt.

Stärke des Stroms	
durch eine 18-W-Lampe	0,078 A
in den Leitungen eines Taschenrechners	0,01 mA
durch den Motor einer Elektrolokomotive	500 A
in einem Blitz	einige 1000 A
durch einen Spielzeugmotor	1 A

Tabelle 16.2

16.3 Die Knotenregel

Eine Stelle, an der sich mehrere Ströme treffen, nennen wir einen *Knoten*, egal um was für Ströme es sich handelt: Energieströme, Wasserströme oder auch elektrische Ströme.

Abb. 16.13 zeigt eine Anordnung aus elektrischen Bauteilen, die nicht mehr einen einfachen Stromkreis darstellt. Man nennt eine solche Anordnung einen verzweigten Stromkreis.

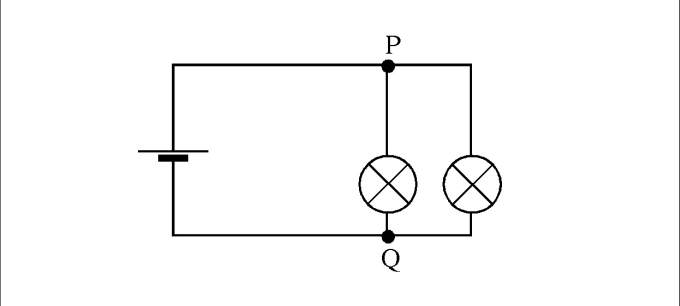


Abb. 16.13
Der verzweigte Stromkreis enthält die beiden Knoten P und Q.

Die Schaltung von Abb. 16.13 enthält zwei Knoten P und Q. Die Elektrizität kommt vom Plusanschluss der Batterie. Im Knoten P verzweigt sich der Elektrizitätsstrom. Ein Teil der Elektrizität fließt durch die linke Lampe, der Rest durch die rechte. Im Knoten Q fließen die beiden Ströme wieder zusammen. Von Q aus fließt dann die gesamte Elektrizität weiter zum Minusanschluss der Batterie und durch die Batterie zurück zum Plusanschluss.

Abb. 16.14 zeigt dieselbe Anordnung wie Abb. 16.13, nur wurden hier noch drei Amperemeter eingebaut. Das Amperemeter, das die Stärke I_1 des Stroms in Leitung 1 misst, also vor der Verzweigung P, zeigt 4 Ampere an. Zum Knoten P hin fließen also pro Sekunde 4 Coulomb. Das Amperemeter in Leitung 2 zeigt 2,5 A an. Durch diese Leitung fließen also pro Sekunde 2,5 C vom Knoten P weg. Wie viel zeigt das dritte Amperemeter an? Damit die Bilanz stimmt, müssen von P durch Leitung 3 pro Sekunde 1,5 C wegwfließen. Die Stärke des Stroms in Leitung 3 ist also 1,5 A.

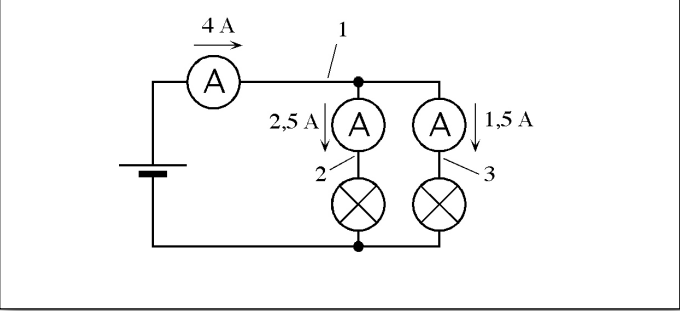


Abb. 16.14
In die Schaltung von Abbildung 16.13 wurden drei Amperemeter eingebaut.

Die Situation ist dieselbe wie beim Zusammenfluss von zwei Flüssen, Abb. 16.15. Auch hier muss vom „Knoten“ genauso viel wegwfließen wie zum „Knoten“ hin.

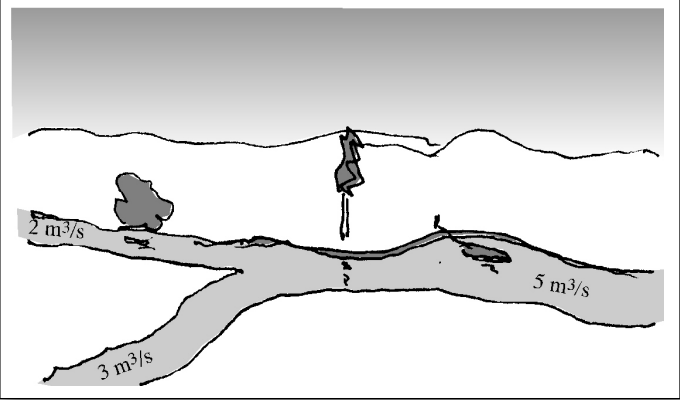


Abb. 16.15
Auch für den Zusammenfluss von Flüssen gilt die Knotenregel.

Abb. 16.16 zeigt einen Ausschnitt aus einer komplizierteren elektrischen Schaltung. Hier treffen sich 6 Leitungen in einem Knoten. Überprüfe, ob die Bilanz stimmt.

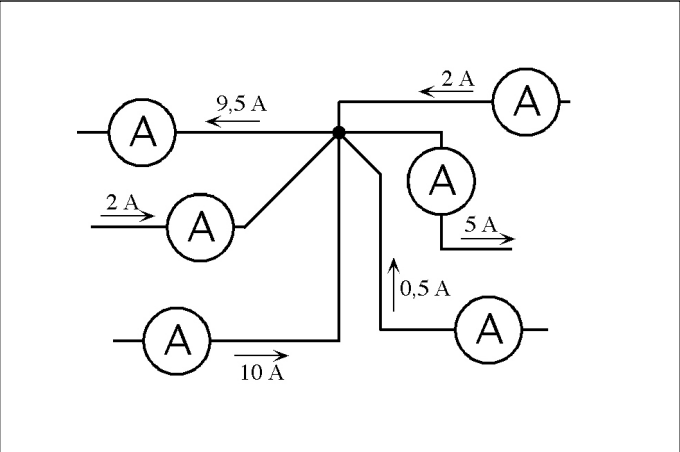


Abb. 16.16
Ausschnitt aus einer komplizierteren Schaltung. Hier treffen sich sechs Leitungen in einem Knoten.

Wir haben hier immer unsere altbekannte Knotenregel angewendet:

Die zu einem Knoten hinfließenden Ströme sind zusammen genauso stark wie die wegwfließenden.

Aufgaben

- Wie stark ist der elektrische Strom, der an der Stelle P in Abb. 16.17a fließt? In welche Richtung fließt er?
- Wie stark ist der elektrische Strom, der an der Stelle P in Abb. 16.17b fließt? In welche Richtung fließt er?
- Was lässt sich über die Stromstärken an den Stellen P und Q in Abb. 16.18a sagen?
- (a) Baue in die Schaltung von Abb. 16.18b zwei Schalter ein, so dass sich die Lampen unabhängig voneinander ein- und ausschalten lassen. (b) Baue einen einzigen Schalter ein, durch den sich beide Lampen gemeinsam ein- und ausschalten lassen.
- Was zeigen die Amperemeter 2, 3 und 4 in Abb. 16.19a an?
- Wie stark ist der elektrische Strom an der Stelle P in Abb. 16.19b? Baue in den Stromkreis ein Amperemeter ein, das die Stärke des Stroms durch den Motor misst, und eins, das die Stärke des Stroms durch die Lampe misst.

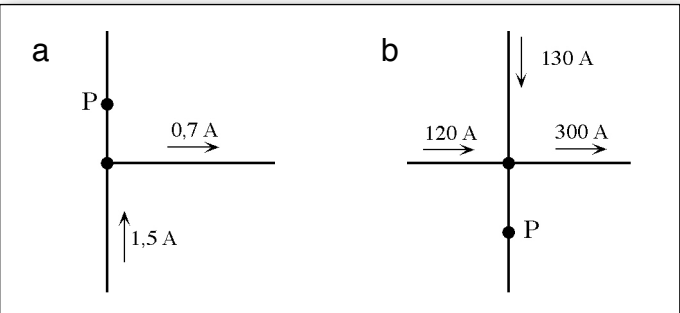


Abb. 16.17
Zu den Aufgaben 1 und 2

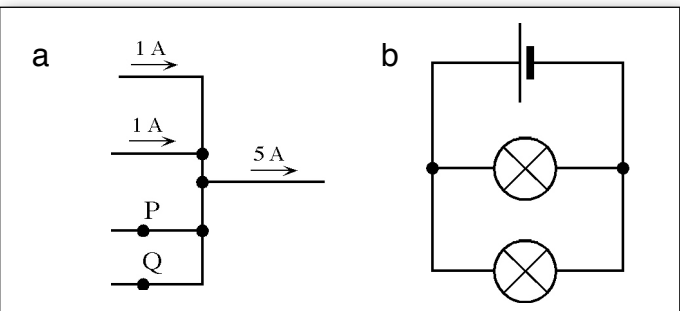


Abb. 16.18
Zu den Aufgaben 3 und 4

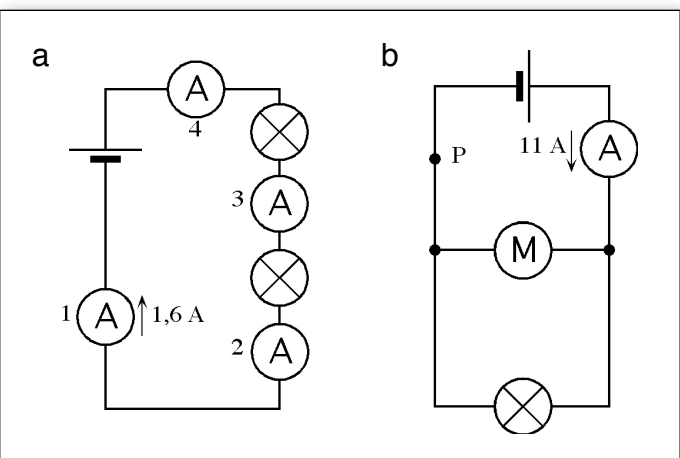


Abb. 16.19
Zu den Aufgaben 5 und 6

16.4 Das elektrische Potenzial

Eine Wasserpumpe sorgt dafür, dass das Wasser an ihrem Ausgang einen höheren Druck hat als am Eingang, Abb. 16.20. Sie erzeugt einen Druckunterschied. Dieser Druckunterschied kann einen Wasserstrom verursachen.

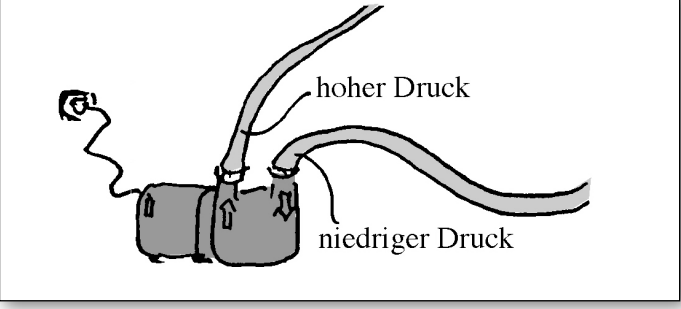


Abb. 16.20 Der Druck ist am Ausgang der Wasserpumpe höher als am Eingang.

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 Pol, dem Plusanschluss, einen höheren Wert hat als am anderen, dem Minusanschluss, Abb. 16.21. Diese Größe heißt *elektrisches Potential*. Das elektrische Potential in einem elektrischen Stromkreis entspricht dem Druck in einem Hydraulikstromkreis.

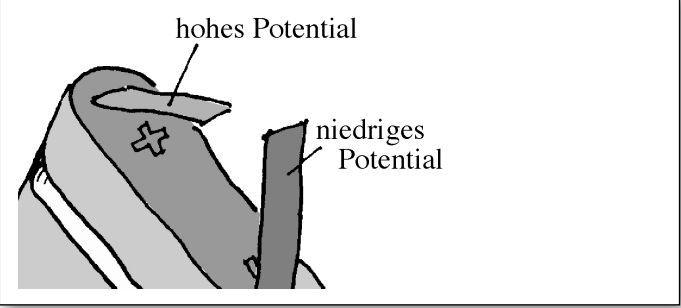


Abb. 16.21 Das elektrische Potential ist am Plusanschluss der Batterie (Ausgang) höher als am Minusanschluss (Eingang).

Eine Batterie erzeugt einen Potentialunterschied, und dieser stellt den Antrieb für einen Elektrizitätsstrom dar.

Eine Elektrizitätspumpe (Batterie, Dynamo) erzeugt einen Potentialunterschied. Der Potentialunterschied ist ein Antrieb für einen elektrischen Strom. Am Plusanschluss ist das Potential höher als am Minusanschluss.

Abb. 16.22 zeigt einige Elektrizitätspumpen: drei verschiedene Typen von Batterien. Der Potentialunterschied ist jeweils aufgedruckt.

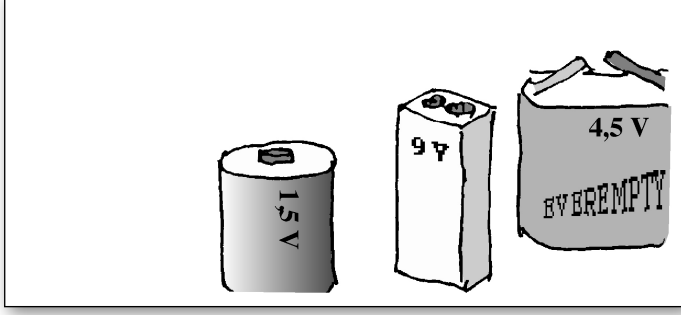


Abb. 16.22 Drei „Elektrizitätspumpen“, bei denen der Wert der Potentialdifferenz aufgedruckt ist

Die Maßeinheit des elektrischen Potentials ist das Volt, abgekürzt V. So erzeugt eine Monozelle einen Potentialunterschied von 1,5 V, eine Flachbatterie macht eine Potentialdifferenz von 4,5 V und eine Autobatterie 12 V.

Statt Potentialunterschied oder Potentialdifferenz sagt man auch *elektrische Spannung*, oder kurz Spannung. Zwischen den Anschlüssen einer Flachbatterie besteht also eine Spannung von 4,5 V.

Elektrische Potentialdifferenz = elektrische Spannung

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

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

oder

$U = 4,5 \text{ V}$.

In Tabelle 16.3 sind Namen, Maßeinheit und Abkürzungen noch einmal zusammengefasst.

Name der Größe	Elektrisches Potenzial	elektrische Spannung
Abkürzung	ϕ	U
Name der Maßeinheit	Volt	Volt
Abkürzung	V	V

Tabelle 16.3

Um den Wert der Potentialdifferenz einer Batterie zu erfahren, braucht man sich nicht auf den Aufdruck zu verlassen, denn Spannungen lassen sich leicht messen. Man braucht dazu ein *Voltmeter*. Ein Voltmeter hat zwei Anschlüsse (wie das Amperemeter). Um die Spannung zwischen zwei Punkten eines Stromkreises zu messen, verbindet man die beiden Punkte mit den Anschlüssen des Voltmeters, Abb. 16.23 und 16.24.

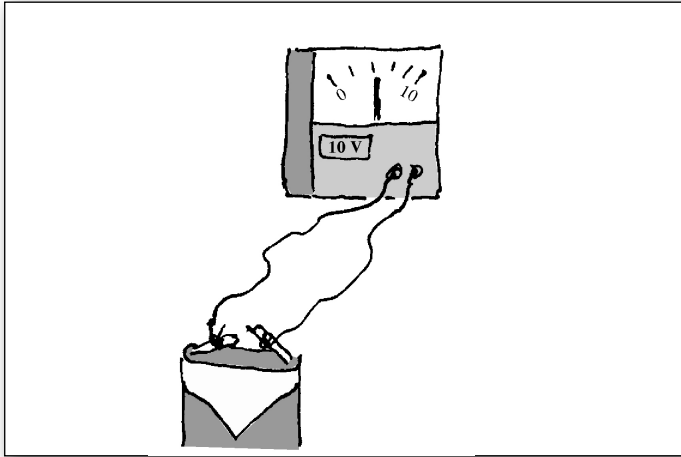


Abb. 16.23 Um eine elektrische Spannung zwischen zwei Punkten zu messen, verbindet man die beiden Punkte mit den Anschlüssen des Voltmeters.

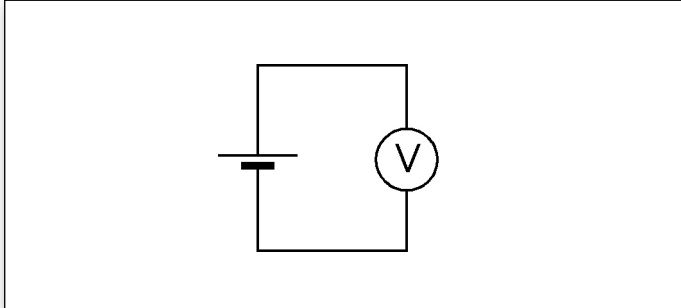


Abb. 16.24 Dieselbe Anordnung wie in Abbildung 16.23, aber mit Hilfe von Symbolen dargestellt

Stellen, die durch ein Kabel miteinander verbunden sind, befinden sich auf demselben Potential. Die vier Voltmeter in Abb. 16.25 zeigen daher alle dieselbe Spannung an.

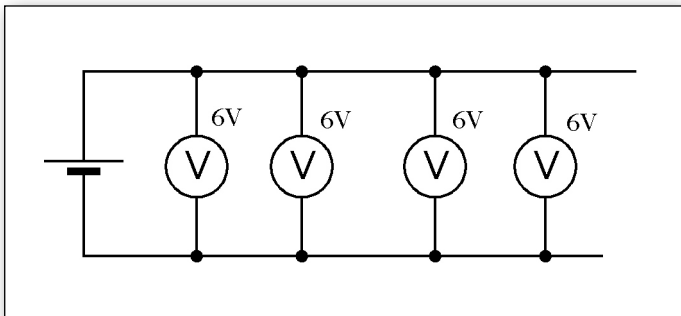


Abb. 16.25 Mehrere „parallel geschaltete“ Voltmeter zeigen dieselbe Spannung an wie ein einziges.

Voltmeter sind so gebaut, dass nur ein sehr kleiner elektrischer Strom durch sie hindurchfließt. Ein Amperemeter, das man in eine Zuleitung zu einem Voltmeter einbaut, zeigt daher, wenn es nicht sehr empfindlich ist, 0 A an, Abb. 16.26.

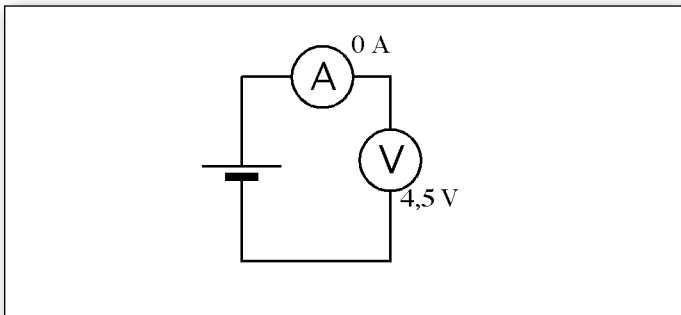


Abb. 16.26 Durch das Voltmeter fließt (fast) kein elektrischer Strom. Das Amperemeter zeigt daher 0 A an.

Wenn eine Batterie leer ist (d. h. wenn alle Energie heraus ist), erzeugt die Batterie keinen Potentialunterschied mehr. Man kann daher mit einem Voltmeter feststellen, ob eine Batterie noch brauchbar ist.

Ein *Netzgerät* ist eine elektrische Energiequelle, die man an die Steckdose anschließen muss. Das Netzgerät bekommt also seine Energie mit dem Träger Elektrizität und gibt sie mit der Elektrizität wieder ab. Trotzdem gibt es einen Unterschied zwischen Ein- und Ausgang: Die elektrische Spannung am Ausgang des Netzgeräts ist nicht dieselbe wie am Eingang. Oft ist die Spannung am Ausgang eines Netzgeräts regelbar. Außerdem liegt zwischen den Anschlüssen der Steckdose eine so genannte *Wechselspannung* (eine Spannung, deren Wert sich im Verlauf der Zeit sehr schnell ändert), während die meisten Netzgeräte an ihrem Ausgang eine Gleichspannung, d. h. eine zeitlich konstante Spannung liefern.

16.5 Der Potenzialnullpunkt

Vor dir auf dem Tisch steht eine volle Flachbatterie. Der Potentialunterschied zwischen ihren Anschlüssen ist 4,5 V, das Potential am Plusanschluss ist also um 4,5 V höher als am Minusanschluss. Wie groß ist aber das Potential des Minusanschlusses selbst? Und wie groß ist das Potential des Plusanschlusses?

Diese Fragen sind nicht leicht zu beantworten. Die Lösung des Problems wird uns aber leichter fallen, wenn wir zunächst eine andere Frage klären. Abb. 16.27 zeigt einen Meterstab, der senkrecht auf einem Tisch steht, und wir stellen die Frage: In welcher Höhe befindet sich das obere Ende des Meterstabes?

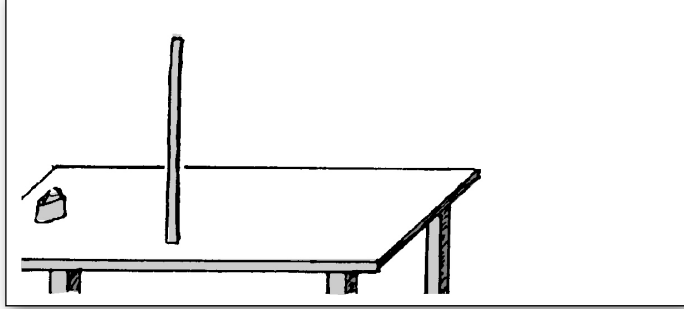


Abb. 16.27
Auf welchem Potential befindet sich der Plusanschluss der Batterie? In welcher Höhe befindet sich das obere Ende des Meterstabes?

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 des Stabes in Bezug auf die Meeresoberfläche angeben. Tatsächlich ist aber der Abstand zum Meeresniveau im Allgemeinen nicht leicht festzustellen.

Mit dem Potential verhält es sich ganz ähnlich wie mit der Höhe. Wir müssen als Erstes festlegen, welchem elektrischen Leiter wir den Potentialwert 0 V zuordnen. Von diesem ausgehend kann man dann die Potentialwerte aller anderen Drähte, elektrischen Anschlüsse usw. angeben. Der Leiter, dessen Potential wir zum Bezugspotential erklären, soll natürlich jedem zugänglich sein. Ein Leiter, der diese Bedingung erfüllt, ist die Erde. Man hat daher festgelegt:

Das Potential 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. Der Schutzkontakt der Steckdose befindet sich also auf 0 V, Abb. 16.28.

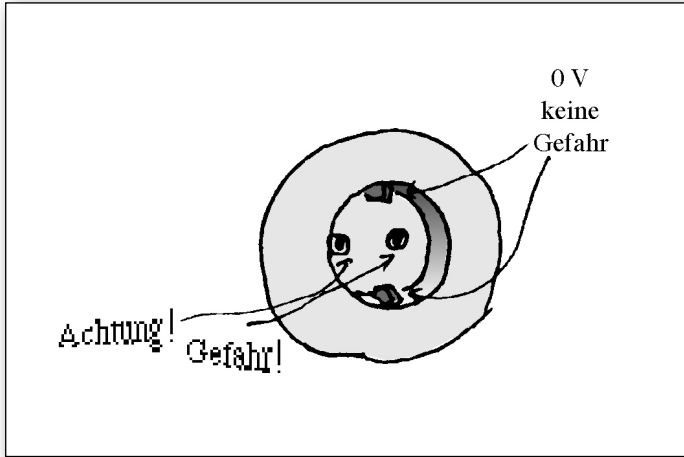


Abb. 16.28
Der Schutzkontakt der Steckdose befindet sich auf Erdpotential.

Nun zurück zu der Batterie, die vor dir auf dem Tisch steht. Wir kennen nach dem bisher Gesagten die Potentialwerte von Plus- und Minusanschluss 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 einen der beiden Anschlüsse. Abb. 16.29a zeigt eine Flachbatterie, deren Minusanschluss geerdet ist (beachte das Symbol für die Erde), d. h. es ist

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

Für den Plusanschluss ist daher

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

In Abb. 16.29b ist der Plusanschluss geerdet. Daher ist hier

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

und

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

Das Potential des Minusanschlusses ist jetzt also negativ. In beiden Fällen, d. h. in Abb. 16.29a und Abb. 16.29b, ist aber

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

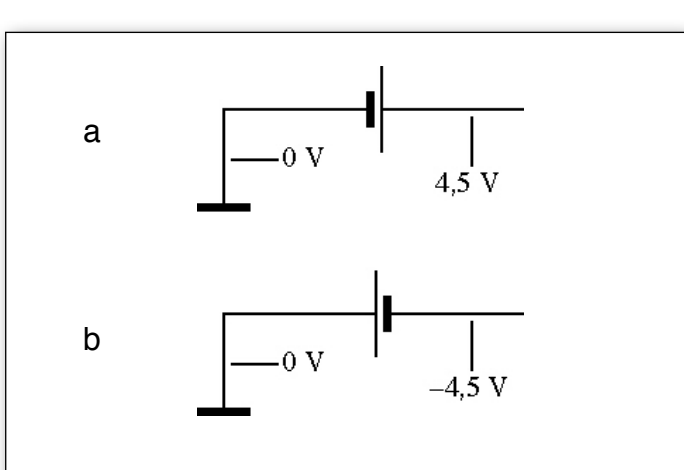


Abb. 16.29
(a) Der Minusanschluss der Batterie ist geerdet, der Plusanschluss hat ein Potential von +4,5 V.
(b) Der Plusanschluss der Batterie ist geerdet. Der Minusanschluss hat ein Potential von -4,5 V.

Die Wörter Plusanschluss und Minusanschluss haben sich eingebürgert, sind aber etwas irreführend. Sie legen nahe, dass sich der Plusanschluss immer auf positivem und der Minusanschluss auf negativem Potential befindet. Dass das nicht der Fall zu sein braucht, zeigt schon Abb. 16.29. In Abb. 16.29a hat der Minusanschluss das Potential 0 V, sein Potential ist also nicht negativ; und in Abb. 16.29b ist der Plusanschluss nicht positiv. In Abb. 16.30 sieht man es noch deutlicher. Hier sind eine 9-V-Batterie und ein 1000-V-Netzgerät „hintereinander geschaltet“. Der Plusanschluss des Netzgeräts ist geerdet, sein Potential ist 0 V. Sein Minusanschluss liegt um 1000 V tiefer, d. h. bei -1000 V. Da der Plusanschluss der Batterie mit dem Minusanschluss des Netzgeräts verbunden ist, hat der Plusanschluss der Batterie das Potential -1000 V. Das Potential des Plusanschlusses der Batterie ist also negativ.

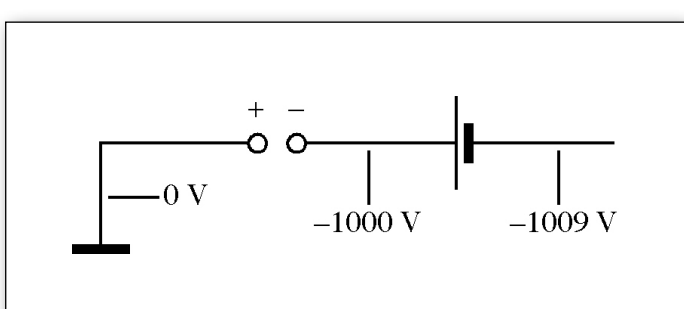


Abb. 16.30
Der Plusanschluss der Batterie hat ein Potential von minus tausend Volt.

Abb. 16.31 zeigt einen Stromkreis, der an einer Stelle geerdet ist.

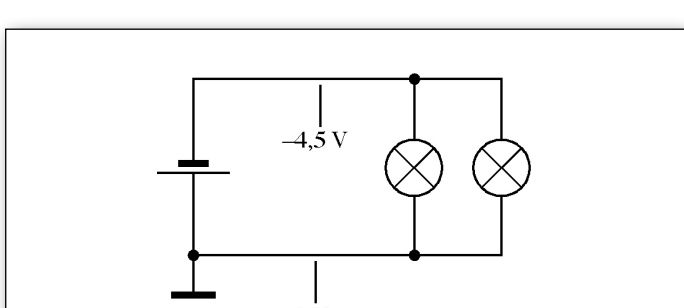


Abb. 16.31
Stromkreis, der an einer Stelle geerdet ist

- Aufgaben**
- Die Batterien in Abb. 16.32a erzeugen eine Spannung von je 4,5 V. Auf welchen Potentialen befinden sich die Punkte 1, 2 und 3?
 - Jede der Batterien in Abb. 16.32b erzeugt eine Potentialdifferenz von 12 V. Auf welchen Potentialen befinden sich die Punkte 1, 2 und 3?
 - Zwei 9-V-Batterien sind hintereinander geschaltet, Abb. 16.33a. Was zeigen die drei Voltmeter an?
 - Zeichne in Abb. 16.33b ein Voltmeter ein, das die Spannung zwischen den Anschlüssen der Lampe misst. Zeichne ein Voltmeter ein, das die Batteriespannung misst.
 - Nenne Beispiele für Stromkreise, die man nicht erden kann.

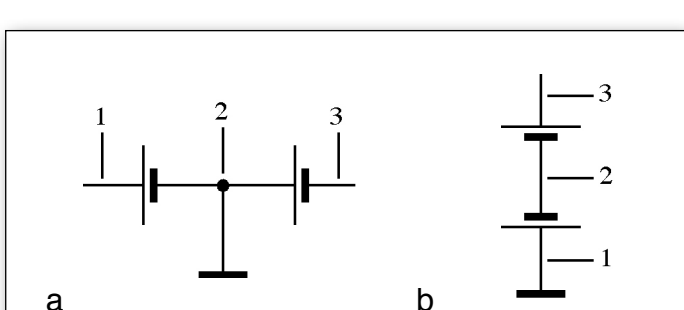


Abb. 16.32
Zu den Aufgaben 1 und 2

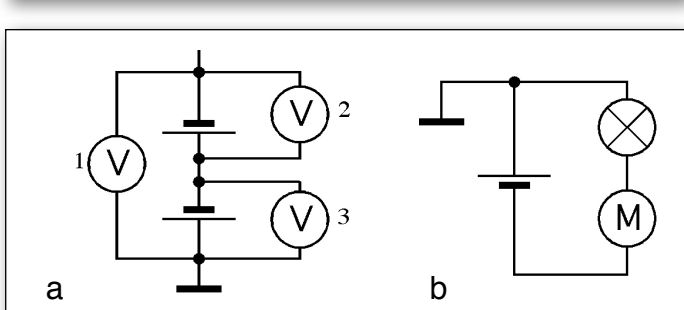


Abb. 16.33
Zu den Aufgaben 3 und 4

16.6 Antrieb und Stromstärke

Wir schließen einen Elektromotor einmal an eine 6-V- und einmal an eine 9-V-Batterie an, Abb. 16.34. Im zweiten Fall läuft der Motor schneller als im ersten. Am Amperemeter sehen wir, dass der elektrische Strom im zweiten Fall stärker ist als im ersten.

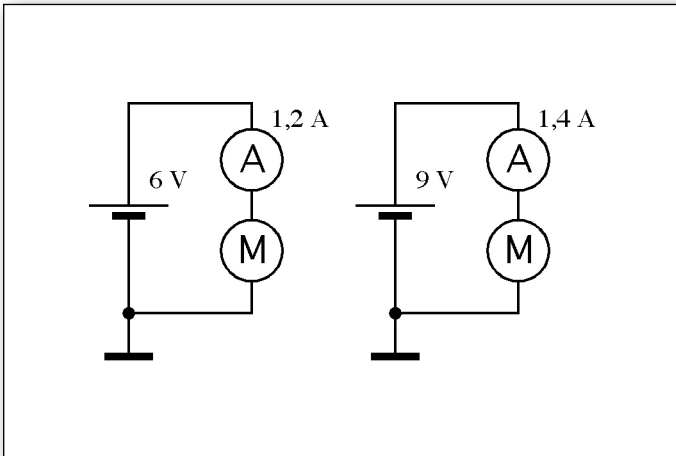


Abb. 16.34

Je höher die Spannung ist, die am Motor liegt, desto stärker ist der Strom, der durch den Motor fließt.

Wir schließen eine Lampe an ein regelbares Netzgerät an und drehen die Spannung langsam hoch. Je höher die Spannung ist, desto stärker ist der Strom, der durch die Lampe fließt.

Die beiden Experimente zeigen, was du sicher schon erwartet hast: Je höher die Spannung, desto stärker der Strom.

Je größer die elektrische Potentialdifferenz zwischen zwei Stellen (je größer der Antrieb) ist, desto stärker ist der elektrische Strom, der von der einen zur anderen Stelle fließt.

Wir schließen an eine Batterie nacheinander zwei verschieden gebaute Lämpchen an, Abb. 16.35. Wir stellen fest, dass der Strom, der durch das eine Lämpchen fließt, stärker ist als der, der durch das andere fließt. Offensichtlich setzen die beiden Lampen dem Strom nicht denselben *Widerstand* entgegen. Man sagt auch, die Lampen *haben* verschiedene Widerstände.

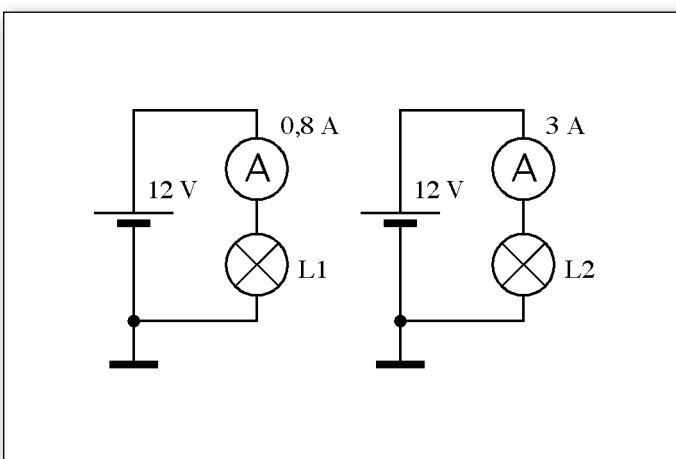


Abb. 16.35

Die Lampe im rechten Stromkreis hat einen geringeren Widerstand als die im linken.

Wir haben gesehen, dass die Stärke des Stroms, der durch ein Gerät fließt (durch eine Lampe oder einen Motor zum Beispiel), von zwei Dingen abhängt:

- von der Spannung zwischen den Anschlüssen des Geräts;
- vom Widerstand, den das Gerät dem Strom entgegensetzt.

Die Stärke des elektrischen Stroms, der durch ein Gerät fließt, ist umso größer,

- je größer der Potentialunterschied zwischen den Anschlüssen des Geräts ist;
- je kleiner der Widerstand ist, den das Gerät dem Strom entgegensetzt.

16.7 Anwendungen

Wir lernen nun eine Methode kennen, die uns das Lösen elektro-technischer Probleme erleichtert.

Immer wenn der Schaltplan einer elektrischen Anordnung vorgegeben ist, werden als Erstes die Leitungen farblich nachgezeichnet, und zwar so, dass alle Leitungen, die dasselbe Potential haben, auch dieselbe Farbe bekommen. Es ist klar, dass dabei ein durchgehender Draht eine einheitliche Farbe bekommt. Beim Durchgang durch ein elektrisches Gerät (Lampe, Motor, Batterie, Dynamo etc.) ändert sich gewöhnlich die Farbe.

Die Abbildungen 16.36 bis 16.38 zeigen einige Beispiele.

In Abb. 16.36 ist die Batterie von Abb. 16.29 mit ihren Zuleitungen nach der neuen Methode dargestellt.

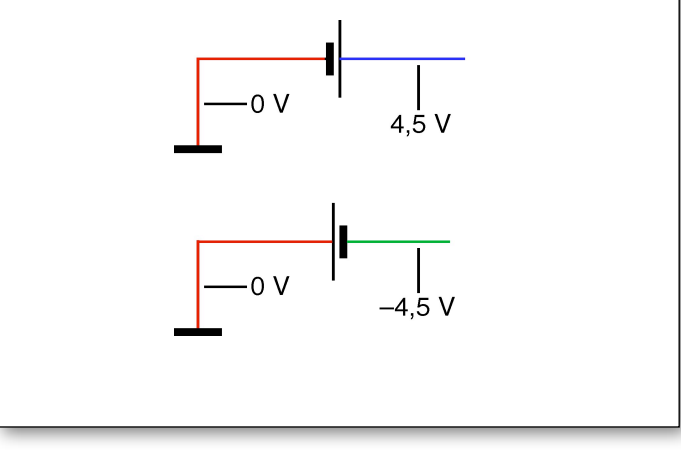


Abb. 16.36
Unterschiedliche Farben der Leitungen stehen für unterschiedliche Potentiale.

Abb. 16.37 zeigt noch einmal die parallelgeschalteten Lampen von Abb. 16.31, und Abb. 16.38 zeigt einen Stromkreis, in dem vier verschiedene Potentialwerte vorkommen.

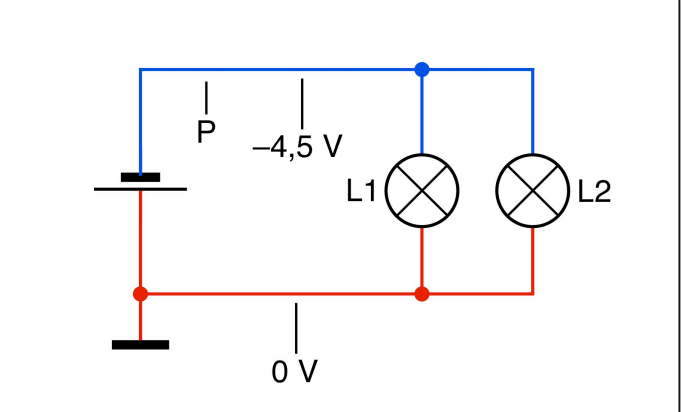


Abb. 16.37
Die Schaltung von Abb. 16.31. Die Potentiale sind durch verschiedene Farben gekennzeichnet.

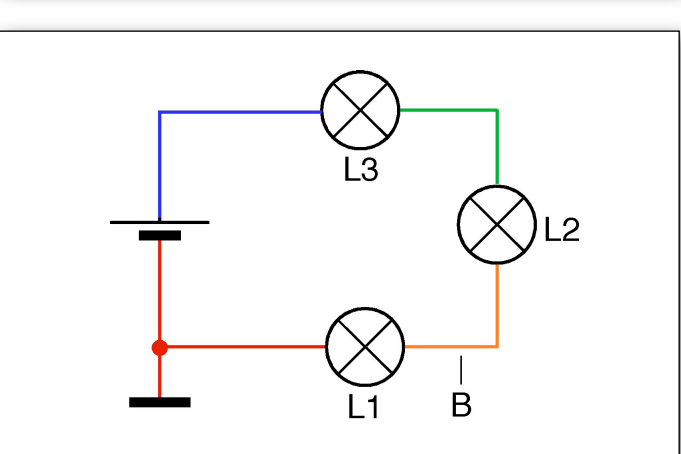


Abb. 16.38
In dieser Schaltung kommen vier verschiedene Potentialwerte vor.

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

1. Die Lampen 1 und 2 in Abb. 16.37 sind gleich gebaut. An der Stelle P fließt ein Strom von 3 A. Wie groß ist die Stromstärke in Lampe 1 und wie groß in Lampe 2?

Da für die Verzweigungspunkte die Knotenregel gilt, ist

$$I_{L1} + I_{L2} = 3 \text{ A.}$$

(I_{L1} und I_{L2} sind die Stromstärken in den Lampen.) Wir sehen nun 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 auch die Ströme in beiden Lampen gleich stark sein, also

$$I_{L1} = I_{L2} = 1,5 \text{ A.}$$

2. Der Leitungsabschnitt B in Abb. 16.38 befindet sich auf einem Potential von 6 V. Die Lampen 1, 2 und 3 sind gleichartig gebaut. Welche Spannung erzeugt die Batterie?

Da der Stromkreis nicht verzweigt ist, ist die Stromstärke überall dieselbe. Die Spannung an Lampe 1 beträgt 6 V. Sie stellt den Antrieb für den Strom durch Lampe 1 dar. Da derselbe Strom durch die Lampen 2 und 3 fließt, und diese Lampen genauso gebaut sind wie Lampe 1, braucht die Elektrizität, um durch diese Lampen hindurchzukommen, denselben Antrieb wie in Lampe 1, nämlich je 6 V. Wenn man sich also vom Plusanschluss der Batterie über die drei Lampen zum Minusanschluss bewegt, geht es in drei 6-V-Schritten auf 0 V hinunter. Der Plusanschluss muss daher auf 18 V liegen.

In den beiden Beispielen war das Potential 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 Potential haben, andernfalls flösse ja ein Strom. Abb. 16.39 zeigt zwei Beispiele.

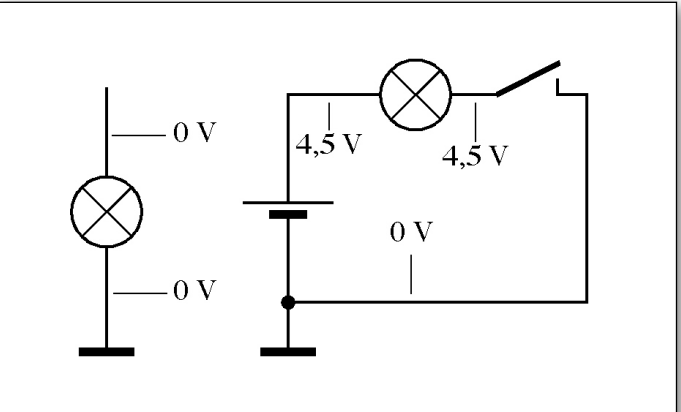


Abb. 16.39
Da durch die Lampe kein Strom fließt, müssen sich ihre Anschlüsse auf gleichem Potential befinden.

Aufgaben

- Die Batterien in Abb. 16.40a sind 4,5-V-Flachbatterien. Kennzeichne die Stellen gleichen Potentials, und gib die Potentialwerte für alle Leitungsabschnitte an.
- Die Stärke des elektrischen Stroms, der durch die Batterie in Abb. 16.40b fließt, beträgt 1,6 A. Kennzeichne Stellen gleichen Potentials. Wie stark ist der Strom in den Lampen?
- Das elektrische Potential an der Stelle C in Abb. 16.41 ist 20 V. Die drei Lampen sind gleichartig gebaut. Kennzeichne die Stellen gleichen Potentials. Gib die Potentialwerte für die Leitungsabschnitte A, B und D an. Welche Spannung liefert die Batterie? Was passiert mit den Potentialen, wenn der Schalter geöffnet wird?
- Die Batteriespannung in Abb. 16.42a und 16.42b beträgt 12 V. Die Lampen sind gleich gebaut. Kennzeichne die Stellen gleichen Potentials. Welchen Wert hat das Potential im Punkt P? Wie groß sind die Potentialunterschiede an den Lampen L1 und L2? Ist die Stärke des Stroms durch Lampe L1 größer, wenn der Schalter geschlossen ist (Abb. 16.42a) oder wenn er offen ist (Abb. 16.42b)? Wann ist der Strom durch die Lampe L2 stärker: wenn der Schalter offen ist oder wenn er geschlossen ist?
- Die Spannung am Netzgerät in Abb. 16.43a und 16.43b beträgt 150 V, die Lampen sind gleichartig gebaut. Kennzeichne die Stellen gleichen Potentials. Gib die Potentialwerte aller Leitungsabschnitte an. Welche Lampe leuchtet noch wenn der Schalter geöffnet ist?
- Die Batterien in Abb. 16.44a und 16.44b haben eine Spannung von 9 V. Die Lampen sind gleich gebaut. Kennzeichne die Stellen gleichen Potentials, und gib die Potentialwerte aller Leitungsabschnitte an.

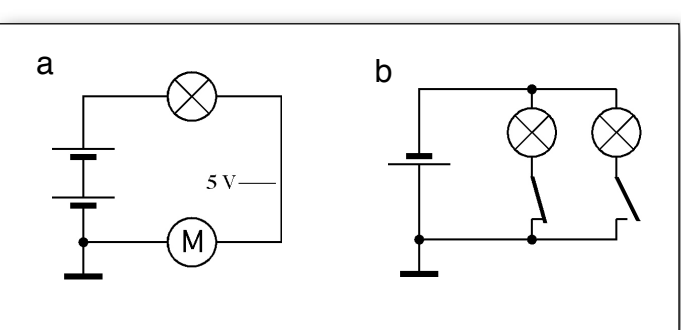


Abb. 16.40
Zu den Aufgaben 1 und 2

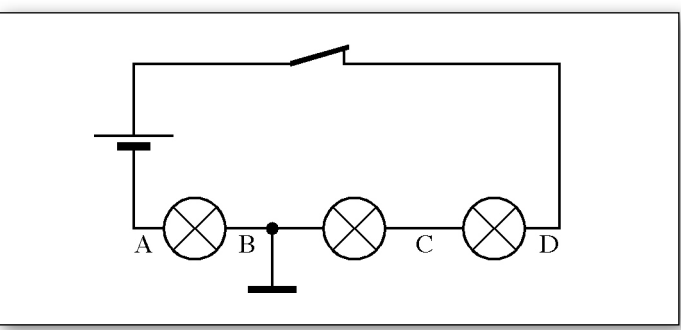


Abb. 16.41
Zu Aufgabe 3

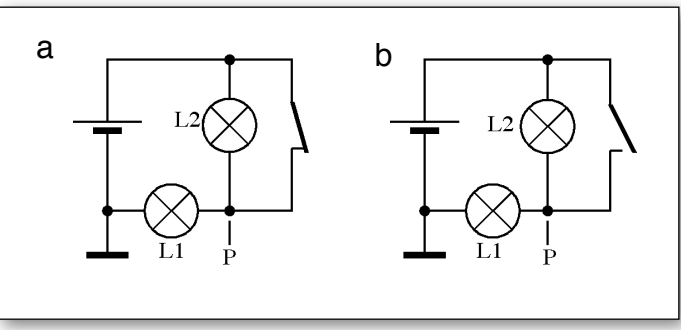


Abb. 16.42
Zu Aufgabe 4

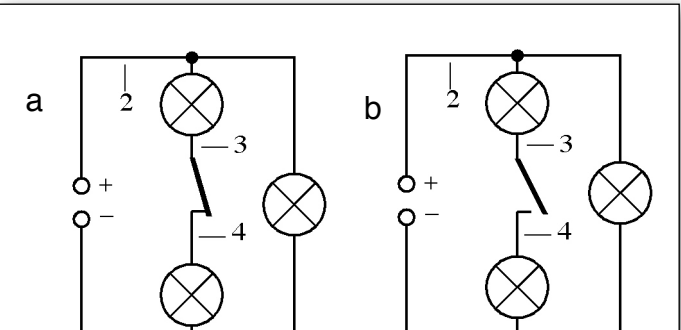


Abb. 16.43
Zu Aufgabe 5

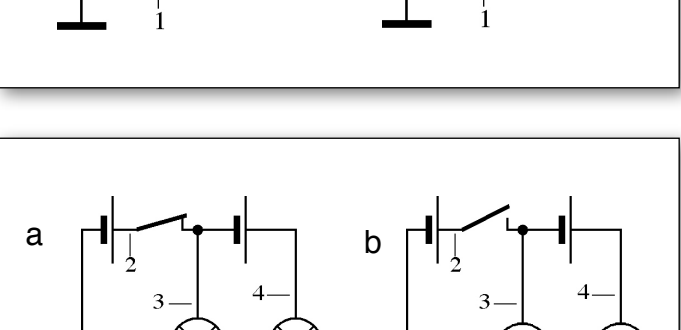


Abb. 16.44
Zu Aufgabe 6

16.8 Der elektrische Widerstand

Wenn man möchte, dass durch einen Gegenstand ein elektrischer Strom fließt, legt man eine Spannung an, man sorgt für einen Antrieb. Jeder Gegenstand neigt aber dazu, den Strom zu behindern. Er setzt der fließenden Elektrizität einen Widerstand entgegen. 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 – aber nicht immer – zu.

Wir wollen den Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke für verschiedene elektrische Geräte untersuchen. Abb. 16.45 zeigt, wie man es macht: Wir schließen den zu untersuchenden Gegenstand an ein Netzgerät an, dessen Spannung man verändern kann. Diese Spannung kann am Einstellknopf des Netzgeräts abgelesen werden. (Wenn man sich auf die Skala an diesem Knopf nicht verlassen will, kann man die Spannung natürlich auch nachmessen.)

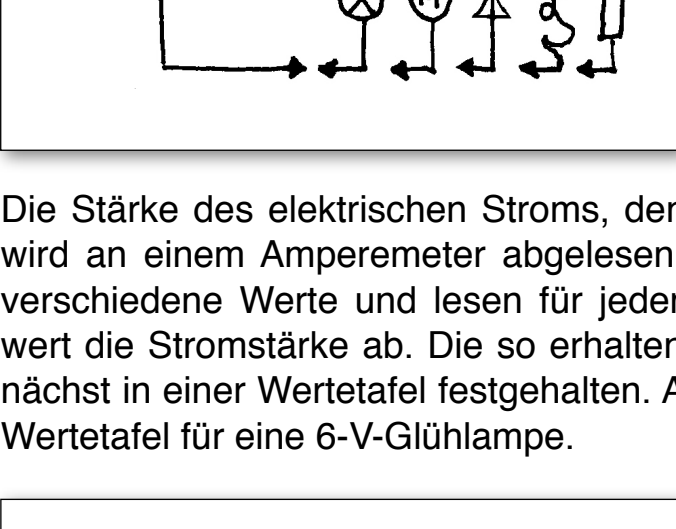


Abb. 16.45
Die Aufnahme von Kennlinien: Man gibt verschiedene Spannungswerte vor und misst jeweils die Stärke des durch die Spannung verursachten elektrischen Stroms.

Die Stärke des elektrischen Stroms, den die Spannung verursacht, wird an einem Amperemeter abgelesen. Wir geben der Spannung verschiedene Werte und lesen für jeden eingestellten Spannungswert die Stromstärke ab. Die so erhaltenen Wertepaare werden zunächst in einer Wertetafel festgehalten. Abb. 16.46 zeigt eine solche Wertetafel für eine 6-V-Glühlampe.

U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)
-6	-2,7	-2	-1,6	3	2
-5	-2,5	-1	-1	4	2,3
-4	-2,36	0	0	5	2,5
-3	-2	1	1	6	2,7
		2	1,6		

Abb. 16.46
Wertetafel für die Kennlinie einer Glühlampe

Die Messwerte werden als Nächstes in ein U - I -Koordinatensystem übertragen. Die so erhaltenen Punkte werden dann durch eine möglichst glatte Linie miteinander verbunden. Die Kurve, die man so erhält, ist die *Kennlinie* des untersuchten Gegenstandes oder Geräts.

Abb. 16.47 zeigt die Kennlinie unserer 6-V-Glühlampe.

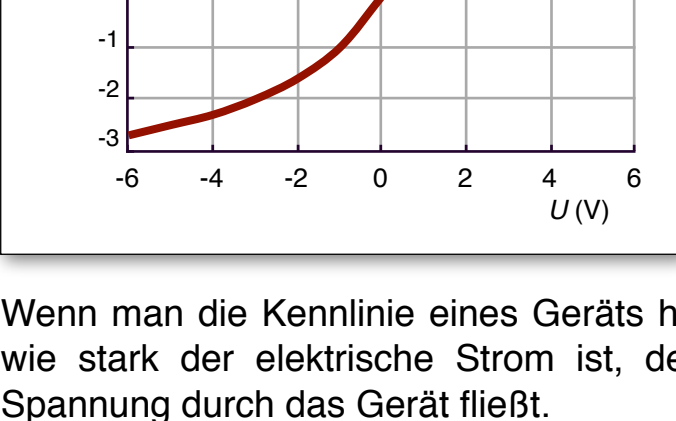


Abb. 16.47
Kennlinie einer Glühlampe. Die zugehörige Wertetafel zeigt Abb. 16.46.

Wenn man die Kennlinie eines Geräts hat, kann man sofort sagen, wie stark der elektrische Strom ist, der bei einer vorgegebenen Spannung durch das Gerät fließt.

Wir haben die Spannung an unserer Glühlampe auch umgekehrt. Ein Umkehren der Spannung hat zur Folge, dass sich die Richtung des elektrischen Stroms umkehrt. Bei der Glühlampe besteht zwischen positivem und negativem Teil der Kurve eine Punktsymmetrie.

Abb. 16.48 zeigt die Kennlinie einer *Diode*. Man sieht, dass die Kurve keine Punktsymmetrie hat. Falls du nicht wusstest wozu man eine Diode verwendet, kannst du es dir jetzt mit Hilfe der Kennlinie überlegen. Die Kennlinie zeigt, dass die Diode den elektrischen Strom in einer Richtung gut, und in der anderen fast gar nicht durchlässt. Sie ist daher für den elektrischen Strom dasselbe wie ein Fahrradventil für den Luftstrom.

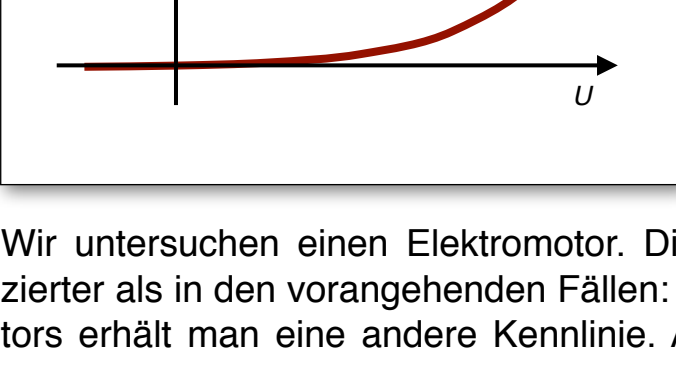


Abb. 16.48
Die Kennlinie einer Diode ist nicht punktsymmetrisch.

Wir untersuchen einen Elektromotor. Die Situation ist hier komplizierter als in den vorangehenden Fällen: Je nach Belastung des Motors erhält man eine andere Kennlinie. Alle drei Kennlinien in Abb. 16.49 wurden mit demselben Motor aufgenommen. Bei der einen lief der Motor völlig frei, er war unbelastet. Die elektrische Stromstärke blieb immer recht klein. Die zweite Kennlinie wurde bei mittlerer Belastung aufgenommen und die dritte bei blockierter Motorwelle.

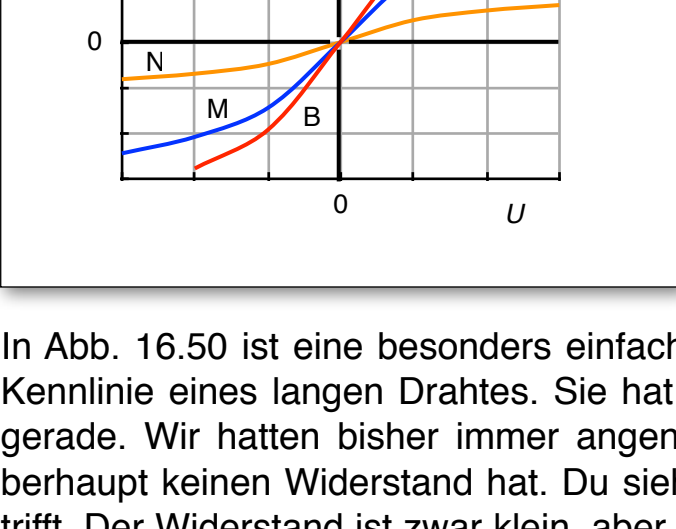


Abb. 16.49
Die Kennlinie eines Elektromotors hängt von der Belastung des Motors ab für Leerlauf (L), mittlere Belastung (M) und blockierte Motorwelle (B).

In Abb. 16.50 ist eine besonders einfache Kennlinie dargestellt: die Kennlinie eines langen Drahtes. Sie hat die Form einer Ursprungsgerade. Wir hatten bisher immer angenommen, dass ein Draht überhaupt keinen Widerstand hat. Du siehst jetzt, dass das nicht zutrifft. Der Widerstand ist zwar klein, aber er ist vorhanden. Die Kennlinie des Drahtes zeigt, dass die Stromstärke proportional zur angelegten Spannung ist. Man sagt, der Draht befolge das *Ohm'sche Gesetz*.

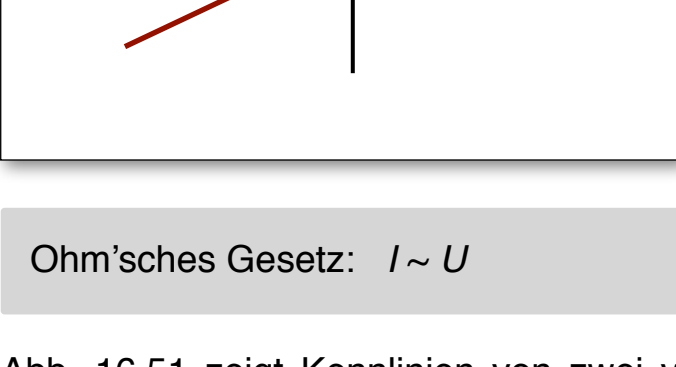


Abb. 16.50
Kennlinie eines langen Drahtes. Der Draht befolgt das Ohm'sche Gesetz.

Ohm'sches Gesetz: $I \sim U$

Abb. 16.51 zeigt Kennlinien von zwei verschiedenen Drähten. Bei gleichem Antrieb ist der Strom in Draht B schwächer als in Draht A. B hat also einen größeren Widerstand als A.



Abb. 16.51
Kennlinien von zwei Drähten mit unterschiedlichen Widerständen

Man kann den Widerstand eines Drahtes charakterisieren, indem man den Quotienten aus Spannung und Stromstärke bildet. Für den einen Draht hat er einen bestimmten festen Wert, für den anderen hat er einen anderen festen Wert. 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 :

$$\text{Elektrischer Widerstand: } R = \frac{U}{I}$$

Der Widerstand R ist eine physikalische Größe. Als Maßeinheit ergibt sich Volt/Ampere (V/A). Statt des zusammengesetzten Ausdrucks Volt/Ampere benutzt man die Bezeichnung *Ohm*. Die Maßeinheit Ohm wird abgekürzt durch den griechischen Buchstaben Ω (sprich Omega). Es ist also

$$\Omega = \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

Wir können damit den Widerstand unserer beiden Drähte in Abb. 6.51 angeben. Draht A hat einen Widerstand von 2Ω , Draht B hat einen Widerstand von 5Ω .

Ist die Kennlinie eines Geräts keine Gerade, so hat es nicht viel Sinn, einen Quotienten U/I zu bilden. Dieser Quotient hätte für jeden Punkt der Kennlinie einen anderen Wert.

Kann man etwas tun, um den Widerstand eines Drahtes zu verringern? Dazu müsste man wissen, wovon der Widerstand abhängt. Wir können uns an unseren Erfahrungen mit Wasserschläuchen orientieren. Der Widerstand eines Drahtes ist umso größer,

- je länger der Draht ist,
- je dünner der Draht ist.

Außerdem hängt er noch davon ab, aus welchem Material der Draht besteht. Vergleicht man Drähte, die gleich lang und gleich dick sind, aber aus Silber und aus Kupfer den geringsten Widerstand haben, sie leiten den elektrischen Strom etwa gleich gut. Der Widerstand eines Aluminiumdrahtes ist etwa doppelt so groß und der eines Eisendrahtes etwa sechsmal so groß wie der eines Kupferdrahtes.

In Abb. 16.52 ist der Zusammenhang zwischen elektrischer Stromstärke, Potentialunterschied und den Eigenschaften der Leitung schematisch dargestellt.

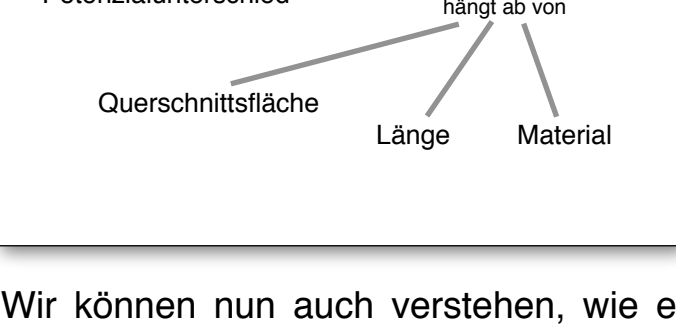


Abb. 16.52
Zusammenhang zwischen elektrischer Stromstärke, Potentialunterschied und Eigenschaften der Leitung

Wir können nun auch verstehen, wie eine Glühlampe funktioniert. Sie ist im Wesentlichen nur eine enge Stelle im Stromkreis: ein Stück Leitung, das dem elektrischen Strom einen großen Widerstand entgegensetzt. Die Elektrizität, die durch die enge Stelle fließt, hat eine Art Reibungswiderstand zu überwinden. Dabei wird, wie bei jedem Reibungsvorgang, Entropie erzeugt, und das hat zur Folge, dass die Temperatur des Drahtes steigt.

Nach demselben Prinzip arbeiten die meisten elektrischen Heizungen: Kochplatte, Bügeleisen, die Heizung im Föhn etc. Anders dagegen funktioniert der Mikrowellenherd und die Leuchtstofflampe.

Es kommt in der Elektrotechnik und in der Elektronik oft vor, dass man einen elektrischen Widerstand absichtlich beschaffen 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 Ohm'sche Gesetz, und man kann sie durch die Angabe eines Widerstandswertes, d. h. einer Ohmzahl, charakterisieren. Abb. 16.45 zeigt das Symbolsymbol eines Widerstandes.

Für technische Widerstände ist $I \sim U$.

Hast du bemerkt, dass man das Wort Widerstand in drei verschiedenen Bedeutungen verwendet? Dann solltest du diesen (hässlichen) Satz verstehen: „Dieser Widerstand, der einen Widerstand von $10 \text{ k}\Omega$ hat, setzt dem elektrischen Strom einen zu kleinen Widerstand entgegen.“

Aufgaben

1. An einen unbekannten 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 $2\text{-k}\Omega$ -Widerstand wird eine Spannung von 120 V gelegt. Wie stark ist der elektrische Strom, der durch den Widerstand fließt?
3. Durch einen $1\text{-M}\Omega$ -Widerstand fließt ein elektrischer Strom von $0,1 \text{ mA}$. Welche Spannung liegt am Widerstand?
4. Das Netzgerät in Abb. 16.53a erzeugt eine Spannung von 35 V . Das Amperemeter zeigt 5 A an und das Voltmeter 10 V . Wie groß ist der Widerstand von R_1 ? Wie groß ist die Spannung an Widerstand R_2 ? Wie groß ist der Widerstand von R_2 ?
5. Die Spannung der Batterie in Abb. 16.53b beträgt 12 V . Jeder der Widerstände hat 100Ω . Gib die Potentialwerte aller Leitungsabschnitte an. Welche Spannungen liegen an den drei Widerständen? Wie stark sind die elektrischen Ströme, die durch die drei Widerstände fließen? Wie stark ist der elektrische Strom, der durch die Batterie fließt?
6. Du findest in einer Kiste mit alten elektronischen Bauteilen mehrere kleine Geräte, bei denen nicht mehr zu erkennen ist, wozu sie dienen. Du nimmst für drei dieser Geräte die Kennlinien auf und findest die in Abb. 16.54 dargestellten Zusammenhänge. Um was für Bauteile handelt es sich? Mach möglichst genaue Angaben.
7. Zwei $100\text{-}\Omega$ -Widerstände werden parallel geschaltet, Abb. 16.55a. Wie groß ist der Widerstand der gesamten Anordnung. Formuliere eine Regel.
8. Zwei $100\text{-}\Omega$ -Widerstände werden hintereinander geschaltet, Abb. 16.55b. Wie groß ist der Widerstand der gesamten Anordnung? Formuliere eine Regel.

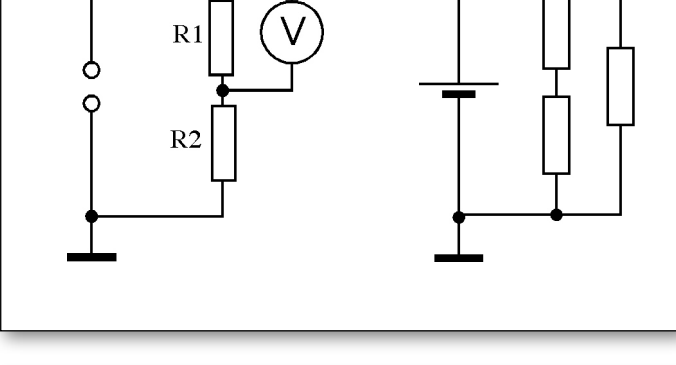


Abb. 16.53
(a) Zu Aufgabe 4;
(b) zu Aufgabe 5

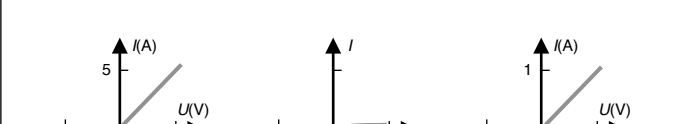


Abb. 16.54
Zu Aufgabe 6

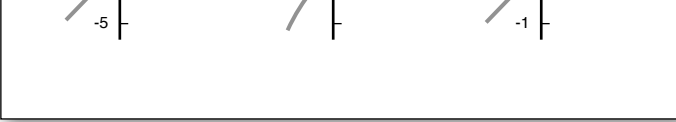


Abb. 16.55
(a) Zu Aufgabe 7;
(b) zu Aufgabe 8

16.9 Der Kurzschluss – die Sicherung

In Abb. 16.56a sind die beiden Anschlüsse der Batterie direkt über ein Kabel miteinander verbunden. In Abb. 16.56b berühren sich die beiden Leitungen des Kabels, das zu einem Motor führt. In beiden Fällen fließt die Elektrizität direkt vom einen zum anderen Anschluss der Energiequelle, ohne den Umweg über ein elektrisches Gerät zu gehen, das als Energieempfänger arbeitet. Man nennt diese Situation einen *Kurzschluss*.

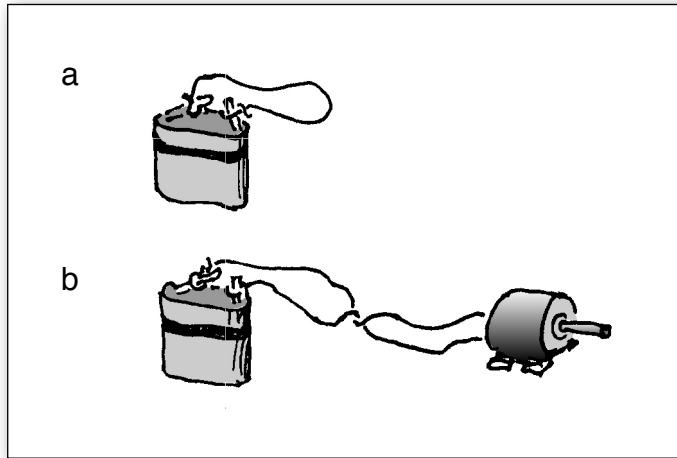


Abb. 16.56

Kurzschluss: Die Elektrizität geht nicht den Umweg über den Energieverbraucher.

Der Stromkreis, der durch den Kurzschluss entsteht, hat einen sehr geringen Widerstand. Daher fließt ein sehr starker Strom. Der elektrische Strom kann bei einem Kurzschluss so stark sein, dass es gefährlich wird: Die Leitungen können heiß werden und anfangen zu glühen.

Wie stark der Strom wird, hängt von der Quelle ab. Bei einer Flachbatterie, einer Monozelle und ähnlichen Quellen ist die Gefahr nicht groß: Die Stromstärke erreicht nur einige Ampere. Beim Autoakku ist es schon ganz anders: Die Stromstärke im Kurzschluss kann einige Hundert Ampere betragen. Und bei der Steckdose wäre sie noch viel größer, wenn nicht die Haussicherung das Fließen eines sehr starken Stroms verhinderte.

Eine Sicherung hat die Aufgabe, den Stromkreis zu unterbrechen, sobald die elektrische Stromstärke einen bestimmten Wert überschreitet. Bei der Haussicherung ist die Maximalstärke gewöhnlich 10 A oder 16 A.

Wenn man eine Batterie kurzschließt, wird sie leer. „Leer“ bedeutet hier: leer an Energie. Wo bleibt nun aber diese Energie? Zum einen werden, wie wir schon wissen, die Leitungen warm. Und zum Erwärmen des Drahtes (zur Entropieerzeugung im Draht) wird Energie gebraucht. Dies ist aber nur ein kleiner Teil der Energie, die die Batterie verliert. Und außerdem: Wenn man die Batterie mit einem Draht mit sehr kleinem Widerstand kurzschließt, so wird der Draht fast gar nicht warm. Wo bleibt also die Energie?

Wenn du bereit bist, eine Monozelle zu opfern, kannst du es selbst ausprobieren. Du überbrückst sie mit einem kurzen, dicken Draht. Der Draht wird nicht warm – aber die Monozelle wird warm. Es wird also beim Kurzschluss in der Energiequelle selbst Entropie erzeugt. Die Energie verlässt die Quelle nicht mehr mit dem Energieträger Elektrizität, sondern mit dem Energieträger Entropie.

16.10 Wechselstrom

Aus zwei Flachbatterien und einem Wechselschalter bauen wir eine etwas ungewöhnliche elektrische Energiequelle zusammen, und wir schließen eine Lampe an, Abb. 16.57. Wir legen nun den Schalter in regelmäßigen Zeitabständen um, z. B. alle 3 Sekunden. Dabei bleibt die untere Leitung ständig auf 0 V, die obere springt zwischen den Potentialwerten + 4,5 V und – 4,5 V hin und her.

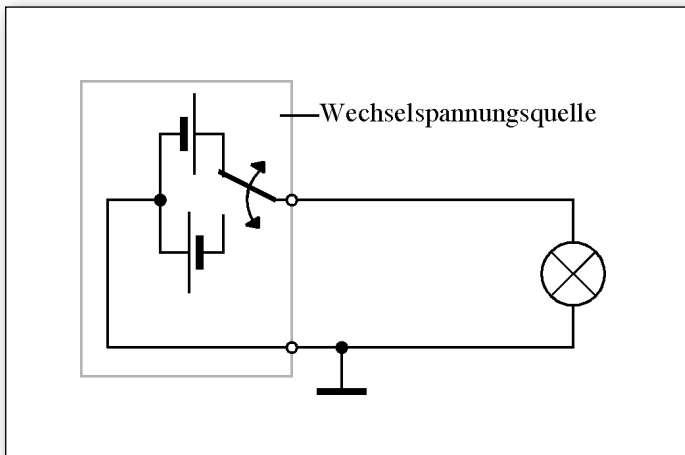


Abb. 16.57

Wechselspannungsquelle. Der eine Anschluss hat ständig Erdpotential. Das Potential des anderen Anschlusses wechselt zwischen einem positiven und negativen Wert hin und her.

Abb. 16.58 zeigt das Potential der oberen Leitung als Funktion der Zeit. Man sagt, an der Glühlampe liege eine *Wechselspannung*. Diese Wechselspannung treibt den elektrischen Strom immer abwechselnd in der einen und in der anderen Richtung durch die Glühlampe. Es fließt ein *Wechselstrom*.

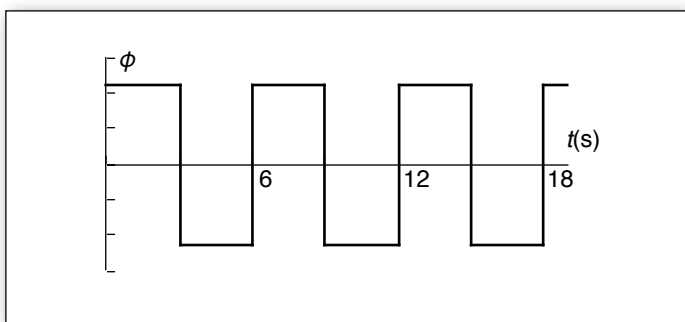


Abb. 16.58

Potential der oberen Leitung in Abb. 16.57 als Funktion der Zeit

Auch zwischen den Anschlüssen der Steckdose liegt eine Wechselspannung. Der eine Anschluss liegt immer auf Erdpotential. Das Potential des anderen Anschlusses wird immer abwechselnd positiv und negativ. Es gibt aber einige Unterschiede zu der selbst gebauten Quelle von Abb. 16.57:

- Das Potential des nicht geerdeten Anschlusses der Steckdose wechselt viel schneller, nämlich 100-mal pro Sekunde. Es wird 50-mal pro Sekunde positiv und 50-mal negativ. Man sagt, die *Frequenz* betrage 50 Hertz.
- Das Potential des nicht geerdeten Anschlusses ändert sich nicht sprunghaft, sondern stetig, wellenförmig, so wie es Abb. 16.59 zeigt. Man nennt einen solchen Zusammenhang eine *Sinusfunktion*. Die Spannung zwischen den Anschlüssen der Steckdose ändert sich entsprechend. Sie erreicht zweimal pro Schwingung (also 100-mal pro Sekunde) ihren höchsten Wert, die Spitzenspannung. Außerdem hat sie zweimal pro Schwingung den Wert 0 Volt.

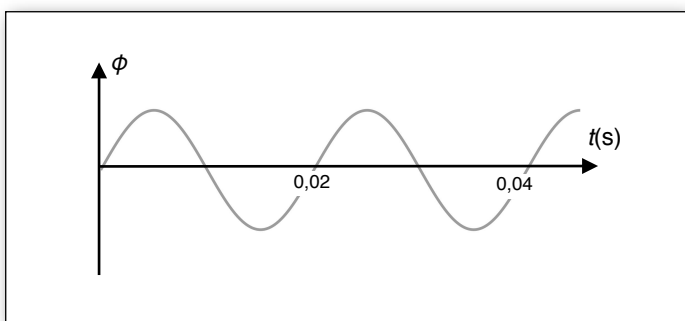


Abb. 16.59

Potential des nicht geerdeten Anschlusses der Steckdose als Funktion der Zeit

Wir wollen nun etwas mit Wechselspannungen experimentieren. Wir verwenden dazu einen Sinusgenerator: ein Netzgerät, das eine sinusförmige Wechselspannung liefert und dessen Frequenz man beliebig einstellen kann.

Wir schließen ein Glühlämpchen an den Sinusgenerator an und stellen das Gerät zunächst so ein, dass die Spannung eine Schwingung pro Sekunde macht, und dass die Spitzenspannung 5 V beträgt. Wie zu erwarten war, geht das Lämpchen in schneller Folge an und aus, zweimal pro Sekunde. Immer wenn die Spitzenspannung erreicht ist, leuchtet es hell, so hell als wäre es an eine 5-V-Gleichspannungsquelle angeschlossen. Zu allen anderen Zeitpunkten leuchtet die Lampe weniger hell oder gar nicht.

Wir erhöhen nun die Frequenz des Sinusgenerators (wobei wir darauf achten, dass die Spitzenspannung gleich bleibt). Das Lämpchen flackert jetzt immer schneller und schneller. Schließlich, wenn die Frequenz etwa 20 Schwingungen pro Sekunde (20 Hertz) erreicht hat, leuchtet die Lampe ganz gleichmäßig. Der Glühfaden ist zu träge, um den schnellen Spannungswechseln zu folgen. Allerdings leuchtet die Lampe jetzt nicht so hell, wie sie bei einer Gleichspannung von 5 V leuchten würde. Sie bekommt ja im Mittel weniger Energie als sie von einer 5-V-Gleichspannungsquelle bekäme.

Wir schließen nun zum Vergleich ein zweites Lämpchen (das genauso gebaut ist wie das erste) an ein Gleichspannungsnetzgerät an, und stellen die Spannung so ein, dass das zweite Lämpchen genauso hell leuchtet wie das erste.

Wir stellen fest, dass man dazu etwa 3,5 V Gleichspannung braucht. Bei einer Wechselspannung, deren Spitzenwert 5 V beträgt, bekommt also eine Lampe im Mittel genauso viel Energie wie bei einer Gleichspannung von 3,5 V. Man sagt daher, die Wechselspannungsquelle habe eine *Effektivspannung* von 3,5 V.

Der genaue Umrechnungsfaktor zwischen Effektiv- und Spitzenspannung ist $\sqrt{2}$. Es ist also

$$\text{Spitzenspannung} = \sqrt{2} \cdot \text{Effektivspannung}$$

Wenn jemand im Zusammenhang mit einer Wechselspannung einfach von *der* Spannung spricht, meint er stets die Effektivspannung. Auch die 230 V der Steckdose stellen die Effektivspannung dar. Die Spitzenspannung der Steckdose beträgt

$$230 \text{ V} \cdot \sqrt{2} \approx 325 \text{ V}.$$

Und auch die Spannung, die ein Wechselspannungsvoltmeter anzeigt, ist die Effektivspannung.

Die wichtigste Frage ist noch nicht geklärt: Wozu diese Umstände? Warum benutzt man so gern Wechselspannungen? Die Antwort: Weil es eine sehr bequeme Methode gibt, Wechselspannungen zu verändern, nämlich mit einem Transformator. Ein Transformator ist ein Gerät, das Spannungen herauf- oder heruntersetzt. Er tut das mit nur sehr geringen Energieverlusten. Allerdings kann er nur Wechselspannungen verarbeiten.

Wie ein Transformator funktioniert, und warum man Spannungen so gern herauf- und heruntertransformiert, werden wir später sehen.

16.11 Die Gefahren des elektrischen Stroms

Der elektrische Strom ist gefährlich. Das weiß jeder. Aber was genau ist daran gefährlich? Was darf man tun und was nicht? Worauf muss man achten?

Ein elektrischer Strom, der durch den menschlichen Körper fließt, hat schädliche Wirkungen. Eine Stromstärke von 50 mA kann tödlich sein.

Durch unseren Körper fließt natürlich nur dann ein elektrischer Strom, wenn man *zwei* Stellen berührt, die sich auf *verschiedenem* Potential befinden. Den Spatzen auf der elektrischen Leitung passiert nichts, denn sie berühren nur einen einzigen Leiter.

Man darf aber nicht glauben, man könnte ruhig einen Anschluss der Steckdose berühren, solange man nicht auch den anderen berührt. Wenn nämlich die Verbindung zur Erde über unsere Füße gut leitend ist, hat man schon den zweiten Berührungspunkt.

Der eine der beiden Anschlüsse der Steckdose wäre übrigens tatsächlich ungefährlich: Er befindet sich ja auf Erdpotential. Diesen geerdeten Anschluss könnten wir also berühren, uns würde nichts passieren. Nun sehen aber beide Anschlüsse der Steckdose gleich aus, so dass wir nicht wissen, welches der gefährliche und welches der ungefährliche Anschluss ist.

Berühre nicht die beiden Anschlüsse der Steckdose. Berühre auch nicht einen einzigen Anschluss der Steckdose.

Die Netzspannung kann aber auch auf andere Art gefährlich werden. Wenn nämlich ein Gerät feucht geworden ist, kann das Wasser eine leitende Verbindung herstellen zwischen unserer Hand und irgendeinem Leiter im Innern des Geräts, der sich auf 230 V befindet. Man kann also auch einen Schlag bekommen, wenn man Teile eines Apparats berührt, die normalerweise isolieren, etwa den Plastikgriff des Föhns.

Feuchtigkeit an elektrischen Geräten ist deshalb besonders gefährlich, weil das Wasser an der Berührungsstelle einen besonders guten Kontakt zu unserem Körper herstellen kann.

Vermeide beim Arbeiten mit elektrischen Geräten Feuchtigkeit.

Wenn ein elektrisches Gerät ein Metallgehäuse hat, oder wenn andere Metallteile des Geräts der Berührung zugänglich sind, gibt es noch eine weitere Gefahrenquelle. Die Isolation einer Leitung, die auf hohem Potential liegt, könnte defekt werden, und die Leitung könnte ein solches Metallteil berühren. Dieses Metallteil läge dann ebenfalls auf hohem Potential. Um dieser Gefahr zu begegnen, wird das Gehäuse des Geräts über den so genannten *Schutzleiter* auf Erdpotential gelegt.

Die Schutzkontakte der Steckdose liegen auf Erdpotential. Das Gehäuse eines Geräts, das man anschließt, der Waschmaschine zum Beispiel, wird über den Schutzleiter – die dritte, gelb-grün markierte Leitung des dreiadrigen Kabels – mit dem Schutzkontakt der Steckdose verbunden, Abb. 16.60. Kommt nun ein Leiter, der auf 230 V liegt, mit dem Gehäuse in Berührung, so gibt es einen Kurzschluss, und die Haussicherung unterbricht den Stromkreis.

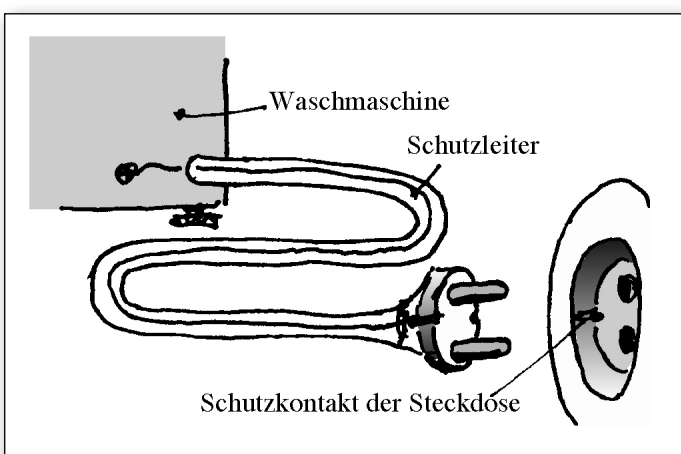


Abb. 16.60

Das Gehäuse der Waschmaschine ist über den Schutzleiter mit der Erde verbunden.

Oft hat man es mit anderen Spannungen als 230 V zu tun. Welche Spannungen sind denn überhaupt gefährlich? Welche Spannungswerte verursachen im Körper einen Strom, der gefährlich ist? Das hängt davon ab, wie man die Leiter, zwischen denen die Spannung liegt, berührt.

Berührt man sie mit zwei Fingerspitzen derselben Hand, so ist die Gefahr kleiner. Wegen der kleinen Kontaktfläche ist die Stromstärke klein. Außerdem fließt der Strom nur durch die eine Hand, so dass auch nur dieser Hand etwas passieren kann.

Fasst man dagegen zwei Leiter, die auf verschiedenem Potential liegen, mit je einer Hand an, so ist die Gefahr viel größer. Wegen der großen Kontaktfläche (mit der ganzen Hand) ist die Stromstärke groß; außerdem fließt der Strom, um von der einen Hand zur anderen zu kommen, zum Teil wenigstens, durch das Herz – und das ist besonders gefährlich. Um kein Risiko einzugehen, soll man die Berührung bei Spannungen über 40 V vermeiden.

Berühre nie zwei Leiter, zwischen denen eine Spannung von mehr als 40 V liegt.

Manchmal laden sich Kleidungsstücke elektrisch auf. Die Spannung gegen Erde kann dabei einige zig kV betragen (1 kV = 1000 V). Die Berührung ist trotzdem ungefährlich, denn die Kleidungsstücke entladen sich sehr schnell, so dass die Stromstärke gefährliche Werte höchstens eine Mikrosekunde (eine Millionstel Sekunde) lang überschreitet – und deshalb ist der Strom wieder ungefährlich.

Aufgaben

1. Ein nicht angeschlossener Föhn ist ins Wasser gefallen. Warum ist es gefährlich, ihn gleich nach dem Herausnehmen aus dem Wasser wieder zu benutzen?
2. In einer Waschmaschine hat sich die Isolierung einer der Leitungen des Netzkabels durchgerieben, so dass die Leitung Kontakt mit dem Gehäuse der Waschmaschine hat. Beim Einschalten der Waschmaschine kann zweierlei passieren.

17

Elektrizität und Energie

17.1 Die Elektrizität als Energieträger

Lampen, Elektromotoren, Elektroherde, Tauchsieder und andere elektrische Geräte brauchen Energie. Sie bekommen die Energie mit dem Energieträger Elektrizität. Die Quelle ist in den meisten Fällen ein Elektrizitätswerk.

Von der Quelle zum Empfänger fließt ein Energiestrom. In jeder Sekunde fließt eine bestimmte Energiemenge, eine bestimmte Zahl von Joules. Du erinnerst dich: Die Energiemenge E , die während der Zeitdauer t irgendwo vorbeifließt, dividiert durch die Zeitdauer t nennt man Energiestromstärke P , oder als Formel

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

Als Maßeinheit von P ergibt sich

Joule/Sekunde = J/s.

Als Abkürzung für Joule pro Sekunde benutzt man „Watt“. Es ist also Watt = Joule/Sekunde

oder

$$W = \frac{J}{s}.$$

Um Energie elektrisch (mit dem Träger Elektrizität) zu transportieren, braucht man ein zweiadriges Kabel, ein Kabel, das aus zwei Leitungen besteht. In den Leitungen fließt ein elektrischer Strom: In der einen Leitung von der Quelle zum Empfänger und in der anderen vom Empfänger zurück zur Quelle. Zwischen den beiden Leitungen herrscht eine elektrische Spannung, d. h. die Leitungen befinden sich auf unterschiedlichem Potential.

Die Stärke des Energiestroms von der Quelle zum Empfänger hängt mit der Stärke des elektrischen Stroms in den Leitungen und mit der Spannung zwischen den Leitungen zusammen. Und es ist nicht schwer, diesen Zusammenhang herzuleiten.

Wir vergleichen die Anordnungen der Abbildungen 17.1a und 17.1b. Beide Bilder zeigen ein Quelle-Empfänger-Paar: jeweils links ein Netzgerät, das auf 12 V eingestellt ist, und rechts eine 12-V-Lampe bzw. zwei 12-V-Lampen. Da die Lampen völlig gleichartig sind, fließt in der zweiten Anordnung ein doppelt so starker Energiestrom wie in der ersten; denn zwei Lampen verbrauchen doppelt so viel Energie wie eine einzige Lampe. Wie steht es nun in den beiden Fällen mit Spannung und elektrischer Stromstärke?

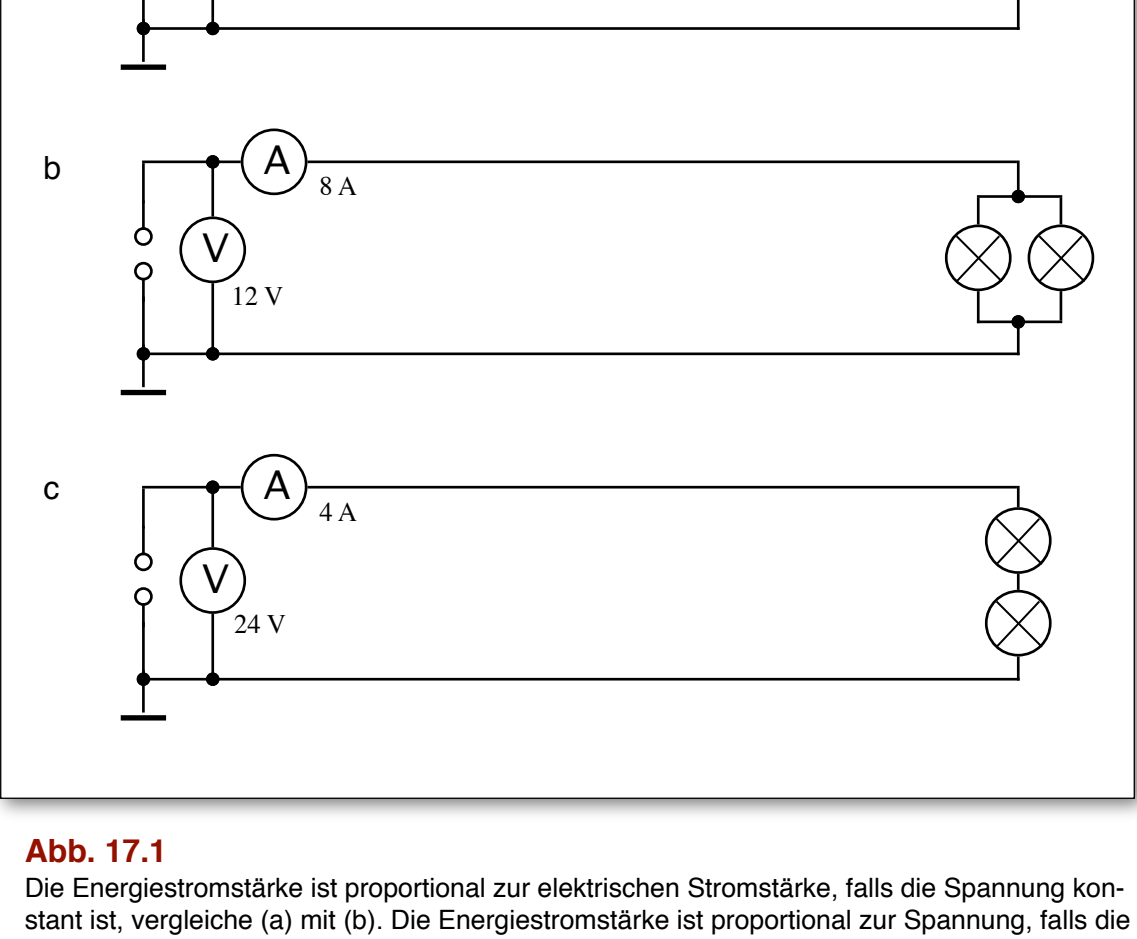


Abb. 17.1

Die Energiestromstärke ist proportional zur elektrischen Stromstärke, falls die Spannung konstant ist, vergleiche (a) mit (b). Die Energiestromstärke ist proportional zur Spannung, falls die elektrische Stromstärke konstant ist, vergleiche (a) mit (c).

Die Spannungen sind in den beiden Fällen dieselben, beide Voltmeter zeigen 12 V an.

Und die elektrischen Stromstärken? Das Amperemeter im ersten Bild zeigt 4 A an. Das bedeutet, dass durch eine Lampe, an der eine Spannung von 12 V liegt, ein elektrischer Strom von 4 A fließt. Im zweiten Bild haben wir zwei Lampen, und an jeder von ihnen liegen 12 V. Durch jede von ihnen fließen daher auch 4 A. Mit der Knotenregel ergibt sich daraus, dass in jeder der langen Leitungen zwischen Quelle und Empfänger 8 A fließen müssen.

Bei der zweiten Anordnung sind also sowohl die Energiestromstärke zwischen Quelle und Empfänger, als auch die elektrische Stromstärke in den Leitungen doppelt so groß wie in der ersten. Hätten wir statt der zwei Lampen drei oder vier genommen, so wären sowohl P als auch I dreimal bzw. viermal so groß gewesen. Wir fassen dieses Ergebnis zusammen: Bei einem elektrischen Energietransport sind – bei konstanter Spannung – Energiestromstärke und elektrische Stromstärke proportional zueinander; oder in Symbolen:

$$P \sim I \quad \text{für } U = \text{const.} \quad (1)$$

Wir haben damit die Hälfte des gesuchten Zusammenhanges. Wir müssen nun noch herausfinden, wie die Energiestromstärke von der Spannung zwischen den Leitungen abhängt. Zu diesem Zweck vergleichen wir Abb. 17.1a mit Abb. 17.1c. Auch in Abb. 17.1c sind zwei Lampen an das Netzgerät angeschlossen; diesmal aber nicht parallel zueinander, sondern hintereinander. Wir müssen zunächst dafür sorgen, dass beide Lampen leuchten, wie es sich gehört; wir müssen dafür sorgen, dass an jeder von ihnen eine Spannung von 12 V liegt. Dazu muss das Netzgerät auf 24 V hochgedreht werden. (Beachte die Potentialwerte in Abb. 17.1c.) Da nun an jeder Lampe 12 V liegen, fließt auch durch jede Lampe ein elektrischer Strom von 4 A. Also: Das Voltmeter zeigt an, dass zwischen den Leitungen eine Spannung von 24 V herrscht, das Amperemeter zeigt an, dass in jeder der beiden Leitungen ein elektrischer Strom von 4 A fließt. Nun der Vergleich mit dem oberen Bild (Abb. 17.1a): Energiestromstärke und Spannung haben sich verdoppelt, die elektrische Stromstärke ist dieselbe. Wir schließen, dass bei konstanter elektrischer Stromstärke die Energiestromstärke zur Spannung proportional ist. In Symbolen:

$$P \sim U \quad \text{für } I = \text{const.} \quad (2)$$

Die Beziehungen (1) und (2) lassen sich zu einem einzigen Ausdruck zusammenfassen:

$$P \sim U \cdot I. \quad (3)$$

Dass die Beziehung (3) richtig ist, erkennt man daran, dass sie in $P \sim I$ übergeht, wenn man U konstant hält, und dass $P \sim U$ aus ihr wird, wenn man I festhält.

Überträgt man Energie mit dem Energieträger Elektrizität, so ist die Energiestromstärke proportional zur Stärke des elektrischen Stroms in den Leitungen und zur Spannung zwischen den Leitungen.

Um die Beziehung (3) zu einer Gleichung zu machen, müssten wir eigentlich einen Proportionalitätsfaktor einführen, der bewirkt, dass die Maßeinheiten auf der rechten und der linken Seite übereinstimmen. Wir würden also schreiben:

$$P = k \cdot U \cdot I.$$

Glücklicherweise wurden aber die elektrischen Maßeinheiten so festgelegt, dass $k = 1$ ist. Man braucht also gar keinen Proportionalitätsfaktor, und es ist:

$$P = U \cdot I \quad (4)$$

Man erhält die Energiestromstärke in Watt, wenn man die Spannung in Volt und die elektrische Stromstärke in Ampere einsetzt.

Aus Gleichung (4) folgt für die Maßeinheiten:

$$W = V \cdot A.$$

Gleichung (4) ist eine der wichtigsten Formeln der Elektrizitätslehre. Wenn man die Werte von zwei der drei Größen P , U und I kennt, kann man mit ihr den Wert der dritten berechnen.

Beispiel:

Die Haussicherung unterbricht den elektrischen Strom, sobald dessen Stärke 16 A überschreitet. Wie viel Energie kann man pro Sekunde maximal aus den Steckdosen entnehmen?

Mit $I = 16$ A und $U = 230$ V ergibt sich nach Formel (4)

$$P = 230 \text{ V} \cdot 16 \text{ A} = 3680 \text{ W}.$$

Zwei Heizlüfter, die je 2000 W verbrauchen, bringen also die Sicherung zum Abschalten.

Wir können nun auch verstehen, was die Angaben, die auf ein elektrisches Gerät aufgedruckt sind, bedeuten. Auf der Glühlampe von Abb. 17.2 steht „220 V/75 W“.

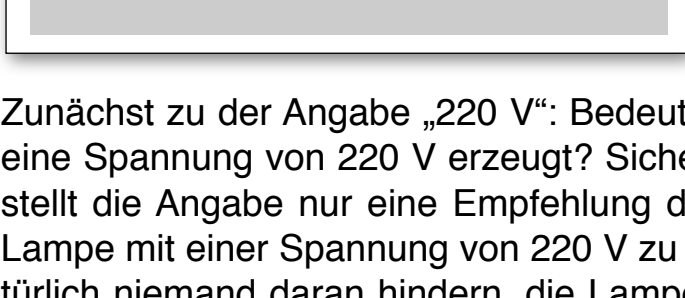


Abb. 17.2

Was bedeutet der Aufdruck „220 V/75 W“?

Zunächst zu der Angabe „220 V“: Bedeutet sie, dass die Glühlampe eine Spannung von 220 V erzeugt? Sicher nicht. Genau genommen stellt die Angabe nur eine Empfehlung dar. Es wird empfohlen, die Lampe mit einer Spannung von 220 V zu betreiben. Es kann uns natürlich niemand daran hindern, die Lampe an eine Quelle mit einer geringeren Spannung anzuschließen. Allerdings ist dann das Licht, das die Lampe abgibt, nicht mehr weiß, sondern mehr oder weniger rötlich. Und wir können die Lampe auch an eine Quelle mit einer höheren Spannung anschließen. Dann wird ihre Lebensdauer geringer sein.

Und was bedeutet der Aufdruck „75 W“? Dass über das Kabel ein Energiestrom von 75 W in die Lampe hineinfließt – falls man sie mit der empfohlenen Spannung betreibt. Bei einer höheren Spannung wird der Energiestrom stärker, bei niedrigerer Spannung wird er schwächer.

Gleichung (4) sagt uns auch, wie man die Stärke des Energiestroms messen kann, der mit einem zweiadrigen Kabel fortgeleitet wird (falls der Energieträger die Elektrizität ist): Man misst die elektrische Stromstärke in einer der Leitungen des Kabels (sie ist gleich der elektrischen Stromstärke in der anderen Leitung), und man misst die Spannung zwischen den Leitungen. Das Produkt aus den beiden Messwerten ist die Energiestromstärke.

Es gibt auch Messgeräte, die die Stärke des Energiestroms direkt messen, die *Wattmeter*. Ein Wattmeter hat einen Eingang und einen Ausgang für ein zweiadriges Kabel. Die Messung geschieht wie bei anderen Stromstärkemessungen auch: Durchtrennen des (zweiadrigen) Kabels und Verbinden der neu entstandenen Enden mit Eingang bzw. Ausgang des Messgeräts, Abb. 17.3.



Abb. 17.3

Zur Messung der Energiestromstärke in einem zweiadrigen Kabel

Aufgaben

- Eine Autoscheinwerferlampe ist an die 12-V-Batterie des Autos angeschlossen. Es fließt ein elektrischer Strom von 3,75 A. Wie stark ist der Energiestrom, der von der Batterie zur Lampe fließt?
- Auf einer Autoblinderlampe steht „12 V/21 W“. Wie stark ist der elektrische Strom, wenn die Lampe leuchtet?
- Abb. 17.4a zeigt zwei Lampen, die an ein Netzgerät angeschlossen sind. Berechne aus den Werten, die die drei Messinstrumente anzeigen
(a) die Stärke des Energiestroms, der aus der Energiequelle herauskommt;
(b) die Stärke des Energiestroms, der zu Lampe L1 fließt;
(c) die Stärke des Energiestroms, der zu Lampe L2 fließt.
- Zwei parallel geschaltete Motoren werden von einer 12-V-Batterie versorgt. Durch Motor 1 fließt ein elektrischer Strom von 2 A, durch Motor 2 fließt ein Strom von 3 A.
(a) Wie viel Energie gibt die Batterie pro Sekunde ab?
(b) Wie stark ist der Energiestrom, der in Motor 1 hineinfließt, und wie stark ist der, der in Motor 2 hineinfließt?
- Eine 12-V-Batterie und eine 9-V-Batterie werden hintereinander geschaltet. Ein Elektromotor wird angeschlossen. Es fließt ein elektrischer Strom von 1,5 A. Wie stark ist der Energiestrom, der zum Motor fließt? Wie viel J gibt die 12-V-Batterie pro Sekunde ab, wie viel die 9-V-Batterie?
- Drei Monozellen sind so zu einer Energiequelle zusammengebaut, wie es Abb. 17.4b zeigt. Welche Spannung liegt zwischen A und B? Mit den Anschlüssen A und B ist ein Energieverbraucher verbunden. Es fließt ein elektrischer Strom von 10 mA. Welche der drei Zellen wird zuerst leer? Wie viel Joule gibt die Quelle pro Sekunde ab? Wie viel geben die drei Monozellen einzeln pro Sekunde ab?
- Ein Transistorradio hat als Energiequelle drei hintereinander geschaltete Monozellen. Wenn das Radio läuft, fließt ein Durchschnittswert des elektrischen Stroms von 60 mA. Jede Monozelle hat einen Energieinhalt von 20 kJ.
(a) Wie stark ist der Energiestrom, der aus den Batterien fließt?
(b) Wie lange läuft das Radio mit einem Satz Batterien?
- Stelle den Energieverbrauch der verschiedensten elektrischen Geräte in eurem Haus in einer Liste zusammen. Bei welchen Geräten ist das Energiesparen besonders lohnend?
- An ein 80-V-Netzgerät ist ein 2-kΩ-Widerstand angeschlossen. Wie stark ist der elektrische Strom, der durch den Widerstand fließt? Wie stark ist der Energiestrom, der zum Widerstand fließt?
- Der Widerstand R in Abb. 17.5 hat einen Wert von 2 Ω. Das Amperemeter zeigt 10 A an. In das Lämpchen L fließt ein Energiestrom von 100 W.
(a) Wie groß ist die von der Batterie erzeugte Spannung?
(b) Wie stark ist der elektrische Strom, der durch das Lämpchen fließt?
(c) Wie stark ist der elektrische Strom, der durch die Batterie fließt?

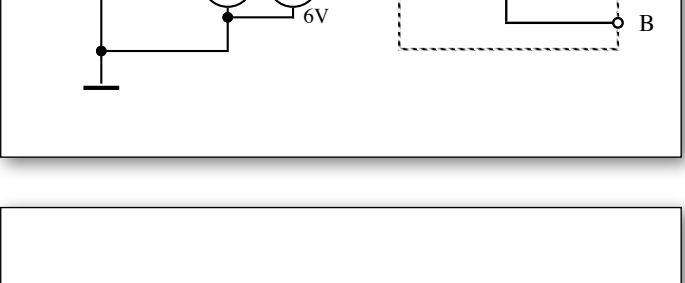


Abb. 17.4

(a) Zu Aufgabe 3;
(b) zu Aufgabe 6

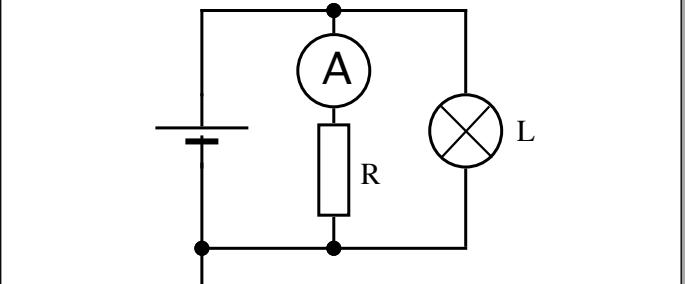


Abb. 17.5

Zu Aufgabe 10

17.2 Der Leitungswiderstand – Energieverlust in Leitungen

Eine 6-V-Lampe ist über ein sehr langes Kabel an ein Netzgerät angeschlossen, Abb. 17.6. Die Spannung am Netzgerät ist zunächst auf 0 V eingestellt. Wir drehen nun die Spannung so lange hoch, bis das Voltmeter bei der Lampe 6 V anzeigt. Die Spannung hat jetzt den richtigen Wert, die Lampe leuchtet so wie sie leuchten soll. Das Amperemeter zeigt an, dass 5 A fließen. Da es sich um einen einfachen, unverzweigten Stromkreis handelt, muss die Stromstärke an allen Stellen des Stromkreises dieselbe sein.



Abb. 17.6
Die Spannung an der Lampe ist niedriger als am Netzgerät. Zwei Volt werden gebraucht, um die Elektrizität durch die langen Leitungen zu drücken.

Eine Sache ist aber merkwürdig. Das linke Voltmeter, das die Spannung zwischen den Anschlüssen des Netzgeräts anzeigt, steht auf 8 V und nicht auf 6 V, wie man es doch eigentlich hätte erwarten können. Wie kann das sein? Wir hatten bisher immer angenommen, dass alle Stellen eines Drahtes auf ein und demselben elektrischen Potential liegen. Diese Annahme ist hier offensichtlich verletzt. Denn wäre das Potential jedes der beiden langen Drähte links und rechts dasselbe, so müsste auch die Potentialdifferenz zwischen dem oberen und dem unteren Draht links und rechts dieselbe sein.

Nachdem wir im vorigen Kapitel etwas über den Widerstand von Drähten erfahren haben, können wir diese Merkwürdigkeit aber erklären: Der Strom von 5 A, der an jeder Stelle des Stromkreises fließt, braucht nicht nur einen Antrieb, um den Widerstand der Lampe zu überwinden; er braucht auch einen Antrieb, um durch die Leitungsdrähte hindurchzukommen. Die beiden Leitungen und die Lampe müssen sich die 8 V, die das Netzgerät liefert, teilen. Die Lampe braucht, wie wir wissen, eine Potentialdifferenz von 6 V. Es bleiben daher noch 2 V dafür übrig, die Elektrizität durch die Zuleitungen hindurchzudrücken. Da Hin- und Rückleitung aus gleichen Drähten bestehen, wird für jede der beiden Leitungen derselbe Antrieb gebraucht. In jeder der beiden Leitungen wird der elektrische Strom also durch eine Spannung von 1 V angetrieben. Zwischen Anfang und Ende jeder der beiden Leitungen liegt eine Potentialdifferenz von 1 V. In Abb. 17.6 sind die Potentialwerte an vier verschiedenen Stellen des Stromkreises angegeben.

Leitungswiderstände sind unerwünscht. Warum? Sie sind die Ursache von Energieverlusten; sie kosten damit Geld.

Wir wollen den Energieverlust des Stromkreises von Abb. 17.6 berechnen. Wir können den Stromkreis auffassen als drei hintereinander geschaltete Energieempfänger. Abb. 17.7 zeigt das so genannte *Ersatzschaltbild*. Hin- und Rückleitung sind durch je einen Widerstand ersetzt: R_h und R_r . Dafür dürfen wir uns die in Abb. 17.7 gezeichneten Leitungen als widerstandslos vorstellen; die Leitungswiderstände sind ja durch R_h und R_r schon berücksichtigt. Die Potentiale der einzelnen Leitungsabschnitte sind in der Abbildung angegeben.

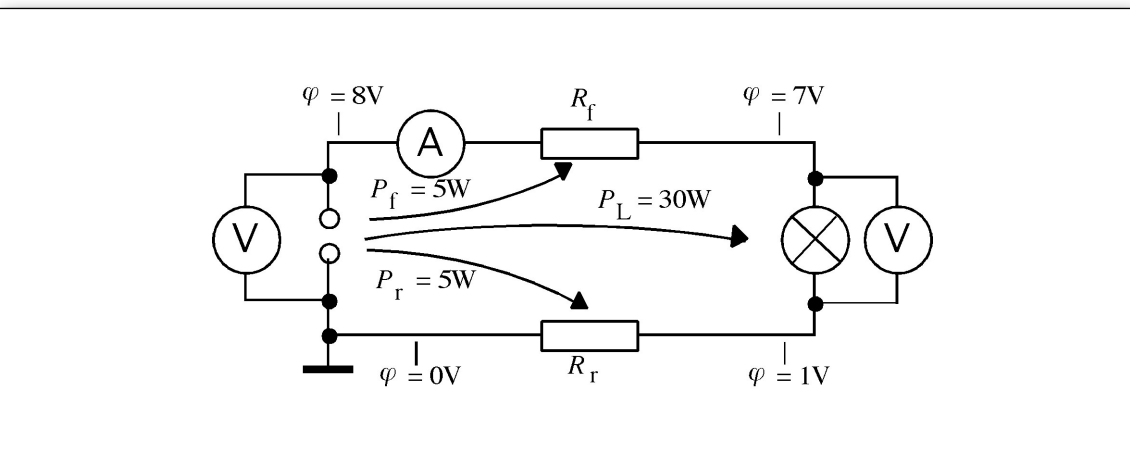


Abb. 17.7
Ersatzschaltbild des Stromkreises von Abb. 17.6. Die Leitungen wurden durch Widerstandssymbole ersetzt.

Zu jedem der drei „Geräte“ (die Lampe, der Widerstand R_h und der Widerstand R_r) fließt nun ein Energiestrom. Wir berechnen die drei Stromstärken P_L , P_h und P_r nach der Gleichung $P = U \cdot I$.

Die elektrische Stromstärke ist für alle drei Bauelemente dieselbe, nämlich 5 A. Die Spannung zwischen den Enden der Hinleitung ist

$$U_h = 8 \text{ V} - 7 \text{ V} = 1 \text{ V},$$

die zwischen den Enden der Rückleitung ist

$$U_r = 1 \text{ V} - 0 \text{ V} = 1 \text{ V}$$

und die Spannung zwischen den Anschlüssen der Lampe ist

$$U_L = 7 \text{ V} - 1 \text{ V} = 6 \text{ V}.$$

Damit ergeben sich die drei Energiestromstärken

$$P_h = 1 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} = 5 \text{ W}$$

$$P_r = 1 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} = 5 \text{ W}$$

$$P_L = 6 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} = 30 \text{ W}.$$

Die 5 W + 5 W = 10 W, die in die Widerstände R_h und R_r , d. h. in die Zuleitungen fließen, bewirken, dass die Zuleitungen warm werden. Diese 10 W sind für uns verloren. Sie stellen den *Verlustenergiestrom* P_V dar. Es ist also

$$P_V = 10 \text{ W}.$$

Man kann übrigens mit der Gleichung

$$R = U/I$$

auch leicht den Widerstand der Leitungen berechnen. Mit

$$U_h = U_r = 1 \text{ V}$$

und

$$I = 5 \text{ A}$$

ergibt sich

$$R_h = R_r = 0,2 \text{ } \Omega.$$

Jeder der beiden Drähte hat einen Widerstand von 0,2 Ω .

Aufgaben

- Ein großer Motor ist über ein langes Kabel an eine 200-V-Quelle angeschlossen. Jede der beiden Leitungen des Kabels hat einen Widerstand von 0,5 Ω . In den Leitungen fließt ein elektrischer Strom von 8 A.
 - Wie stark ist der Energiestrom, der die Quelle verlässt?
 - Wie groß ist der Leistungsverlust?
 - Wie viel Joule kommen pro Sekunde beim Motor an?
- Abb. 17.8 zeigt zwei Anordnungen, bei denen eine Lampe über ein langes Kabel Energie von einem Netzgerät bekommt. Beides sind 60-W-Lampen. Die Lampe von Abb. 17.8a braucht eine Versorgungsspannung von 12 V. Es fließt daher ein elektrischer Strom von 5 A. Die Lampe von Abb. 17.8b braucht 24 V. Daher fließt hier ein Strom von 2,5 A. Jede Leitung hat einen Widerstand von 1 Ω . Berechne für beide Anordnungen
 - die Spannung, die zwischen Anfang und Ende einer Leitung liegt;
 - die Spannung an den Anschlüssen des Netzgeräts;
 - den Energieverlust.Vergleiche die Verluste der beiden Anordnungen. Formuliere eine Regel.

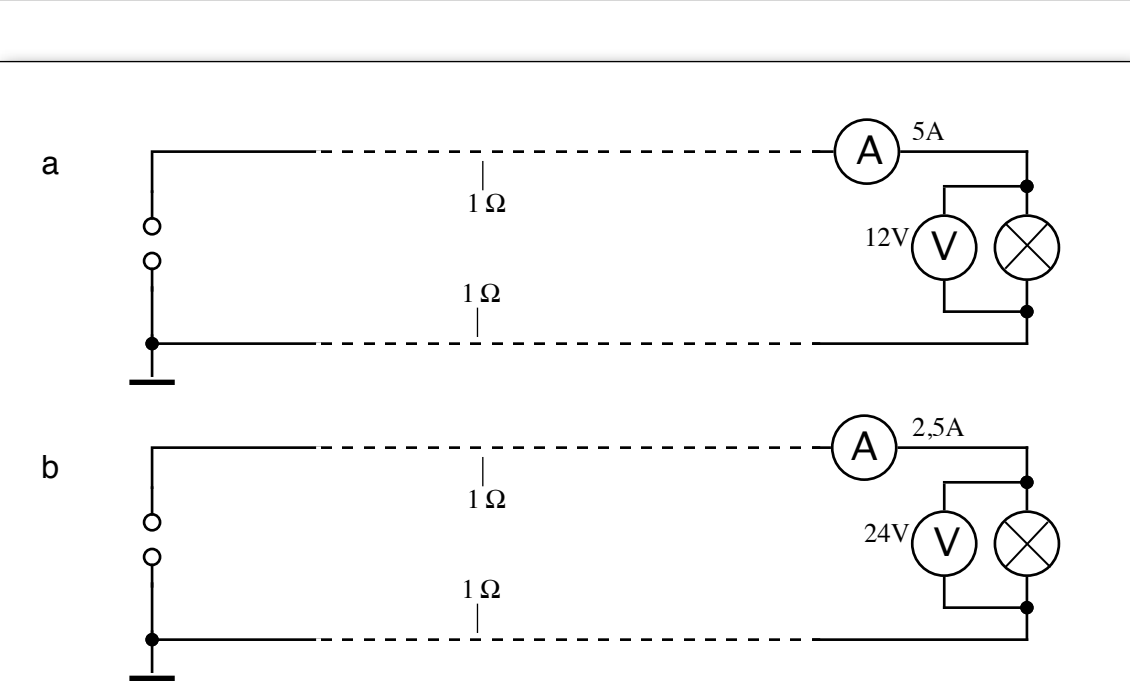


Abb. 17.8
In beiden Fällen kommt gleich viel Energie bei der Lampe an. Die Verluste sind aber verschieden.

18

Das magnetische Feld

18.1 Einige einfache Experimente mit Magneten

Magneten können sich anziehen und abstoßen. Die Anziehung bzw. Abstoßung geht von den so genannten *Polen* aus.

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 eine Pol weist nach Norden, der andere nach Süden. Es muss also zweierlei Arten von Polen geben. Den Pol, der in unserem Experiment nach Norden weist, nennt man Nordpol, den anderen Südpol.

Die meisten Magneten haben einen Nordpol und einen Südpol. Manche haben aber auch mehr Pole, z. B. zwei Nord- und zwei Südpole. Magneten mit nur einem einzigen Pol, z. B. einem Nordpol, gibt es nicht. Abb. 18.1 zeigt drei verschiedene Magneten.

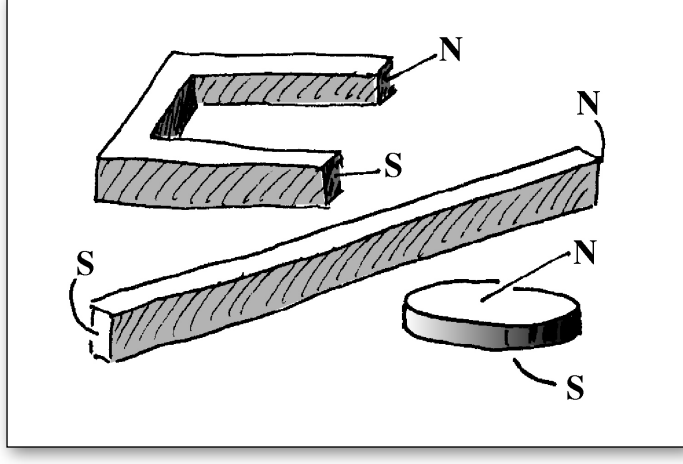


Abb. 18.1
Hufeisenmagnet, Stabmagnet und Scheibenmagnet

Anziehung findet zwischen zwei Magnetpolen nur statt, wenn der eine ein Nord- und der andere ein Südpol ist. Abstoßung beobachtet man zwischen zwei „gleichnamigen“ Polen, also zwischen zwei Nordpolen oder zwischen zwei Südpolen, Abb. 18.2. Die Anziehung oder Abstoßung ist umso stärker, je näher die beiden Pole beieinander sind.

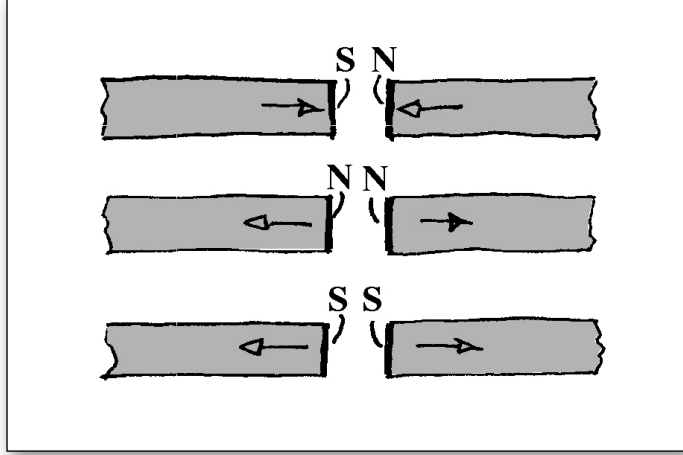


Abb. 18.2
Ungleichnamige Pole ziehen sich an, gleichnamige Pole stoßen sich ab.

Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.

Die bisher gemachten Feststellungen beziehen sich nur darauf, wie ein Magnet auf einen anderen reagiert. Nun gibt es noch eine Erscheinung, die mit der gerade diskutierten eng verwandt ist, sich aber doch in einem wesentlichen Punkt unterscheidet, Abb. 18.3: Ein Magnet zieht Gegenstände aus Eisen an, zum Beispiel Nägel oder Büroklammern.

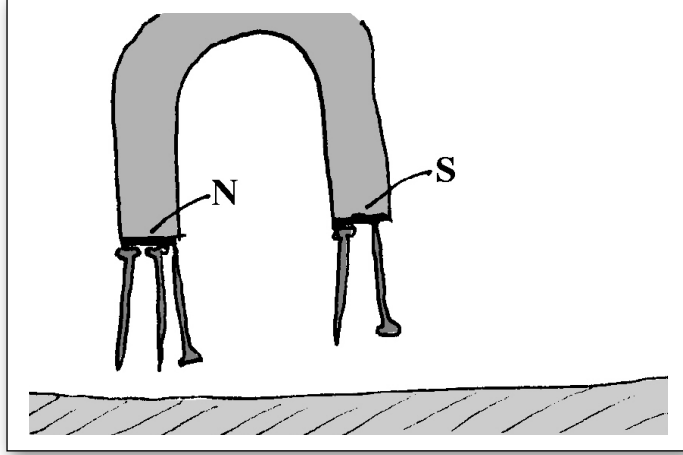


Abb. 18.3
Gegenstände aus „Weicheisen“ werden von einem Magneten immer angezogen und nie abgestoßen.

Er zieht diese Gegenstände immer an, er stößt sie nie ab. Dieses Verhalten steht nicht im Widerspruch zu unserer Regel, ja es lässt sich sogar mit ihr erklären. Auch dass ein Nagel von einem Magneten angezogen wird, liegt daran, dass sich ungleichnamige Pole anziehen: Der Nagel wird nämlich, sobald er in die Nähe eines Magnetpols kommt, selbst zum Magneten. Bringt man einen Nagel in die Nähe des Nordpols eines Magneten, Abb. 18.4a, so entsteht im Nagel auf der Seite, die dem Nordpol des Magneten zugewandt ist, ein Südpol. In Abb. 18.4a entsteht der Südpol also am Nagelkopf. Am anderen Ende des Nagels entsteht ein Nordpol. Es ist klar, dass der Nagel nun zum Nordpol des Magneten hingezogen wird.

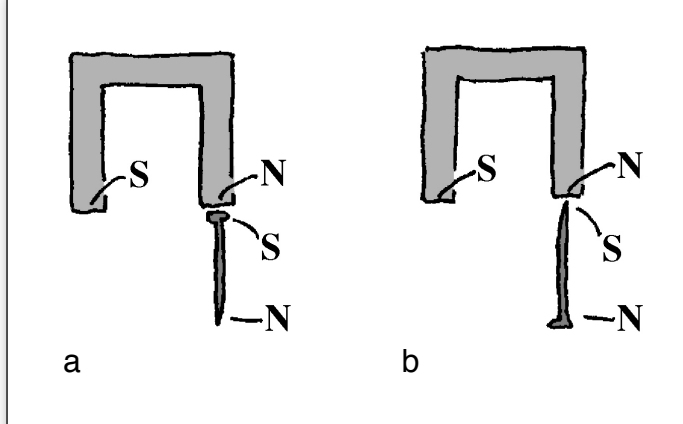


Abb. 18.4
An dem Ende des Nagels, das dem Nordpol des Magneten am nächsten ist, entsteht ein Südpol.

Dreht man den Nagel um, Abb. 18.4b, so entsteht der neue Südpol wieder auf der dem Nordpol des Magneten zugewandten Seite, also an der Nagelspitze, während der Nagelkopf zum Nordpol wird.

Entfernt man den Nagel wieder vom Magneten, so verschwinden seine Pole wieder.

Man versteht nun auch die Erscheinung von Abb. 18.5. Der zweite Nagel hängt an dem neu entstandenen Nordpol an der Spitze des ersten Nagels.

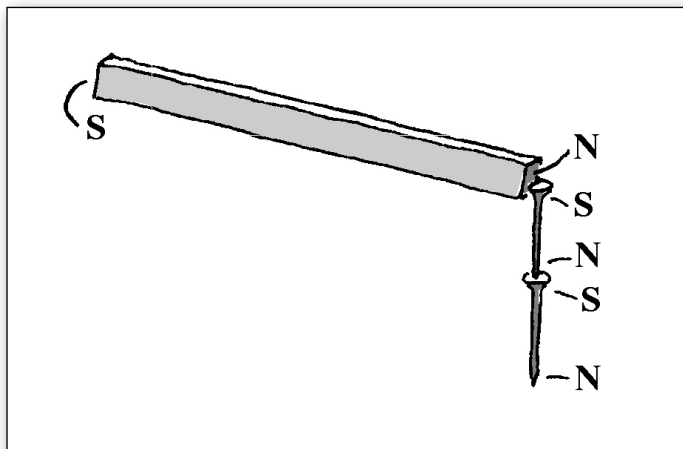


Abb. 18.5
Der untere Nagel hängt mit seinem Südpol am Nordpol des oberen Nagels.

Um zu betonen, dass ein „richtiger“ Magnet seine Pole nicht so leicht verliert wie ein Nagel, nennt man ihn auch einen *Dauermagneten*. Der Nagel ist kein Dauermagnet.

Das Erzeugen von magnetischen Polen an einem Gegenstand nennt man *magnetisieren*. Als wir den Nagel in die Nähe des Dauermagneten gebracht haben, haben wir ihn magnetisiert. Der Dauermagnet wurde schon vom Hersteller magnetisiert.

Materialien wie das Eisen, aus dem der Nagel besteht, nennt man *weichmagnetisch*. Weichmagnetische Stoffe werden magnetisiert, sobald sie in die Nähe eines Magneten kommen. Sie lassen sich sehr leicht magnetisieren. Sie verlieren aber ihren Magnetismus auch wieder, sobald man sie von dem Magneten entfernt.

Das Material, aus dem man Dauermagneten macht, nennt man *hartmagnetisch*.

Auch hartmagnetische Stoffe können ihren Magnetismus wieder verlieren. Man braucht nur etwas „Gewalt“ anzuwenden. Erhitzt man einen Dauermagneten auf eine Temperatur von etwa 800 °C, so verliert er seinen Magnetismus. Die Magnetpole verschwinden und kommen auch nicht wieder, wenn man den Magneten wieder abkühlt. Versuch es selbst, falls du einen Magneten hast, von dem du dich trennen kannst.

Ein typischer weichmagnetischer Stoff ist das „Weicheisen“. Es ist die Eisensorte, aus der man z. B. Nägel macht. Hartmagnetische Stoffe haben eine kompliziertere Zusammensetzung. Auch sie enthalten aber meist Eisen.

Es gibt auch Stoffe, die mit ihren Eigenschaften zwischen diesen beiden Extremfällen liegen. Hierzu gehört der Stahl. Auch ein Stück Stahl bekommt Magnetpole, wenn man es in die Nähe eines anderen Magneten bringt. Entfernt man es dann wieder, so werden seine Pole schwächer, verschwinden aber nicht ganz.

Man kann also Stahl dauerhaft magnetisieren, d. h. zum Magneten machen. Du kannst es selbst versuchen, zum Beispiel mit einer Stahlstricknadel. Das Magnetisieren ist besonders wirkungsvoll, wenn du mit einem Pol eines starken Magneten mehrere Male immer in dieselbe Richtung über die Stricknadel streichst.

Man benutzt diesen Effekt zum Speichern von Daten, z. B. auf der Festplatte des Computer oder auf Kreditkarten. Auf dem Träger, d. h. der Festplatte oder dem Magnetstreifen der Kreditkarte, befindet sich eine sehr dünne Schicht aus einem Material, das sich leicht magnetisieren lässt, und das seinen Magnetismus behält. Die Daten werden dadurch gespeichert, dass man auf die Schicht des Trägers entlang einer Linie ein bestimmtes Muster magnetisiert.

Aufgabe

Jemand behauptet, es gebe nicht zwei, sondern vier verschiedene Arten von Magnetpolen. Er gibt dir zwei Magneten: einen normalen mit einem Nord- und einem Südpol, und einen anderen, der angeblich einen A- und einen B-Pol haben soll. Was für Experimente kannst du machen, um ihm zu beweisen, dass seine Behauptung falsch ist?

18.2 Magnetpole

Unsere bisherigen Aussagen über Magnetpole waren in mancher Beziehung noch etwas vage. Wo genau sitzen eigentlich die Pole bei einem Magneten? Wo fangen sie an, wo hören sie auf?

Wir machen ein sehr einfaches Experiment mit zwei kräftigen, völlig gleichartigen Hufeisenmagneten. Zunächst heben wir mit einem der beiden Magneten einen schweren Eisenblock, Abb. 18.6.

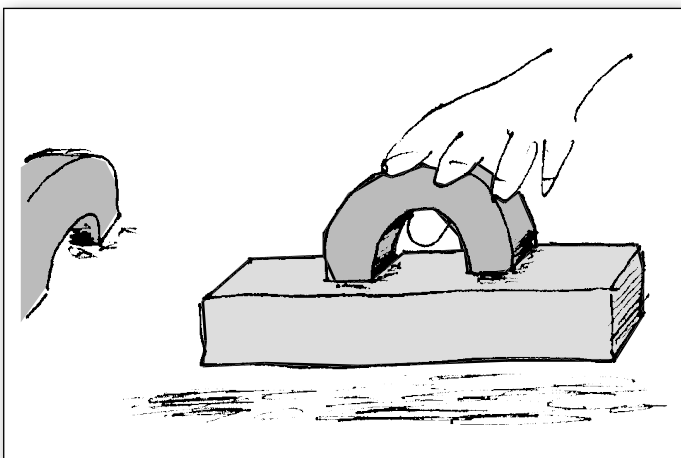


Abb. 18.6

Der Eisenblock kann mit einem einzigen der beiden Hufeisenmagneten hochgehoben werden.

Wir bringen nun die Magneten so zusammen, dass der Nordpol des einen am Südpol des anderen hängt und der Südpol des einen am Nordpol des anderen, Abb. 18.7. Wir versuchen nun, mit diesem ringförmigen Gebilde unseren Eisenblock hochzuheben. Es geht aber nicht, der Block bleibt nicht hängen. Die Wirkung der Pole ist also verschwunden. Wir können auch sagen, die Pole sind verschwunden, sie haben sich gegenseitig „aufgehoben“.

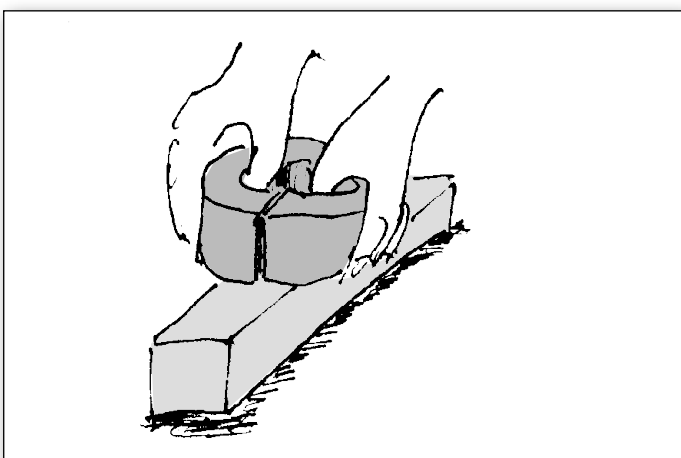


Abb. 18.7

Die Hufeisenmagneten bilden einen Ring. Der Eisenblock bleibt an diesem Ring nicht hängen.

Wir wollen diese Beobachtung noch etwas genauer beschreiben. Bei einem Magneten sitzt an den Polen etwas, das wir *magnetische Ladung* nennen wollen. Diese magnetische Ladung befindet sich an der Oberfläche des Magneten, im Fall der Hufeisenmagneten von Abb. 18.6 an den beiden Endflächen.

Aus der Tatsache, dass sich Nord- und Südpolladung gegenseitig aufheben, kann man schließen, dass die magnetische Ladung mit zweierlei Vorzeichen auftritt. Welche der beiden, Nord- oder Südpolladung, man als positiv und welche als negativ bezeichnet, ist egal. Man muss sich nur ein für alle Mal festlegen. Man hat nun willkürlich die Nordpolladung als positiv und die Südpolladung als negativ definiert.

Bringt man gleich viel positive und negative magnetische Ladung zusammen, so entsteht insgesamt die Polladung null, die positive und die negative magnetische Ladung heben sich gegenseitig auf. (Es ist so, als hättest du gleichzeitig 100 € Schulden und 100 € Guthaben. Dein gesamter Geldbesitz wäre dann 0 €.)

Das Experiment von Abb. 18.7 lässt sich nun leicht deuten: An jeder der beiden Berührungsstellen der Magneten wurde gleich viel positive und negative magnetische Ladung zusammengebracht. Wir können aus diesem Experiment noch eine andere, sehr einfache Schlussfolgerung ziehen: Ein einziger Magnet enthält genauso viel positive wie negative magnetische Ladung.

Ein Magnet enthält genauso viel positive wie negative magnetische Ladung.

Dieser Satz gilt für jeden Magneten, zum Beispiel auch für den unsymmetrischen in Abb. 18.8a.

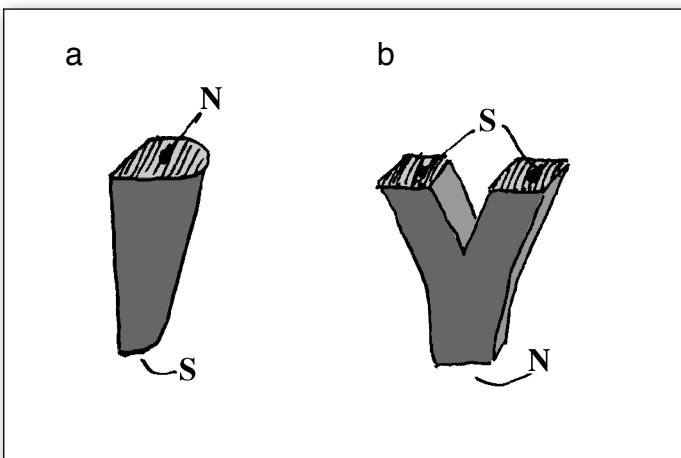


Abb. 18.8

Auch für jeden dieser ungewöhnlichen Magneten ist die Nordpolladung gleich der Südpolladung.

Die magnetische Ladung sitzt hier an den beiden Endflächen. Da der Nordpol aber eine größere Fläche einnimmt als der Südpol, muss die Ladung auf der Südpolseite stärker konzentriert sein als auf der Nordpolseite. Abb. 18.8b zeigt einen anderen, etwas ungewöhnlichen Magneten: Er hat einen Nordpol, aber zwei Südpole. Wieder ist aber die Nordpolladung gleich der gesamten Südpolladung.

18.3 Magnetisierungslinien

Es fällt uns nun nicht mehr schwer, eine andere bekannte Erscheinung zu erklären. Bricht man einen Stabmagneten durch, so entstehen zwei neue Magnetpole, Abb. 18.9. Dieses Durchbrechen kann man wiederholen, d. h. die Bruchstücke wieder durchbrechen, so oft man will: Man erhält immer wieder komplette Magneten, und jedes Teilstück hat genauso viel Nordpolladung wie Südpolladung.

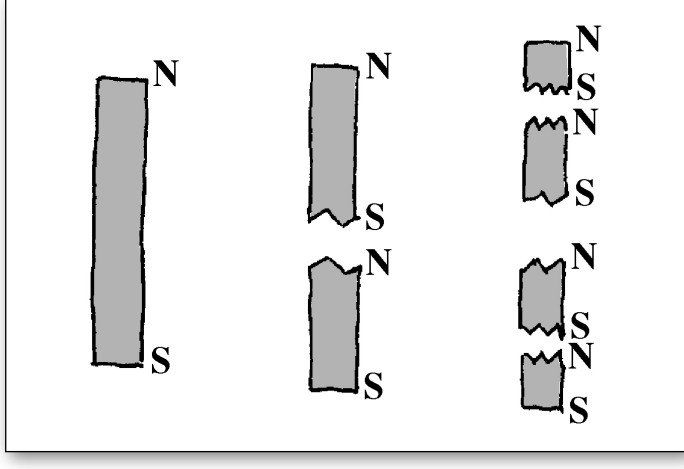


Abb. 18.9

Bricht man einen Stabmagneten durch, so entstehen an der Bruchstelle zwei neue Pole.

Bricht man ein nicht magnetisiertes Stück Stahl durch, so sitzen an der Bruchstelle keine Polladungen. Bricht man dagegen ein magnetisiertes Stück Stahl durch, so erhält man Pole. Wir schließen daraus, dass beim Magnetisieren eines Stücks Eisen das *ganze* Eisenstück verändert wird und nicht nur die Stellen, wo sich die Pole befinden.

Wie jeder andere Stoff, so besteht auch das Eisen aus sehr, sehr kleinen Teilchen, den Atomen. Beim Eisen ist nun jedes Atom selbst magnetisch, d. h. jedes Atom ist ein winzig kleiner Magnet. Solange das Eisen nicht magnetisiert ist, sind aber die atomaren Magneten ganz unregelmäßig orientiert. Das hat zur Folge, dass das Eisenstück als Ganzes keine Magnetisierung zeigt, Abb. 18.10a. Die Wirkungen der Einzelmagneten heben sich gegenseitig auf.

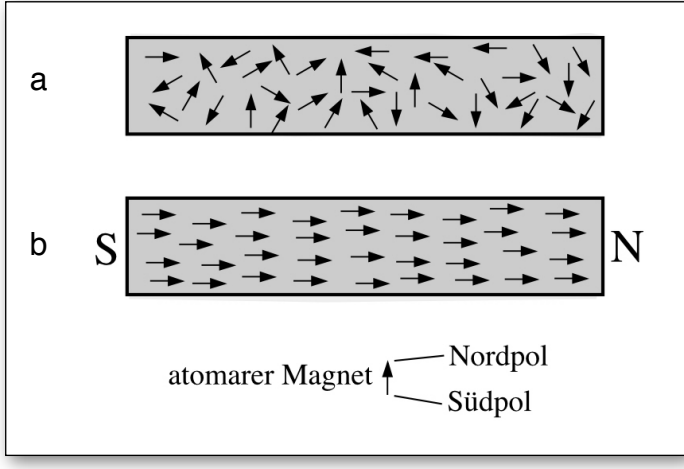


Abb. 18.10

(a) In einem unmagnetisierten Stück Eisen sind die Richtungen der atomaren Magneten ungeordnet. (b) In einem magnetisierten Stück Eisen sind die atomaren Magneten ausgerichtet. An der linken Stirnfläche des Magneten ist ein Südpol, an der rechten ein Nordpol entstanden.

In einem Dauermagneten oder einem magnetisierten Stück Weich-eisen dagegen sind die atomaren Magneten regelmäßig ausgerichtet, wie etwa in Abb. 18.10b. Das hat zur Folge, dass an der linken Stirnfläche des Magneten Südpolladung (negative magnetische Ladung) sitzt, und an der rechten Nordpolladung (positive magnetische Ladung).

Abb. 18.10b zeigt auch, wie man den Magnetisierungszustand eines Gegenstandes grafisch darstellen kann. Man kann diese Darstellung aber noch etwas praktischer gestalten. Statt die atomaren Magnete durch viele einzelne Pfeile anzudeuten, zeichnet man durchgehende Linien, die *Magnetisierungslinien*. Man zeichnet sie so, dass ihre Richtung die Orientierung der atomaren Magneten angibt. Man versieht jede dieser Linien mit einem Pfeil, und zwar so, dass die Linie vom Süd- zum Nordpol läuft, Abb. 18.11a.

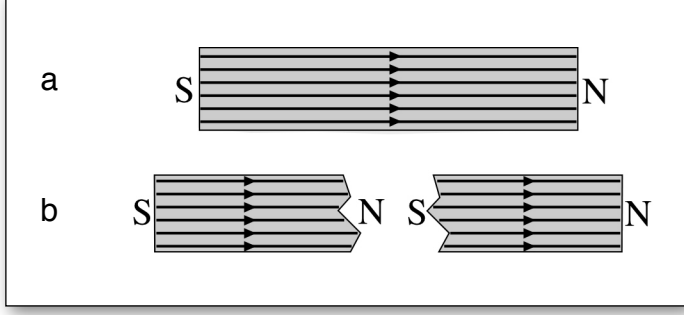


Abb. 18.11

(a) Grafische Darstellung des Magnetisierungszustandes mit Hilfe von Magnetisierungslinien. (b) Beim Durchbrechen des Magneten entstehen neue Pole.

Magnetisierungslinien beschreiben den Magnetisierungszu-
stand von Materie. Sie beginnen an negativen magnetischen
Ladungen (Südpolladungen) und enden an positiven magneti-
schen Ladungen (Nordpolladungen).

Das Magnetisierungslinienbild ist sehr aussagekräftig. Es sagt uns, an welchen Stellen bei einem Magneten die magnetische Ladung sitzt: Dort, wo Linien beginnen, sitzt negative, wo sie enden, positive magnetische Ladung. Es sagt uns auch, was passiert, wenn man einen Magneten durchbricht. Zerbricht man zum Beispiel den Magneten von Abb. 18.11a, so wie es Abb. 18.11b zeigt, so enden an der rechten Seite des linken Bruchstücks Magnetisierungslinien. Hier befindet sich daher ein neuer Nordpol. An der linken Seite des rechten Bruchstücks beginnen Magnetisierungslinien. Hier ist ein neuer Südpol entstanden.

Man kann ein Stück Eisen auf die verschiedensten Arten magnetisieren. Wir betrachten einen etwas ungewöhnlichen Magneten, Abb. 18.12a. Abb. 18.12b zeigt, wie er bei der Herstellung magnetisiert wurde. Das Magnetisierungslinienbild sagt uns, was passiert, wenn wir den Magneten durchbrechen. An den oberen Bruchstellen entstehen Pole, an den unteren nicht, Abb. 18.12c.

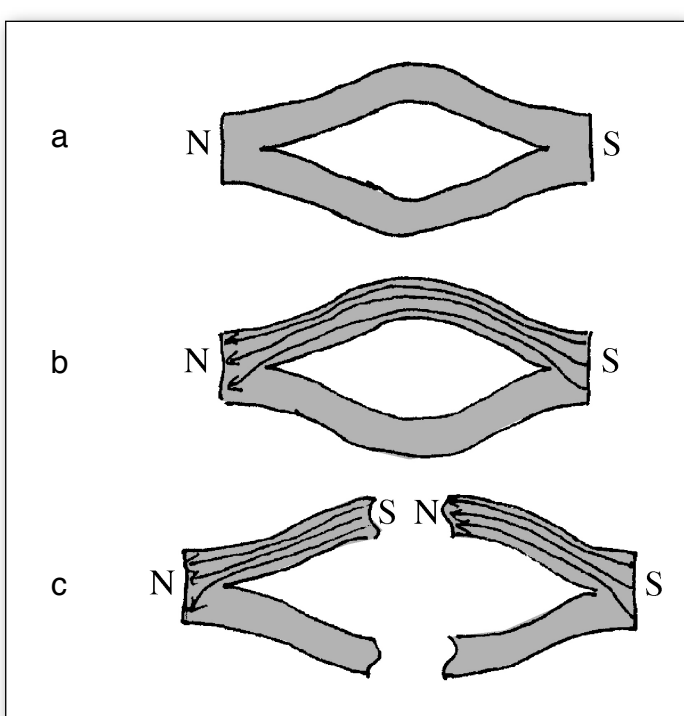


Abb. 18.12

(a) Ein ungewöhnlicher Magnet. (b) Dass die Magnetisierungslinien nur durch den oberen Schenkel verlaufen, ist von außen nicht zu erkennen. (c) Beim Durchbrechen entstehen an den oberen Bruchstellen Pole, an den unteren nicht.

Du siehst, dass man aus den Magnetisierungslinien auf die Lage der Pole schließen kann. Lässt sich dieser Schluss auch umkehren? Kann man die Magnetisierungslinien zeichnen, wenn die Lage der Pole vorgegeben ist? Wir betrachten Abb. 18.13a.

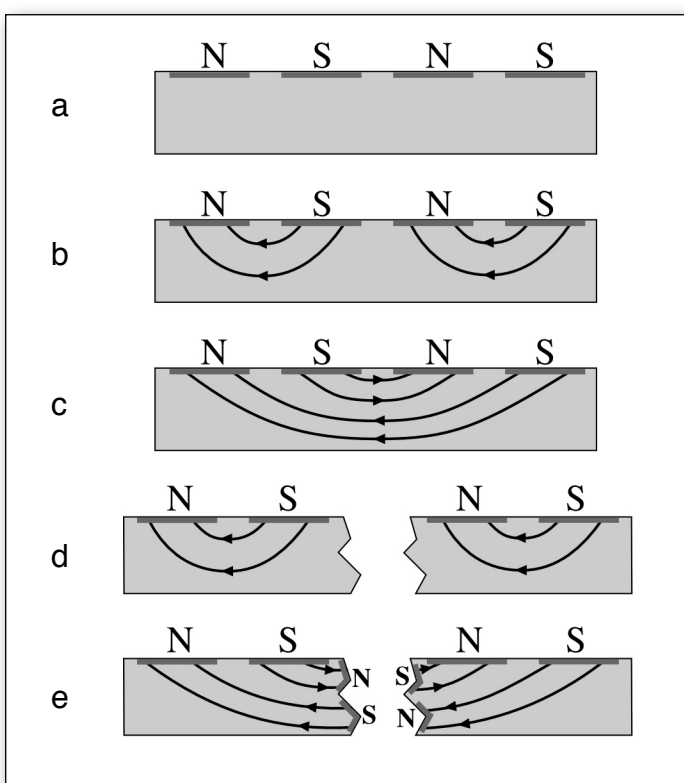


Abb. 18.13

(a) Ein Magnet mit 4 Polen an der Oberseite. (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.

Der Magnet hat 4 Pole, alle auf einer Seite. Wie verlaufen die Magnetisierungslinien? Du siehst leicht, dass es mehrere Lösungen gibt: Magneten mit den in Abb. 18.13a dargestellten Polen kann man auf verschiedene Arten herstellen. Die Abbildungen 18.13b und 18.13c zeigen zwei Möglichkeiten. 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 durchzuberechnen. Beim Durchbrechen des Magneten von Abb. 18.13b entstehen keine neuen Pole, Abb. 18.13d. Wenn man dagegen den Magneten von Abb. 18.13c durchbricht, entsteht an der Bruchstelle auf jeder Seite ein Nord- und ein Südpol, Abb. 18.13 e.

Aufgaben

- Wie könnten die Magnetisierungslinien in einem Hufeisenmagneten verlaufen?
- Wie könnten die Magnetisierungslinien in dem Magneten der Abb. 18.14a verlaufen?
- Wie könnten die Magnetisierungslinien in dem Magneten der Abb. 18.14b verlaufen? Gib zwei Lösungen an.
- Ein Magnet habe die Form eines zylindrischen Scheibchens. Der Magnet hat auf seiner Zylindermantelfläche drei Nord- und drei 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.
- Jemand gibt dir einen Stahlring und behauptet, der Ring sei magnetisiert, und zwar so, dass die Magnetisierungslinien der Ringform folgen und im Kreis herumlaufen. Der Magnet hat also keine Pole. Wie kannst du feststellen, ob die Behauptung zutrifft?

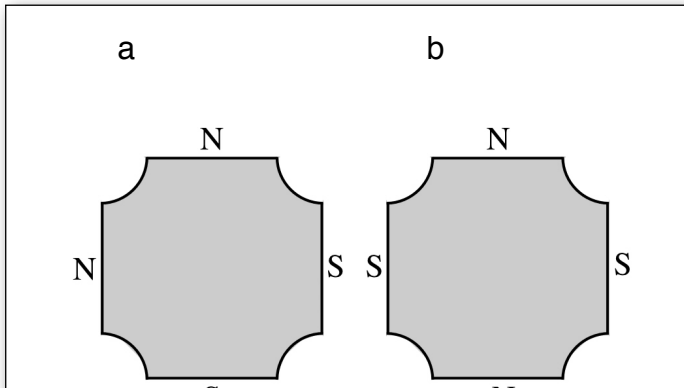


Abb. 18.14

Zu den Aufgaben 2 und 3. Wie verlaufen die Magnetisierungslinien?

18.4 Das magnetische Feld

Wir wenden uns für kurze Zeit einem ganz anderen Problem zu. Die beiden Wagen in Abb. 18.15a bewegen sich aufeinander zu, weil Willy an dem Seil zieht. Die Wagen in Abb. 18.15b werden durch eine Feder voneinander weggedrückt. Abb. 18.15c zeigt zwei Kolben in einem Zylinder. Jemand drückt auf den linken Kolben. Dadurch setzt sich der rechte Kolben in Bewegung.

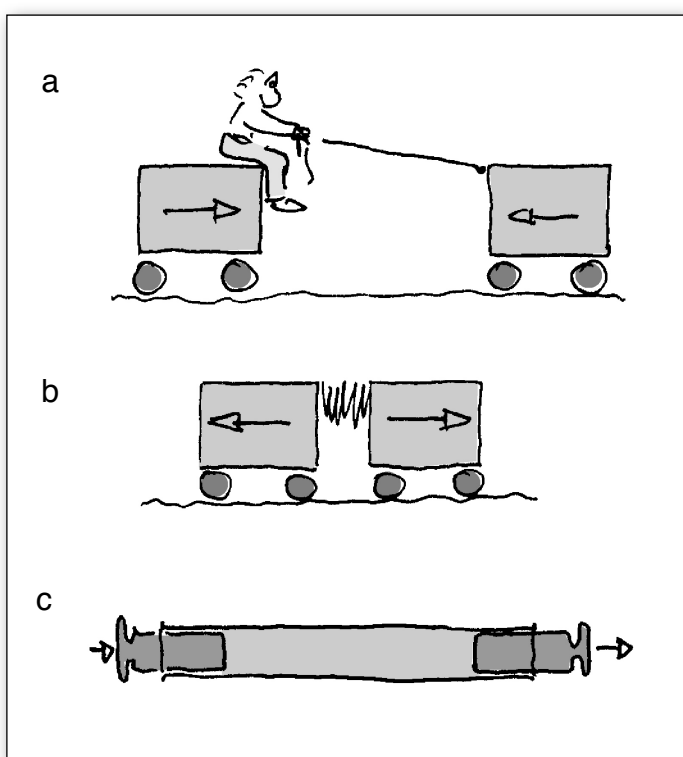


Abb. 18.15

Die beiden Wagen in Bild a sind durch ein Seil miteinander verbunden, die Wagen in Bild b durch eine Feder und die Kolben in Bild c durch Luft.

Den drei Situationen von Abb. 18.15 ist etwas gemeinsam: Jedes Mal gerät ein Gegenstand auf Kosten eines anderen in Bewegung. (Ein Gegenstand bekommt vom anderen Impuls.)

Worauf es uns im Augenblick ankommt, ist die folgende Feststellung: Damit ein Gegenstand A auf einen Gegenstand B drücken oder an B ziehen kann, muss zwischen A und B eine Verbindung existieren. (Damit Impuls von A nach B oder von B nach A fließen kann, muss eine Verbindung existieren.)

Im ersten Beispiel von Abb. 18.15 ist die Verbindung das Seil, im zweiten ist es die Feder und im dritten die Luft im Zylinder. Wir wollen dieses fast selbstverständliche Ergebnis festhalten:

Wenn ein Gegenstand einen anderen wegdrückt oder zu sich heranzieht, muss es eine Verbindung zwischen den Gegenständen geben.

Zurück zum Magnetismus: Auf zwei Wagen werden Magneten montiert, Abb. 18.16, und Wagen A wird auf Wagen B zubewegt. Noch bevor sich die Wagen oder die Magneten berühren, setzt sich B in Bewegung.

Selbstverständlich, wirst du sagen. Mit dieser Erscheinung haben wir uns ja ausführlich beschäftigt. Der linke Nordpol stößt den rechten Nordpol ab. Wenn wir nun aber unseren letzten Merksatz ernst nehmen, können wir eine neue Schlussfolgerung ziehen: Zwischen den beiden Nordpolen in Abb. 18.16 muss es eine Verbindung geben, eine Verbindung, über die der linke Nordpol am rechten schiebt. Diese Verbindung ist unsichtbar (wie übrigens auch die Luft in Abb. 18.15c). Man nennt das Gebilde, das die beiden Nordpole in Abb. 18.16 miteinander verbindet, ein *magnetisches Feld*.

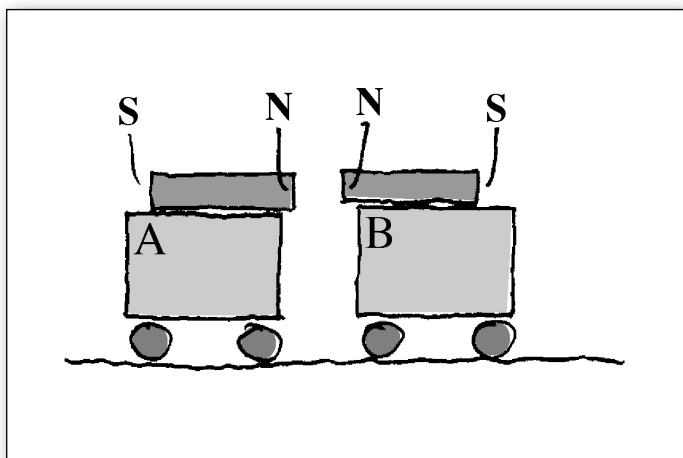


Abb. 18.16

Die beiden Magneten sind durch ihr magnetisches Feld miteinander verbunden.

Nimm zwei sehr starke Magneten, nähere gleichnamige Pole einander an, bewege sie aufeinander zu. Du spürst das Magnetfeld, das die Pole auseinanderzuhalten versucht.

Magnetisches Feld hängt an jedem der beiden Pole eines Magneten. Bringt man zwei Pole von zwei verschiedenen Magneten zusammen, so verhält sich das gesamte Feld zwischen den beiden Polen ähnlich wie eine elastische Feder.

Genauso wie eine Feder drücken und ziehen kann, so kann auch das Feld drücken und ziehen. Es gibt also nicht zwei verschiedene Sorten Feld. Wie es kommt, dass das magnetische Feld manchmal drückt und manchmal zieht, wirst du besser verstehen, nachdem du den nächsten Abschnitt gelesen hast.

Im Augenblick hilft uns das Feld schon, eine alte Regel genauer zu formulieren. Wir hatten früher gesagt: „Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.“ Sieh dir noch einmal die Situation in Abb. 18.15b an. Würdest du hier sagen, die beiden Wagen stoßen sich ab? Sicher nicht. Es trifft die Sache besser, wenn man sagt: „Die Feder drückt die beiden Wagen voneinander weg.“ Entsprechend wollen wir nun auch unsere Regel über die Magneten besser formulieren:

Gleichnamige Magnetpole werden von ihrem Feld voneinander weggedrückt, ungleichnamige werden zueinander hingezogen.

18.5 Die grafische Darstellung magnetischer Felder

Die Wirkung eines magnetischen Feldes, das an einem Pol hängt, wird nach außen hin, d. h. wenn man sich von dem Pol entfernt, schwächer. Das liegt daran, dass das Feld in Polnähe dichter ist. Seine Dichte nimmt nach außen hin ab, ähnlich wie die Dichte der Luft über der Erdoberfläche nach oben hin abnimmt. Wir können also nicht sagen, das Feld reiche vom Pol aus bis zu einem ganz bestimmten Abstand vom Pol. Das Feld hat keinen Rand, es hat keine scharfe Grenze – so wie die Luft über der Erde keine scharfe Grenze hat.

Wenn wir nun das magnetische Feld in einer Zeichnung darstellen wollen, können wir seine unterschiedliche Dichte dadurch zum Ausdruck bringen, dass wir das Feld in Polnähe dunkelgrau zeichnen und die Grautönung nach außen hin immer heller werden lassen, Abb. 18.17.

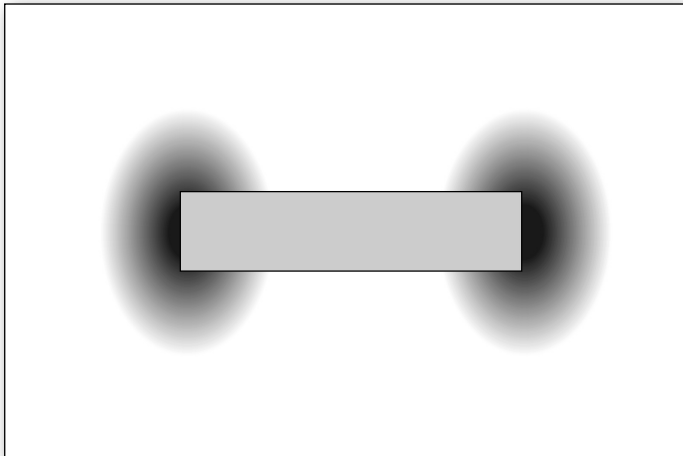


Abb. 18.17

Die Dichte des magnetischen Feldes wird durch unterschiedliche Dichte der Grautönung zum Ausdruck gebracht.

Eine andere Methode besteht darin, dass man das Feld durch Punkte andeutet und die Punkte in Polnähe dichter zeichnet als weiter außen, Abb. 18.18.

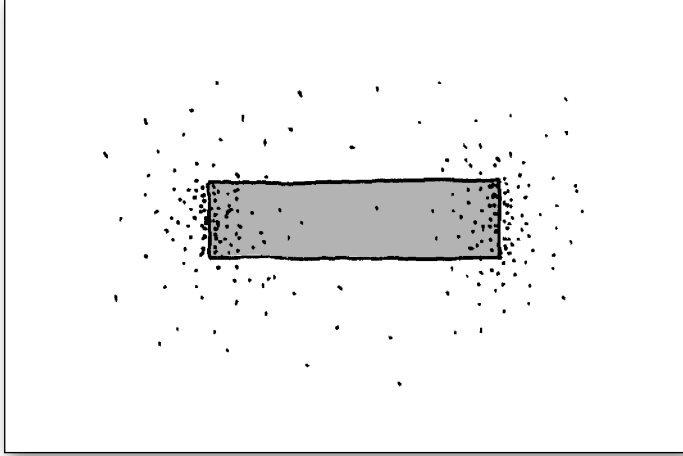


Abb. 18.18

Die Dichte des Magnetfeldes wird durch unterschiedliche Dichte der Punkte zum Ausdruck gebracht.

Die Darstellung lässt sich aber noch verbessern. Um das einzusehen, müssen wir noch einige Experimente machen. Wir stellen zunächst in die Nähe eines Magneten eine Kompassnadel, d. h. einen kleinen, drehbar gelagerten Magneten. Die Richtung, in die sich die Nadel einstellt, hängt nun davon ab, an welche Stelle wir sie stellen. Jeder Stelle des Feldes unseres großen Magneten entspricht eine bestimmte Richtung. Wir sagen auch: Das Feld des Magneten *hat* an jeder Stelle eine bestimmte Richtung.

Dass man jeder Stelle eines massiven Gegenstandes eine bestimmte Richtung zuordnen kann, ist nichts Ungewöhnliches. Dass Holz gemasert ist, bedeutet ja nichts anderes, als dass es an jeder Stelle eine Richtung gibt, in der es sich besonders leicht spalten lässt, Abb. 18.19. Wir haben im vorigen Abschnitt gesehen, dass es auch in Eisen ausgezeichnete Richtungen gibt, nämlich dann, wenn das Eisen magnetisiert ist.

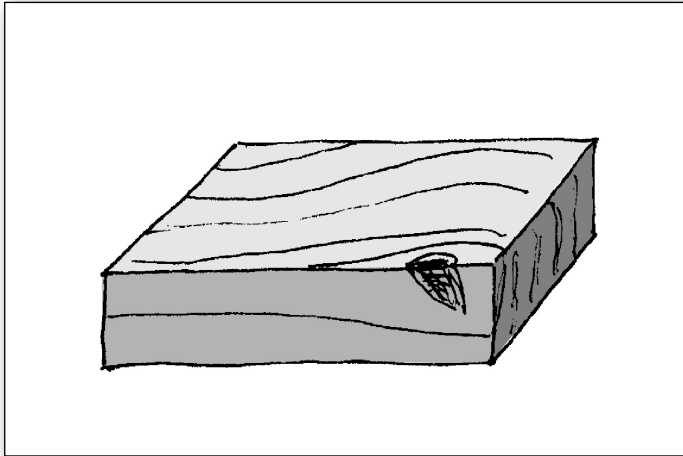


Abb. 18.19

Die Maserung von Holz sagt uns, in welcher Richtung das Holz besonders leicht zu spalten ist.

Man kann die Richtungen der einzelnen Stellen eines magnetischen Feldes auf sehr einfache Art alle auf einmal sichtbar machen. Wir fragen zum Beispiel nach den Richtungen des Feldes eines Stabmagneten.

Man legt über den Magneten eine Platte aus einem nicht magnetisierbaren Material, am besten aus Glas. Das Feld wird durch diese Glasscheibe nicht verändert. Man streut nun auf diese Scheibe Eisenfeilspäne und klopft leicht gegen die Scheibe. Die Späne ordnen sich dabei zu Ketten an. Diese Ketten zeigen an jeder Stelle des Feldes in die Richtung, in die auch eine Kompassnadel zeigen würde. Sie zeigen also die Richtung des Feldes an jedem Punkt an.

Nun zurück zu unserem Problem der graphischen Darstellung eines Feldes. Wir haben gesehen, dass jedes „Stückchen“ Feld eine bestimmte Richtung hat. Um diese Richtung in einer Zeichnung zum Ausdruck zu bringen, können wir so vorgehen wie es Abb. 18.20 zeigt: Statt der Punkte (in Abb. 18.18) zeichnen wir kleine Pfeile – wo das Feld dicht ist viele, wo es weniger dicht ist wenige. Die Pfeilspitze zeichnen wir an dasjenige Ende, das vom Nordpol des großen Magneten weg weist.

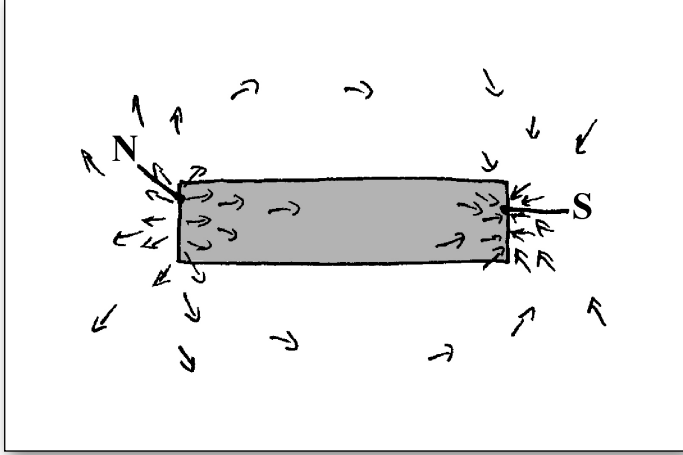


Abb. 18.20

Die Richtung der Pfeile stellt die Feldrichtung dar, ihre Dichte ist ein Maß für die Dichte des Feldes.

Noch eleganter ist die Methode der *Feldlinien*, Abb. 18.21. Statt der Einzelpfeile von Abb. 18.20 zeichnet man durchgehende Linien. Die Richtung der Linien gibt die Feldrichtung an. Der seitliche Abstand zwischen den Linien sagt uns, wie dicht das Feld ist. Dort wo die Linien eng nebeneinander liegen, ist das Feld dicht, wo ihr Abstand groß ist, ist das Feld weniger dicht. Auch an die Feldlinien zeichnet man Pfeile, und zwar so, dass die Linien an einem Nordpol beginnen und an einem Südpol enden.

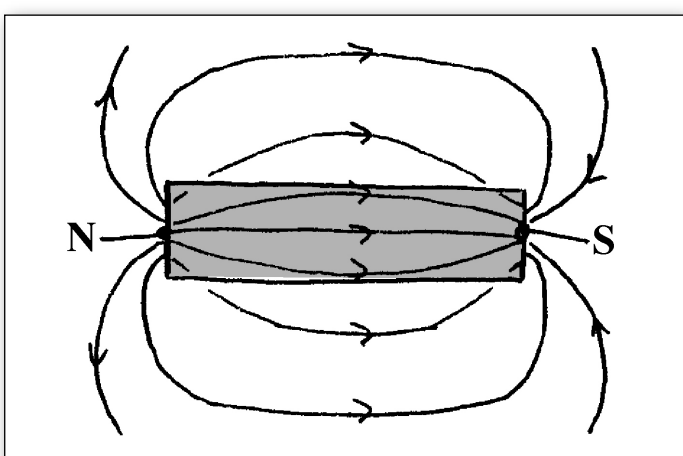


Abb. 18.21

Feldlinienbild. Je enger die Feldlinien sind, desto dichter ist das Feld.

Die magnetischen Feldlinien beginnen an positiven magnetischen Ladungen (Nordpol) und enden an negativen (Südpol).

Verwechsle die Feldlinien nicht mit den Magnetisierungslinien. Beide Linien sagen uns etwa über ausgezeichnete Richtungen. Während uns die Magnetisierungslinien Auskunft über den Zustand von magnetisiertem (sichtbarem) Eisen geben, beschreiben die Feldlinien den Zustand des (unsichtbaren) Feldes.

18.6 Magnetisierungslinien und Feldlinien

Wir haben gesehen, dass man sowohl den Magnetisierungszustand von Materie als auch das magnetische Feld grafisch darstellen kann. Wir wollen nun beide Verfahren in einer einzigen Abbildung verwenden. Wir erinnern uns dazu an die Regeln: Magnetisierungslinien beginnen am Südpol und enden am Nordpol, magnetische Feldlinien beginnen am Nordpol und enden am Südpol. Wir können diese Regeln zusammenfassen:

Dort, wo Magnetisierungslinien enden, beginnen magnetischen Feldlinien, und umgekehrt.

Wenn man Magnetisierungs- und Feldlinien in einer einzigen Abbildung darstellt, benutzt man am besten verschiedene Farben.

Wir betrachten einen Magneten, der die Form eines Ringes hat, aus dem ein Stück herausgenommen wurde. Abb. 18.22a zeigt den Magneten mit seinen Polen. Wie könnten die Magnetisierungslinien verlaufen? Die einfachste Antwort gibt Abb. 18.22b. Wenn man nun das Feld mit Hilfe kleiner Kompassnadeln untersucht, bekommt man den Verlauf der Feldlinien, Abb. 18.22c.

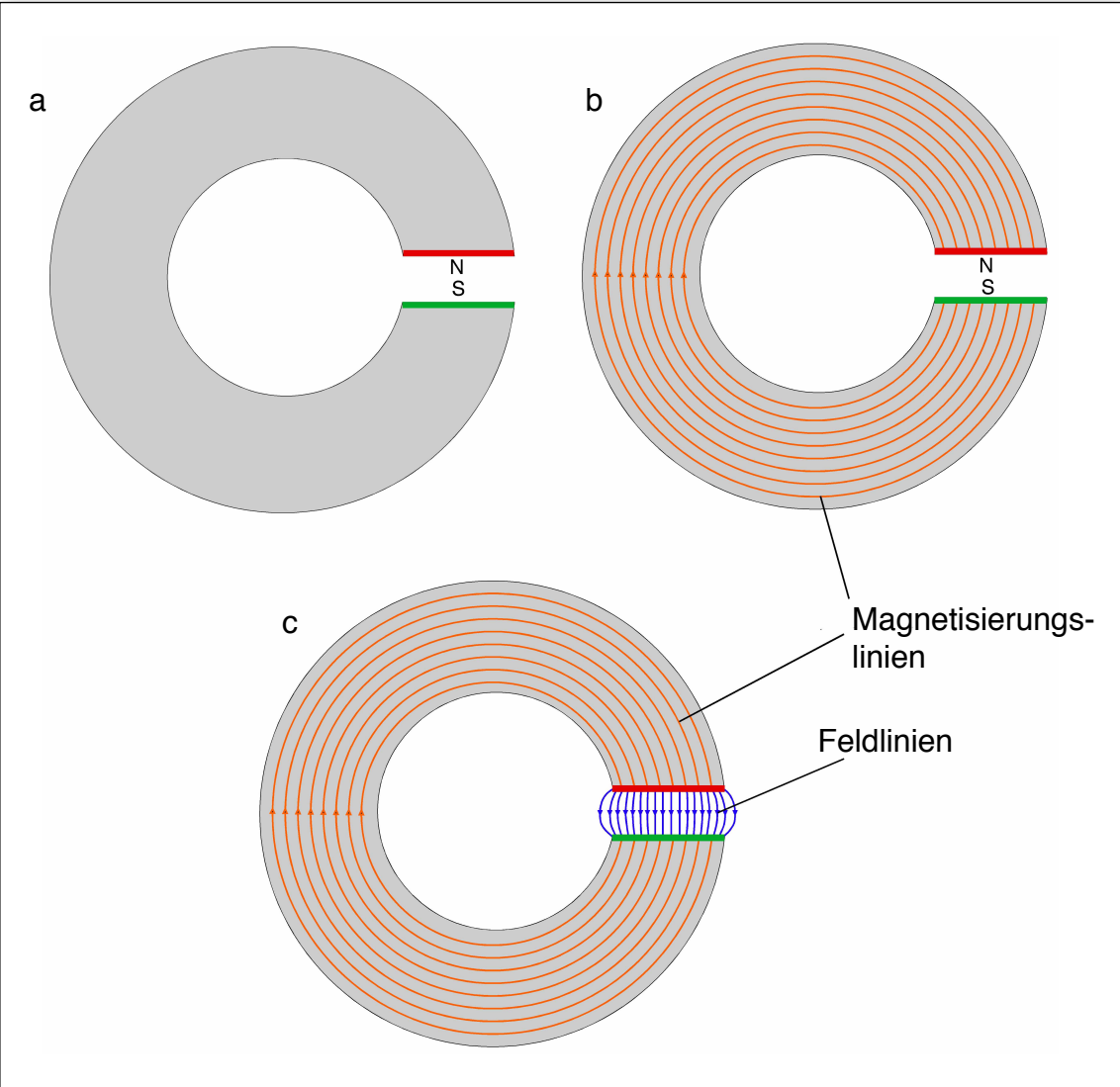


Abb. 18.22

- (a) Ringmagnet mit Polen
- (b) Ringmagnet mit Magnetisierungslinien
- (c) Ringmagnet mit Magnetisierungslinien und Feldlinien

Aufgabe

Abb. 18.23 zeigt eine Anordnung aus einem Hufeisenmagneten und einem Stück Weicheisen. (a) An welchen Stellen des Weicheisens bilden sich Pole? Um was für Pole (positive oder negative) handelt es sich? (b) Wo befindet sich magnetisches Feld? Skizziere die Feldlinien. (c) Zeichne Magnetisierungslinien im Magneten und im Weicheisen ein.

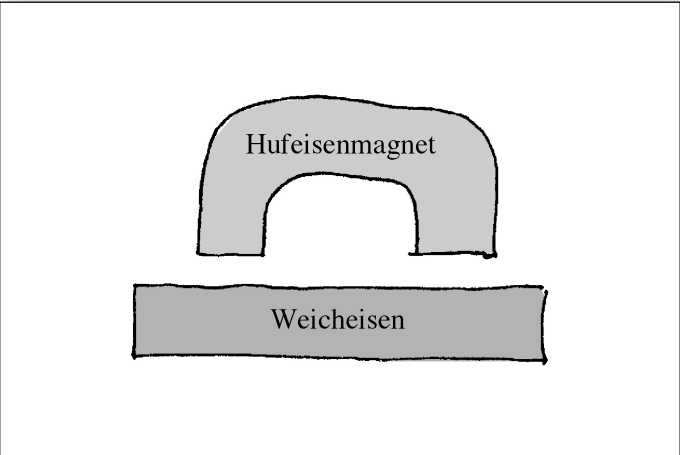


Abb. 18.23
Zur Aufgabe

18.7 Magnetisches Feld und Materie

Eine faszinierende Eigenschaft von Magneten haben wir noch nicht angesprochen. Magneten können durch andere Körper hindurch drücken oder ziehen. Wir wollen diese Erscheinung genauer untersuchen.

Ein Nagel wird an einem dünnen Faden aufgehängt und so in die Nähe eines starken Magneten gebracht, dass er zum Magneten hingezogen wird, ohne ihn zu berühren, Abb. 18.24. Wir führen nun in den Zwischenraum zwischen Nagel und Magnet Platten aus den verschiedensten Materialien ein.

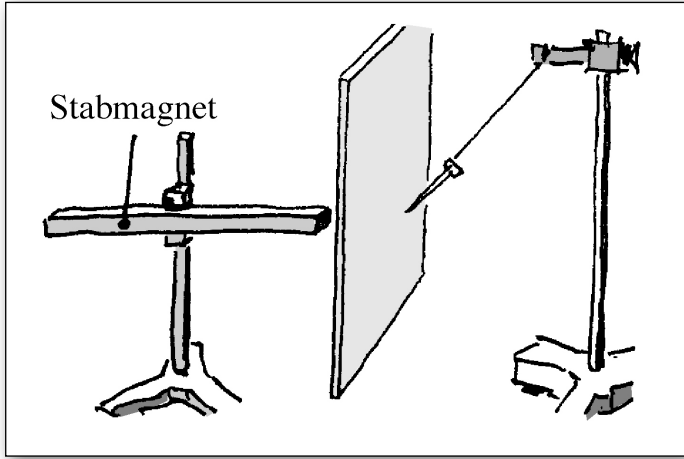


Abb. 18.24
In den Raum zwischen Magnetpol und Nagel werden Platten aus verschiedenen Materialien eingeführt.

In den meisten Fällen bleibt der Nagel in seiner ursprünglichen Lage hängen, er „merkt“ gar nichts von der Platte. Das ist der Fall für Platten aus Pappe, Holz, Glas, den verschiedensten Kunststoffen, aber auch den meisten Metallen wie Aluminium, Kupfer und Blei. Dies sind gerade diejenigen Materialien, die von einem Magneten nicht angezogen werden, die sich also nicht magnetisieren lassen.

Das magnetische Feld geht durch diese Stoffe einfach hindurch. Es dringt in sie ein, so als wären diese Stoffe nicht da. Wundert dich das? Kann es denn sein, dass sich an einer Stelle im Raum zweierlei Dinge befinden, nämlich Materie und Feld? Eigentlich ist diese Feststellung gar nicht so überraschend. Jeder kennt sehr gut ein anderes Beispiel dafür, dass zwei „Stoffe“ an derselben Stelle sind: Wenn Licht durch Glas hindurchtritt, befinden sich an ein und derselben Stelle Licht und Glas. Genauso können sich auch z. B. Kupfer und Magnetfeld an ein und derselben Stelle befinden.

Ganz anders ist es nun, wenn wir in den Raum zwischen Magnet und Nagel (siehe Abb. 18.24) eine Platte aus einem weichmagnetischen Material, eine Eisenplatte zum Beispiel, einführen: Der Magnet lässt den Nagel los, der Nagel hängt nach unten.

Die Eisenplatte lässt also das magnetische Feld nicht durch. Diese Aussage können wir noch genauer formulieren. Zunächst aber noch ein Experiment. Wir schieben eine dünne Eisenplatte zwischen Magnet und Nagel. Der Nagel fällt nach unten. Wir schieben dann zwei dünne Eisenplatten ein, dann drei, vier usw. Selbstverständlich fällt der Nagel jedes Mal nach unten. Wir können nun aber die zwei, drei usw. dünnen Eisenplatten auch auffassen als eine einzige dicke, Abb. 18.25.

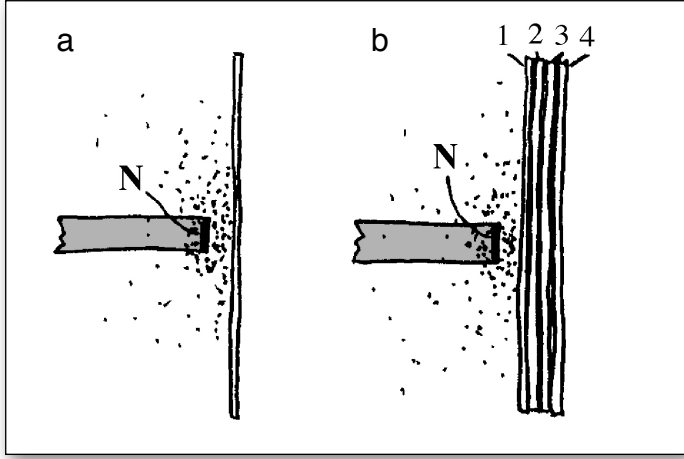


Abb. 18.25
Das Feld reicht durch die dünne Eisenplatte, Bild a, nicht hindurch. Demnach kann es auch in die Platten 2, 3 und 4 in Bild b nicht eindringen.

Und von dieser dicken Platte können wir nicht nur sagen, dass das Feld auf der rechten Seite nicht mehr herauskommt, sondern auch, dass es in die Platte gar nicht eindringt – wenigstens nicht tiefer als es der ersten dünnen Platte entspricht. Wir haben damit wieder eine wichtige Entdeckung gemacht:

Das magnetische Feld dringt in weichmagnetische Stoffe nicht ein.

Dass weichmagnetische Körper Pole bilden, wenn man sie in ein magnetisches Feld bringt, bedeutet, dass sie auf das magnetische Feld mit Magnetisierung reagieren.

Wir wollen untersuchen, an welcher Stelle die Pole im Fall unserer Platte entstehen. Man benutzt hierzu am besten eine „zweidimensionale“ Anordnung, Abb. 18.26, so dass man das Feld mit Hilfe von Eisenfeilspänen sichtbar machen kann.

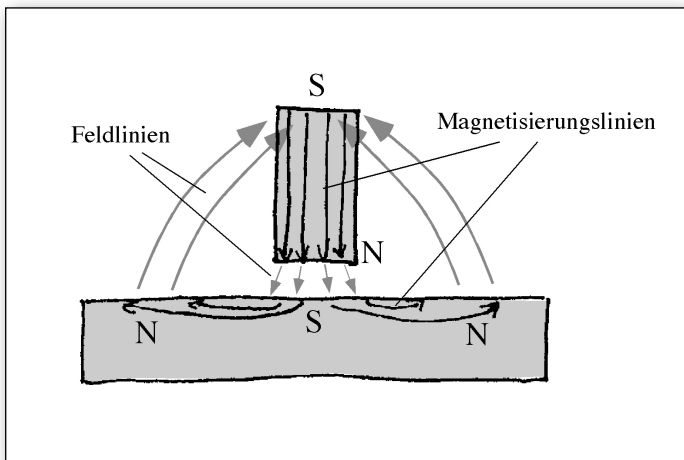


Abb. 18.26
Der Nordpol des Weicheisens besteht aus zwei Teilen, die durch den Südpol getrennt sind.

Man stellt fest: Am Weicheisenstab bildet sich ein Südpol in der Nähe des Nordpols des Magneten. In einiger Entfernung von diesem Südpol bildet sich auf jeder Seite ein Nordpol. Die magnetische Ladung ist hier allerdings stärker verdünnt als an dem Südpol in der Mitte. Wie sieht die Polverteilung nun bei der ursprünglichen Anordnung aus, als wir nicht einen Stab, sondern eine ausgedehnte Platte vor den Magneten gehalten hatten? Der Südpol bildet sich direkt vor dem Nordpol des Magneten. Der Nordpol der Weicheisenplatte ist in diesem Fall ringförmig, Abb. 18.27.

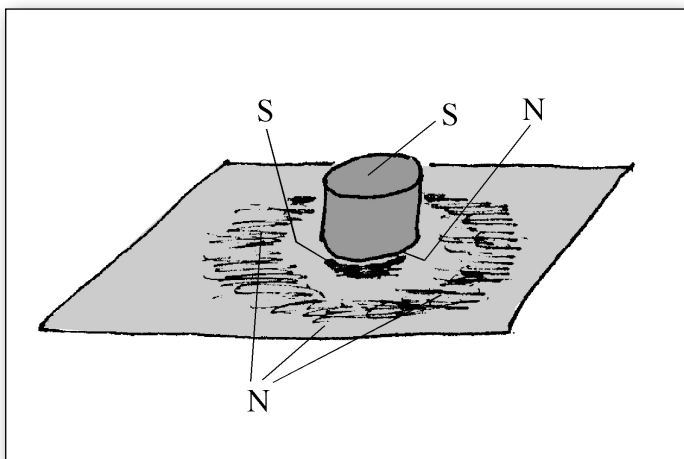


Abb. 18.27
Der Nordpol der Weicheisenplatte umgibt den Südpol ringförmig.

Aufgabe

Zeichne Magnetisierungslinien und Feldlinien für den Magneten in Abb. 18.28a. In die Mitte des Feldgebiets wird eine kleine Weicheisenplatte gebracht, Abb. 18.28b. Wie sehen jetzt Magnetisierungs- und Feldlinien aus?

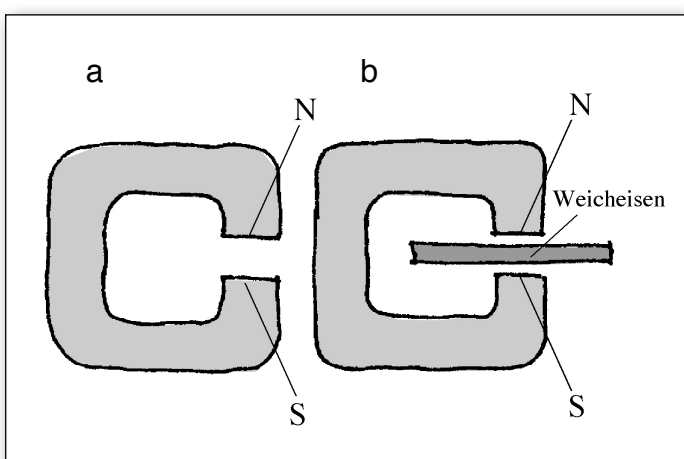


Abb. 18.28
Wie verlaufen Magnetisierungs- und Feldlinien vor und nach dem Einbringen der Weicheisenplatte?

18.8 Die Energie des magnetischen Feldes

Um zwei starke Magneten, die aneinander hängen, voneinander zu entfernen, muss man sich anstrengen, man muss Energie aufwenden. Wohin geht diese Energie?

In einer geringen Entfernung von einem kräftigen Magneten – der Magnet ist am Tisch befestigt – liegt ein anderer kräftiger Magnet. Der erste Magnet zieht den zweiten zu sich heran. Der sich bewegendende Magnet kann für kurze Zeit etwas antreiben, einen Dynamo zum Beispiel. Hierzu ist Energie notwendig. Woher kommt diese Energie?

Vergleiche die beiden Situationen. Im ersten Fall wird Energie (von der Person, die die Magneten voneinander trennt) aufgewendet, und es entsteht magnetisches Feld. Im zweiten Fall wird Energie abgegeben (an den Dynamo), und es verschwindet magnetisches Feld. Wir schließen, dass im magnetischen Feld Energie enthalten ist.

Das magnetische Feld enthält Energie.

18.9 Elektrischer Strom und magnetisches Feld

Ein langer Draht wird so aufgehängt wie es Abb. 18.29 zeigt. Der Draht kann mit einem Autoakku verbunden werden, so dass ein elektrischer Strom in ihm fließt: im rechten Teil nach unten und im linken nach 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. Wir schauen auf die hängenden Drahtstücke und schließen kurz den Stromkreis: Die Drahtstücke springen auseinander. Irgendetwas hat sie voneinander weggedrückt.

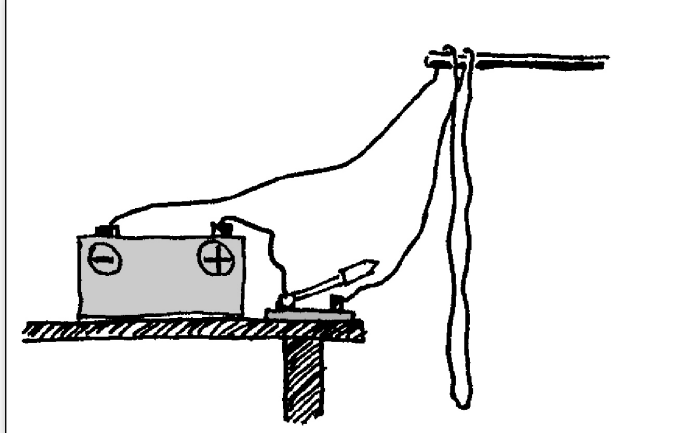


Abb. 18.29
Beim Schließen des Stromkreises springen die Drähte voneinander weg.

Wir wiederholen das Experiment, verlegen den Draht aber so, dass der Strom in den senkrecht nebeneinander hängenden Drahtabschnitten in dieselbe Richtung fließt, Abb. 18.30. Diesmal springen die Drahtteile beim Schließen des Stromkreises aufeinander zu.

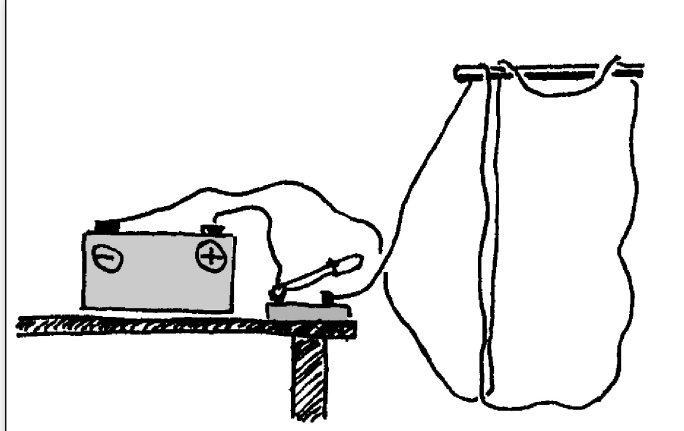


Abb. 18.30
Beim Schließen des Stromkreises springen die Drähte aufeinander zu.

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. 18.31. Unterbricht man den Stromkreis wieder, so pendelt die Nadel in ihre ursprüngliche Richtung zurück. Der Draht ist also offensichtlich von einem magnetischen Feld umgeben, solange ein elektrischer Strom in ihm fließt.

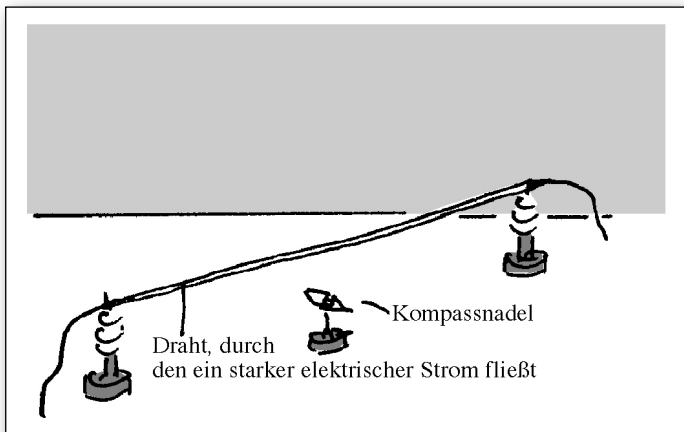


Abb. 18.31
Sobald man den elektrischen Strom einschaltet, ändert die Kompassnadel ihre Richtung.

Wir untersuchen die Richtung und Dichte des Feldes, indem wir eine Kompassnadel um einen senkrecht hängenden Draht herumführen. Es zeigt sich, dass die Richtung des Feldes überall senkrecht zur Drahtrichtung ist. Außerdem liegt jeder Feldrichtungspfeil auf einem Kreis, dessen Mittelpunkt sich auf der Achse des Drahtes befindet.

Die Dichte des Feldes nimmt nach außen hin, d. h. wenn man sich vom Draht entfernt, ab. Abb. 18.32a zeigt das Feld in der Punktdarstellung, Abb. 18.32b mit Pfeilen und Abb. 18.32c mit Feldlinien. Man sieht, dass das Feld nicht mit den Pfeilspitzen oder Pfeilenden am Draht hängt, sondern mit den Seiten der Pfeile. Wir brauchen also nicht nach Magnetpolen zu suchen – die kann es hier nicht geben.

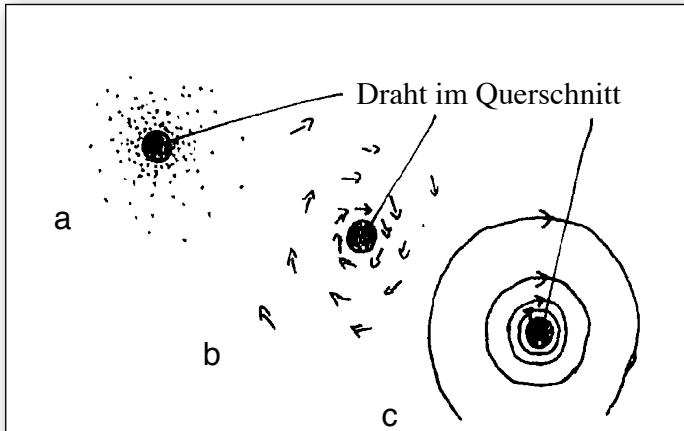


Abb. 18.32
Drei verschiedene Darstellungen des magnetischen Feldes in der Umgebung eines elektrischen Stromes.

Es wäre sowieso sehr merkwürdig gewesen, wenn wir am Draht Pole gefunden hätten: Der Draht ist aus Kupfer, einem nicht magnetisierbaren Material.

Ein elektrischer Strom ist von einem magnetischen Feld umgeben. Fließen in zwei parallelen Drähten elektrische Ströme in dieselbe Richtung, so zieht das Feld die Drähte aufeinander zu. Fließen die Ströme in entgegengesetzte Richtungen, so drückt das Feld die Drähte voneinander weg.

Die Anziehung und Abstoßung zwischen elektrischen Strömen hat wichtige technische Anwendungen gefunden. Bevor diese möglich wurden, musste man allerdings noch erreichen, dass diese Anziehungs- und Abstoßungseffekte stärker werden. Wenn man mit einem Strom von 50 A zwei herabhängende Drähte gerade etwas in Bewegung bringt, so ist der Aufwand im Verhältnis zur Wirkung einfach viel zu groß.

Man kann nun 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. 18.33 wurde der Draht 100-mal im Kreis herumgeführt. Wenn nun im Draht ein Strom von nur 1 A fließt, so fließt durch den eingezeichneten Querschnitt ein Strom der Gesamtstärke 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 der Stärke 100 A fließt.

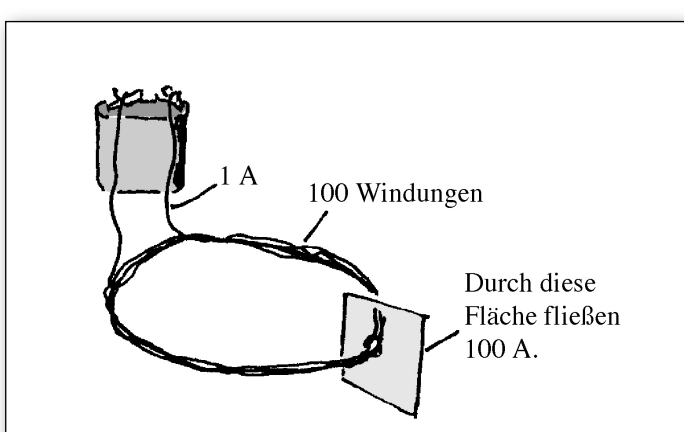


Abb. 18.33
Das Feld des Drahtbündels ist so dicht wie das eines Drahtes, in dem ein Strom von 100 A fließt.

Eine nützliche Anordnung stellt eine Spule dar. Der Draht wird hier zylinderförmig in vielen Lagen übereinander gewickelt, Abb. 18.34. (Der Draht muss natürlich isoliert sein – andernfalls könnte sich der Strom einen kürzeren Weg suchen.)

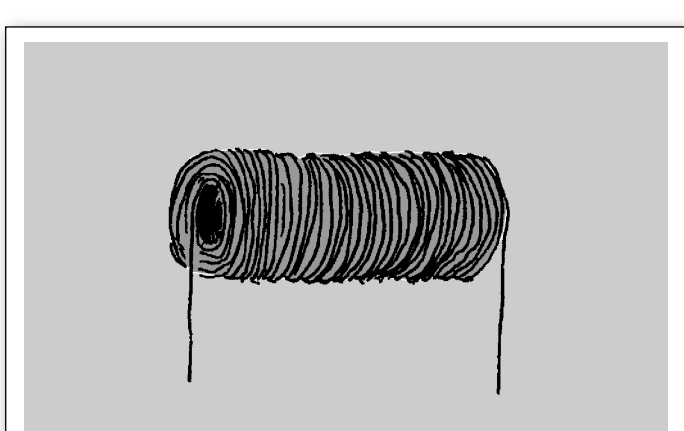


Abb. 18.34
Zylinderförmige Spule

Wir untersuchen Richtung und Dichte des Feldes einer Spule, z. B. mit Hilfe von Eisenfeilspänen. Das Ergebnis zeigt Abb. 18.35. Das Feld ist im Innern der Spule am dichtesten. Es hat dort ungefähr die Richtung der Zylinderachse.

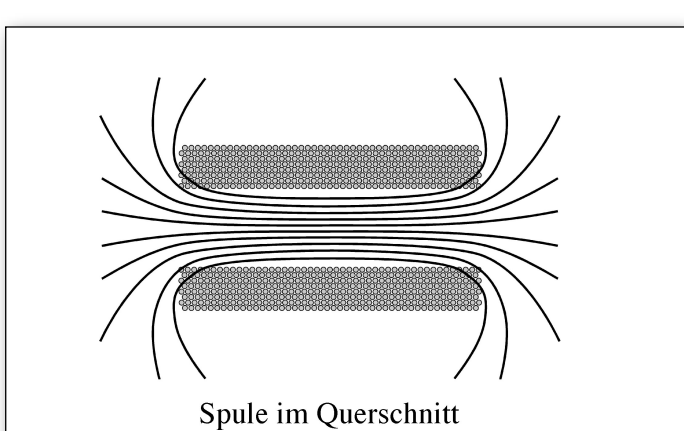


Abb. 18.35
Feld einer zylinderförmigen Spule

Aufgaben

1. Wie muss man eine Spule wickeln, damit in ihrer Umgebung und in ihrem Innern kein magnetisches Feld entsteht, wenn ein elektrischer Strom durch sie hindurchfließt?
2. In welche Richtung drückt das magnetische Feld einer Spule auf die Drähte der Spule? Wie hängt dieser Druck mit der Richtung des elektrischen Stroms in der Spule zusammen?

18.10 Der Elektromagnet

Ein Magnet wird auf einen kleinen Wagen montiert. Der Wagen wird so vor eine Spule gestellt, wie es Abb. 18.36 zeigt. Schließt man den Stromkreis der Spule, so wird der Magnet mit dem Wagen zur Spule hingezogen oder von ihr weggeschoben – je nach der Richtung des elektrischen Stroms in der Spule.

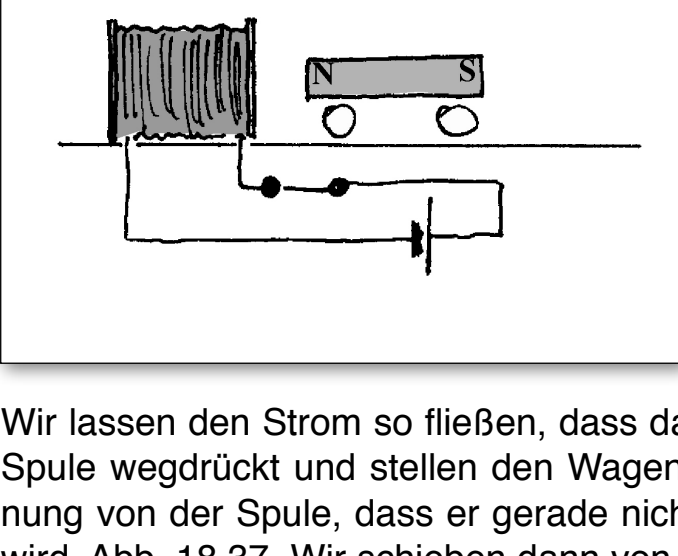


Abb. 18.36
Der Magnet wird durch das Feld nach rechts gedrückt.

Wir lassen den Strom so fließen, dass das Feld den Wagen von der Spule wegdrückt und stellen den Wagen nun in eine solche Entfernung von der Spule, dass er gerade nicht mehr weiter weggedrückt wird, Abb. 18.37. Wir schieben dann von links ein Stück Weicheisen, einen *Eisenkern*, in die Spule hinein. Daraufhin setzt sich der Wagen erneut in Bewegung. Er wird noch weiter von der Spule weggedrückt.

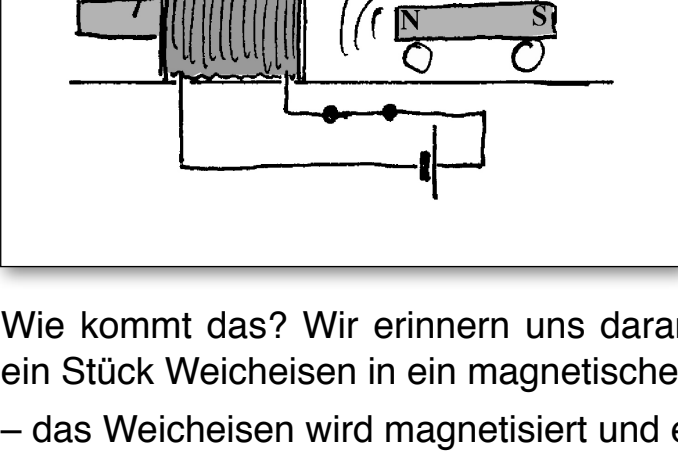


Abb. 18.37
Schiebt man einen Eisenkern in die Spule, so wird der Magnet noch weiter nach rechts geschoben.

Wie kommt das? Wir erinnern uns daran, was passiert, wenn man ein Stück Weicheisen in ein magnetisches Feld schiebt:

- das Weicheisen wird magnetisiert und es bilden sich Pole;
- das Feld wird verdrängt.

In unserem Fall wird das Feld aus der Spule hinausgedrängt. Danach ist es am dichtesten an den beiden Enden des Eisenkerns, Abb. 18.38. Die Pole entstehen an den Endflächen des Eisenkerns.

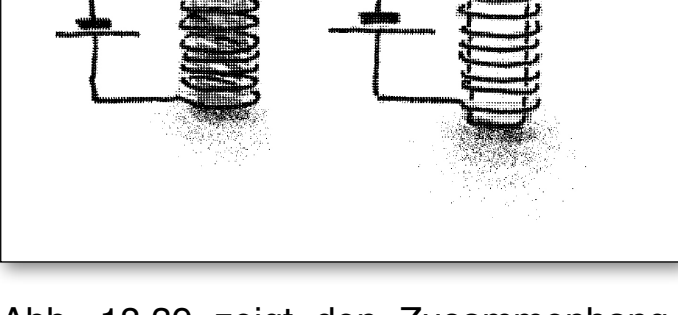


Abb. 18.38
Das magnetische Feld wird durch den Eisenkern aus der Spule hinausgedrängt.

Abb. 18.39 zeigt den Zusammenhang zwischen der Magnetisierungsrichtung und der Richtung des elektrischen Stroms in der Spule.

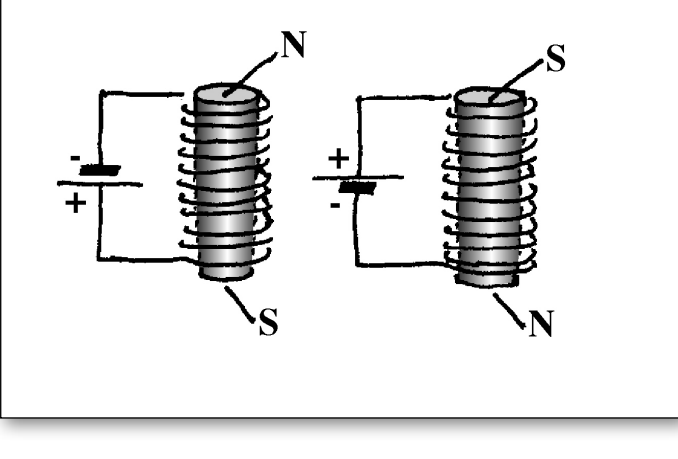


Abb. 18.39
Kehrt man die Richtung des elektrischen Stroms in der Spule um, so vertauschen sich die Pole des Magneten.

Wir haben also unser Weicheisenstück in einen Magneten verwandelt. Weicheisen und Spule zusammen bilden einen *Elektromagneten*.

Elektromagneten haben gegenüber Dauermagneten den Vorteil, dass man sie ein- und ausschalten kann. Ja, man kann sie sogar stark und schwach stellen, und man kann sie umpolen.

Die Abbildungen 18.40 bis 18.42 zeigen einige Beispiele dafür, wie man mit Hilfe von Elektromagneten Anziehung und Abstoßung erreichen kann.

In Abb. 18.40a ist der Elektromagnet noch ausgeschaltet. In Abb. 18.40b drückt der Nordpol des Elektromagneten mit Hilfe des Feldes den Dauermagneten weg. In Abb. 18.40c wurde die Richtung des elektrischen Stroms in der Spule umgekehrt. Wo vorher der Nordpol des Elektromagneten war, ist jetzt der Südpol. Der Südpol des Elektromagneten zieht den Nordpol des Dauermagneten mit Hilfe des Feldes zu sich hin.

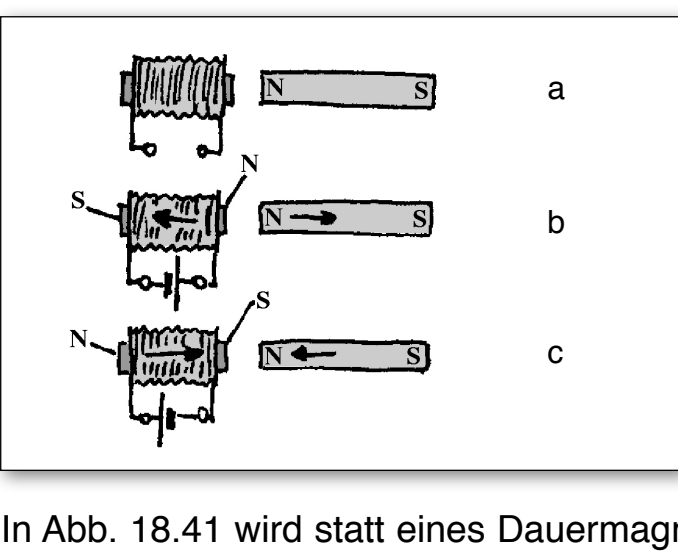


Abb. 18.40
Elektromagnet und Dauermagnet

In Abb. 18.41 wird statt eines Dauermagneten ein Stück Weicheisen vor den Elektromagneten gebracht. Solange der Elektromagnet ausgeschaltet ist, Abb. 18.41a, passiert nichts, es gibt keinerlei Magnetpole. Der Elektromagnet wird nun eingeschaltet, Abb. 18.41b. Am rechten Ende des Elektromagneten entsteht ein Nordpol, am linken Ende des Weicheisenstücks ein Südpol. Die Pole bewegen sich aufeinander zu. Wir lassen nun den elektrischen Strom in die entgegengesetzte Richtung fließen, Abb. 18.41c. Die Pole des Elektromagneten vertauschen sich, aber auch die des Weicheisenstücks. Wir haben daher wieder Anziehung.

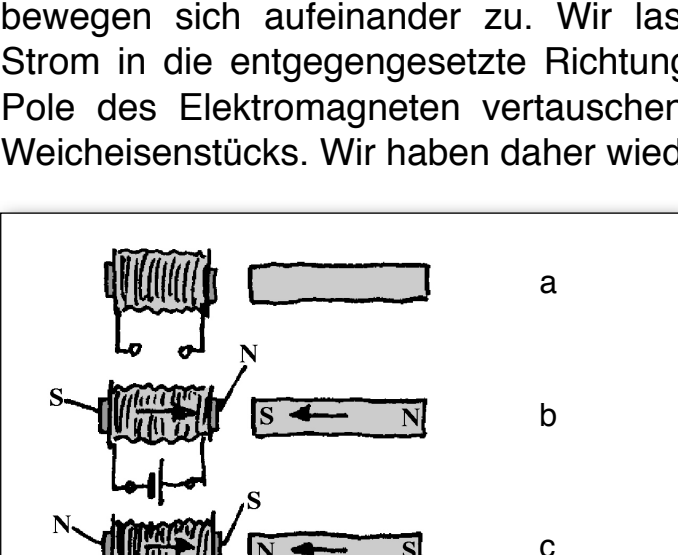


Abb. 18.41
Elektromagnet und Weicheisen

Abb. 18.42 schließlich zeigt zwei Möglichkeiten dafür, wie man zwei Elektromagneten miteinander kombinieren kann. Im ersten Bild haben wir Abstoßung, im zweiten Anziehung.

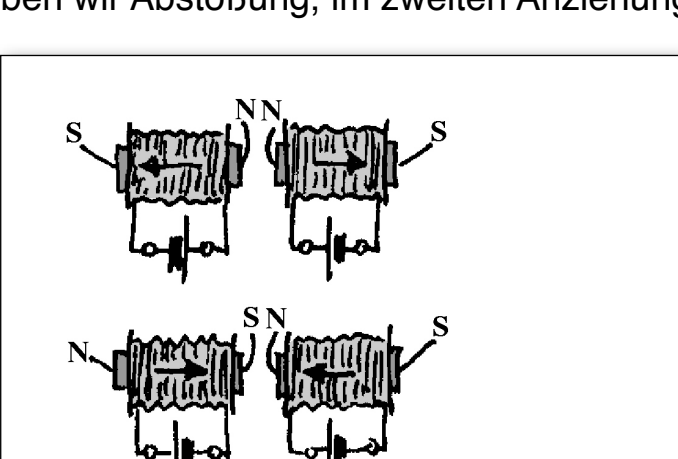


Abb. 18.42
Zwei Elektromagneten

Elektromagneten haben viele Anwendungen gefunden. Die wichtigste ist der Elektromotor. Wir beschäftigen uns mit ihm ausführlich im nächsten Abschnitt. Hier zunächst noch einige einfachere Geräte, die mit Elektromagneten arbeiten.

Die elektrische Klingel

Wenn man auf den Klingelknopf drückt, wird der elektrische Stromkreis zunächst geschlossen, Abb. 18.43. Der Elektromagnet zieht das Weicheisenstück an, der Klöppel schlägt gegen die Glocke. Durch das Anziehen des Weicheisenstücks wird aber der Stromkreis unterbrochen. Der Elektromagnet lässt daraufhin das Weicheisen wieder los, der Stromkreis wird wieder geschlossen und so weiter. Der Klöppel schlägt also in schneller Folge gegen die Glocke. Ähnlich funktioniert auch die Autohupe.

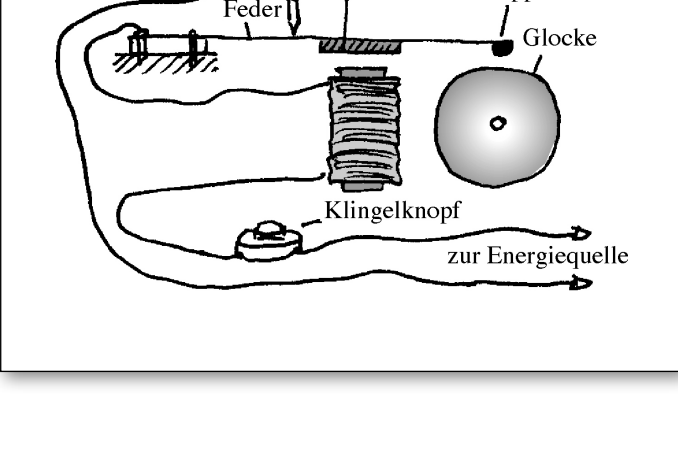


Abb. 18.43
Elektrische Klingel

Der elektrische Türöffner

Im Türrahmen, dort wo die Vertiefungen für die Riegel des Schlosses sind, befindet sich ein Elektromagnet. Wenn man seinen Stromkreis schließt, gibt er den Riegel, den man mit der Türklinke von innen her betätigen kann, frei. Man kann nun die Tür von außen her aufdrücken.

Die elektrische Uhr

In elektrischen Uhren, die keine Flüssigkristallanzeige haben, befindet sich ein Elektromagnet. Durch diesen Elektromagneten geht in regelmäßigen Abständen, z. B. jede Sekunde, ein kurzer Stromstoß. Bei jedem solchen Stromstoß rückt der Elektromagnet die Zeiger der Uhr ein Stück vor.

Amperemeter

Ein Elektromagnet zieht oder drückt umso stärker, je stärker der elektrische Strom ist, der durch ihn hindurchfließt. Diese Tatsache nutzt man aus, um die Stärke eines elektrischen Stroms zu messen. Abb. 18.44 zeigt, wie ein Amperemeter funktionieren könnte. Fließt ein elektrischer Strom durch die beiden Elektromagneten, so entstehen an deren Endflächen Pole. Das magnetische Feld zieht den Nordpol des Dauermagneten zum Südpol des rechten Elektromagneten und den Südpol des Dauermagneten zum Nordpol des linken Elektromagneten. Je stärker der elektrische Strom ist, desto größer ist die Polladung an den Elektromagneten und desto stärker zieht das Feld. Und je stärker das Feld zieht, desto weiter drehen sich Dauermagnet und Zeiger.

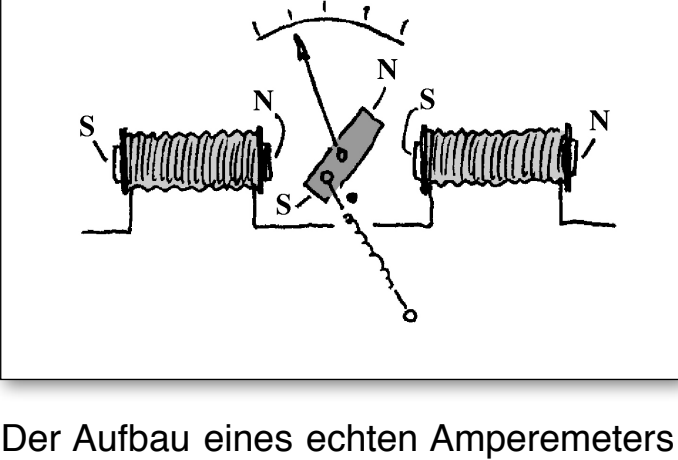


Abb. 18.44
Zur Funktionsweise des Amperemeters

Der Aufbau eines echten Amperemeters ist etwas anders, aber das Funktionsprinzip ist dasselbe wie das unseres primitiven Geräts von Abb. 18.44.

Sicherungsautomaten

Eine Haussicherung soll einen elektrischen Stromkreis unterbrechen, sobald der elektrische Strom zu stark wird. Ein Sicherungsautomat funktioniert so: Der elektrische Strom (im abzusichernden Stromkreis) wird durch die Spule eines Elektromagneten geleitet. Wenn die Stromstärke einen bestimmten Wert erreicht, schafft es der Magnet, einen Schalter zu betätigen, der den Stromkreis unterbricht.

Das Relais

Oft möchte man mit einem schwachen Strom einen starken Strom steuern. Ein Gerät, mit dem man das machen kann, ist das Relais, Abb. 18.45. Schließt man den Schalter S, so fließt im Stromkreis des Elektromagneten ein schwacher Strom. Der Elektromagnet zieht an dem Weicheisenstück und schließt einen Stromkreis, in dem ein sehr starker Strom fließen kann.

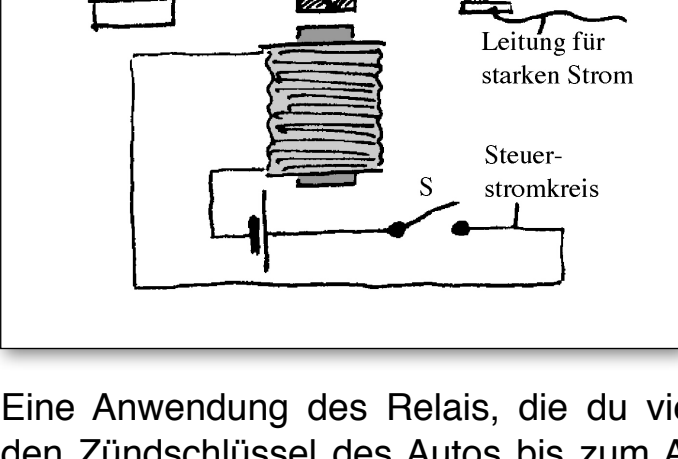


Abb. 18.45
Relais

Eine Anwendung des Relais, die du vielleicht kennst: Wenn man den Zündschlüssel des Autos bis zum Anschlag dreht, beginnt der Anlassermotor zu laufen. (Der Anlassermotor ist ein Elektromotor, der den Benzinmotor des Autos „anwirft“. Er bekommt seine Energie von der Autobatterie.) Durch den Anlassermotor fließt ein sehr starker elektrischer Strom, ein Strom von etwa 100 A. Für einen so starken Strom braucht man einen sehr großen, robusten Schalter. Ein solcher Schalter wäre aber zu groß, um ihn am Zündschloss unterzubringen. Daher schaltet man den Anlasserstrom über ein Relais ein und aus. Der schwache Steuerstrom des Relais wird mit dem kleinen Schalter am Zündschloss ein- und ausgeschaltet.

Aufgaben

1. In welchen Geräten werden Elektromagneten verwendet? Nenne auch Geräte, die im Text nicht vorkommen.
2. Erfinde eine elektrische Klingel, die nur mit Wechselstrom funktioniert.
3. Wie reagiert das Amperemeter von Abb. 18.44 auf einen Wechselstrom? Erfinde ein Wechselstromamperemeter.

18.11 Der Elektromotor

Wir wollen einen Elektromotor selbst bauen. Wir beginnen mit einer sehr primitiven Version. Unser Motor hat Ähnlichkeit mit dem Stromstärkemessgerät von Abb. 18.44.

Abb. 18.46 zeigt ihn von oben gesehen. Rechts und links steht ein Elektromagnet. Dazwischen befindet sich, drehbar gelagert, ein Dauermagnet. Wir schalten den elektrischen Strom ein. An den Stirnflächen der Elektromagneten bilden sich Pole. Der Stabmagnet in der Mitte dreht sich nun so, Abb. 18.46a, dass sich die ungleichnamigen Pole möglichst nahe kommen. Sobald der Dauermagnet in Längsrichtung steht, d. h. parallel zu den Elektromagneten, vertauschen wir die beiden Anschlüsse der Batterie miteinander. Dadurch vertauschen sich alle Pole der Elektromagneten. Die Felder drücken nun die benachbarten Pole voneinander weg. Die Drehung des Stabmagneten geht also weiter, Abb. 18.46b. Nach einer weiteren halben Drehung müssen wir wieder umpolen und so weiter. Die Felder halten so den Dauermagneten in ständiger Drehung.

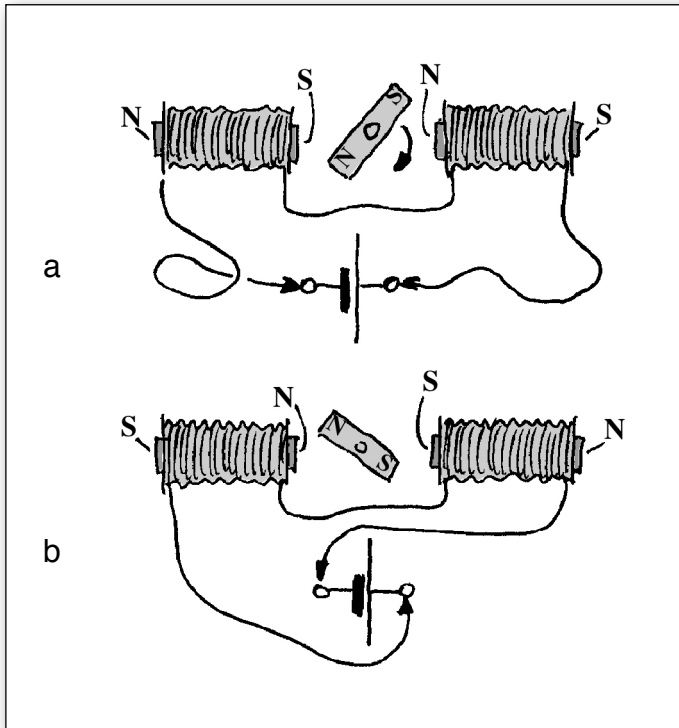


Abb. 18.46

Zur Funktionsweise des Elektromotors

Du wirst allerdings feststellen, dass es sehr schwer ist, die Elektromagneten genau im richtigen Zeitpunkt umzupolen. Man kommt dabei sehr leicht aus dem Takt. Und mit einem solchen handgesteuerten Elektromotor kann man sowieso nicht viel anfangen. Wir brauchen einen Motor, der sich selbst steuert, einen Motor, der die Stromrichtung in seinen Spulen automatisch nach jeder halben Drehung umkehrt.

Es stellt nun aber gar kein Problem dar, eine automatische Steuerung zu bauen. Wir brauchen nur an der Motorwelle einen Schalter anzubringen, der durch die Rotation der Welle betätigt wird.

Besonders bequem lässt sich dieses Umschalten realisieren, wenn man die Rollen von Dauermagnet und Elektromagnet vertauscht: Man macht den Elektromagneten drehbar und lässt den Dauermagneten fest, Abb. 18.47.

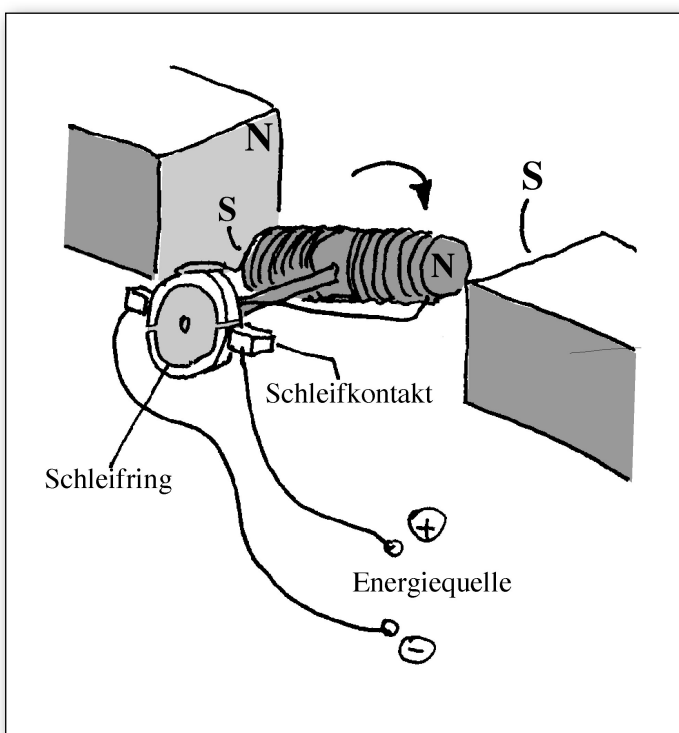


Abb. 18.47

Elektromotor

Man sagt auch, der Elektromagnet sei der *Rotor* des Motors. Die Elektrizitätszuleitung und -ableitung geschieht über zwei Schleifkontakte und einen Schleifring, der in zwei voneinander isolierte Hälften geteilt ist. An diese beiden Hälften ist der Elektromagnet angeschlossen.

Nach jeder halben Drehung des Rotors wechseln die Schleifringhälften von einem Schleifkontakt zum anderen: Der Anschluss des Elektromagneten, der vorher auf hohem Potential lag, kommt nun auf niedriges Potential, und der, der auf niedrigem Potential war, kommt auf hohes. Der Strom im Elektromagneten wechselt also immer im gewünschten Augenblick die Richtung.

Viele richtige Elektromotoren funktionieren nach diesem Prinzip. Es gibt allerdings noch eine ganze Reihe weiterer Tricks, die bei der Konstruktion von Elektromotoren angewendet werden. Eins haben aber alle Elektromotoren gemeinsam: Es ist immer das magnetische Feld, das auf den Rotor drückt oder an ihm zieht.

Aufgaben

1. Man kann den „Motor“ von Abb. 18.46 als Wechselstrommotor verwenden. Man braucht ihn dann nicht mehr von Hand umzupolen. Man nennt einen solchen Motor einen Synchronmotor. Welche Probleme ergeben sich?
2. Entwirf einen Elektromotor, bei dem sowohl der feste als auch der drehbare Magnet ein Elektromagnet ist.

18.12 Das magnetische Feld der Erde

Wir hatten früher schon gesehen: Hängt man einen Stabmagneten so auf, dass er sich um eine senkrechte Achse sehr leicht drehen lässt, so stellt er sich ungefähr in Nord-Süd-Richtung ein. Einer seiner Pole weist nach Nord, der andere nach Süd, Abb. 18.48. Dasjenige Ende des Magneten, das in Richtung Nord zeigt, wurde Nordpol genannt, das andere Südpol.

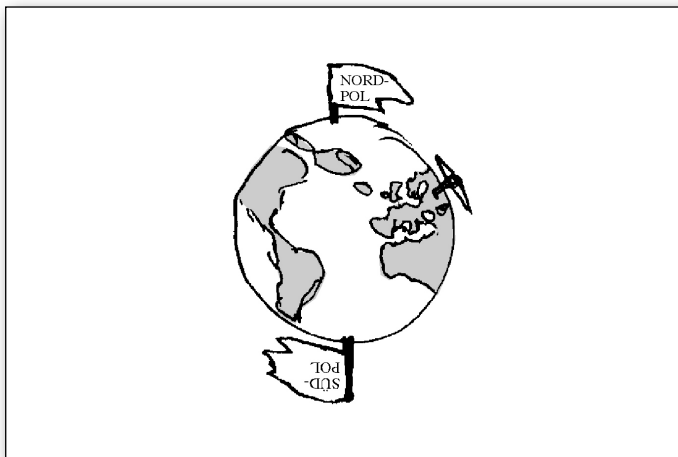


Abb. 18.48

Ein drehbar gelagerter Magnet stellt sich in Nord-Süd-Richtung ein.

Jeder Kompass beruht auf diesem Effekt. Die Kompassnadel ist einfach ein leichter, sehr gut gelagerter Dauermagnet.

Tatsächlich stellt sich nun eine Kompassnadel nicht genau in Nord-Süd-Richtung ein. Außerdem ist die Abweichung von dieser Richtung an den verschiedenen Stellen der Erde verschieden. Und sie ändert sich sogar noch langsam mit der Zeit.

Auf jeden Fall können wir aber schließen, dass die Erde von einem magnetischen Feld umgeben ist. Und man hat festgestellt, dass dieses magnetische Feld ins Innere der Erde hineinreicht.

Woher kommt dieses Feld? Zwei Ursachen kommen zunächst in Frage. Entweder ist die Erde selbst ein riesiger Dauermagnet, oder in der Erde fließen elektrische Ströme. Früher glaubte man an die erste dieser beiden Hypothesen; man meinte die Erde sei ein großer Dauermagnet. Dann müsste die Nordpolladung der Erde in der Nähe des (geographischen) Südpols der Erde sitzen, und die Südpolladung am (geographischen) Nordpol, denn die Nordpolladung eines Magneten wird ja nach Norden gezogen.

Man erkannte aber schon im 19. Jahrhundert, dass diese Vermutung falsch sein muss. Im Innern der Erde ist es nämlich so heiß, dass jedes Material seinen Magnetismus verliert. Die Ursache für das magnetische Feld der Erde sind also elektrische Ströme. Sie werden angetrieben durch die thermische Konvektion des flüssigen Eisens im Erdkern. Die Einzelheiten dieses Prozesses sind allerdings etwas verwickelt.

Aufgaben

1. Warum zeigt ein Kompass falsch an, wenn sich Eisenteile in seiner Umgebung befinden?
2. Zwei Kompassnadeln werden ganz dicht nebeneinander aufgestellt. In welche Richtung zeigen sie?

18.13 Induktion

An eine Spule wird ein Voltmeter angeschlossen. Bewegt man einen Dauermagneten in die Spule hinein, Abb. 18.49, so schlägt das Voltmeter aus – allerdings nur so lange, wie sich der Magnet bewegt. Entfernt man den Magneten wieder aus der Spule, so schlägt das Messinstrument noch einmal aus, diesmal aber in die andere Richtung als vorher.

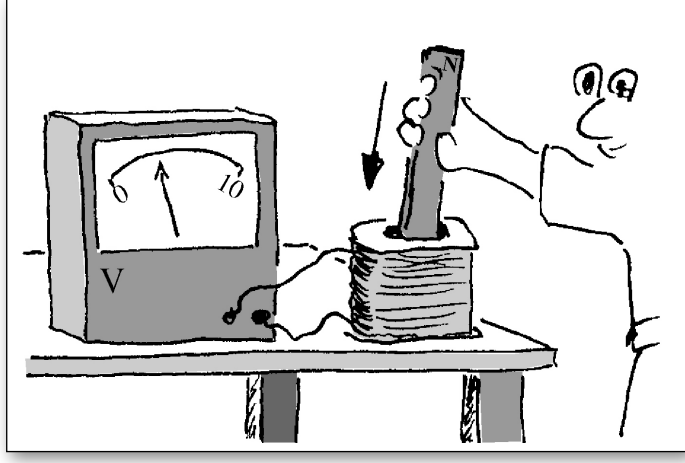


Abb. 18.49

Das Voltmeter schlägt aus, solange sich der Dauermagnet bewegt.

Die Richtung des Ausschlags hängt auch davon ab, ob man den Nord- oder den Südpol in die Spule schiebt.

Mit der Bewegung des Magneten ändert man das magnetische Feld im Innern der Spule. Diese Änderung des magnetischen Feldes ist die Ursache für die Spannung zwischen den Anschlüssen der Spule.

Wir fragen uns nun, was passiert, wenn man die Spule bei dem Experiment kurzschließt. Wir schließen sie also kurz, bauen aber ein Amperemeter in die Leitung, mit der wir die Spulenanschlüsse überbrücken, ein. Ergebnis: Beim Hineinbewegen des Magneten schlägt das Amperemeter 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 Spannung oder ein elektrischer Strom *induziert*.

Je stärker sich das Feld in der Spule ändert, desto größer ist die induzierte Spannung. Wir versuchen nun, eine möglichst hohe Induktionsspannung zu erzeugen. Wir brauchen dazu nur dafür zu sorgen, dass sich das Feld in der Spule möglichst schnell möglichst stark ändert.

Wir stellen zunächst fest, dass die Spannung umso höher wird, je schneller man den Dauermagneten bewegt. Eine sehr, sehr schnelle Bewegung ändert aber schließlich nichts mehr am Ausschlag des Messinstruments. Das liegt allerdings nur daran, dass das Messinstrument „nicht mehr mitkommt“, es ist zu träge. Verwendet man zur Anzeige ein Oszilloskop, so sieht man, dass bei der sehr schnellen Bewegung die Spannung sehr wohl noch höher geworden ist.

Als Nächstes machen wir die Feldänderung dadurch stärker, dass wir statt einen, zwei Magneten in die Spule hineinbewegen, und zwar so, dass gleiche Pole nebeneinander liegen, Abb. 18.50.

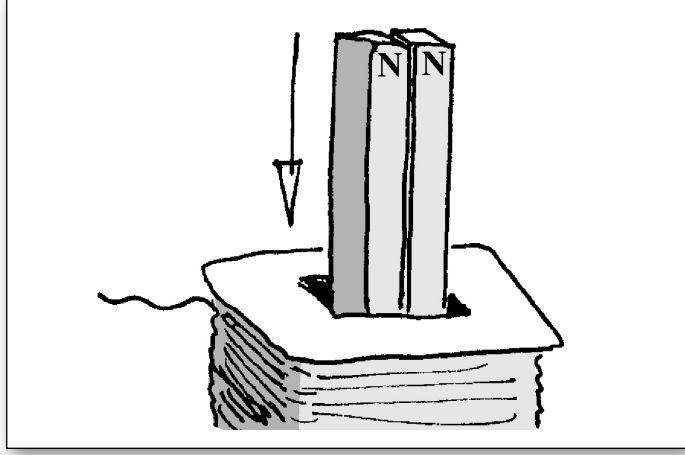


Abb. 18.50

Ist das magnetische Feld dichter, so wird eine größere Spannung induziert.

Eine dritte Methode, den Induktionseffekt zu verstärken, besteht darin, dass man eine Spule mit mehr Windungen benutzt.

Man kann aber die Feldänderung in der Spule noch auf eine ganz andere Art erreichen – und zwar ohne dass sich irgendetwas bewegt: indem man neben die Spule einen Elektromagneten stellt, so dass dessen Feld in die Spule hineinreicht, Abb. 18.51. Schaltet man diesen Elektromagneten ein oder aus, so ändert sich wieder das magnetische Feld im Innern der Spule, und es wird eine Spannung induziert.

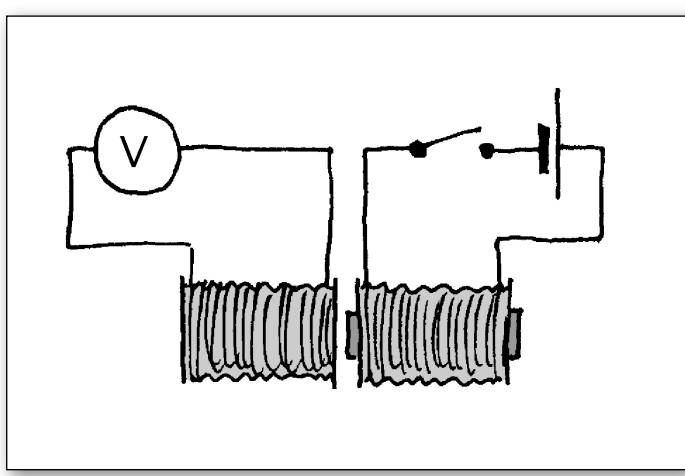


Abb. 18.51

Schaltet man den Elektromagneten ein oder aus, so ändert sich die Dichte des magnetischen Feldes in der Spule, und es wird eine Spannung induziert.

Ändert sich das magnetische Feld 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 durch. 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. 18.52, bis die Pole des Magneten diese Enden berühren und stellen fest: Das Voltmeter schlägt aus. Wie ist das möglich? In der Spule ist doch gar nichts passiert. Doch, es ist sehr wohl etwas passiert! Das Eisen in der Spule ist magnetisiert worden, seine Magnetisierung hat sich geändert.

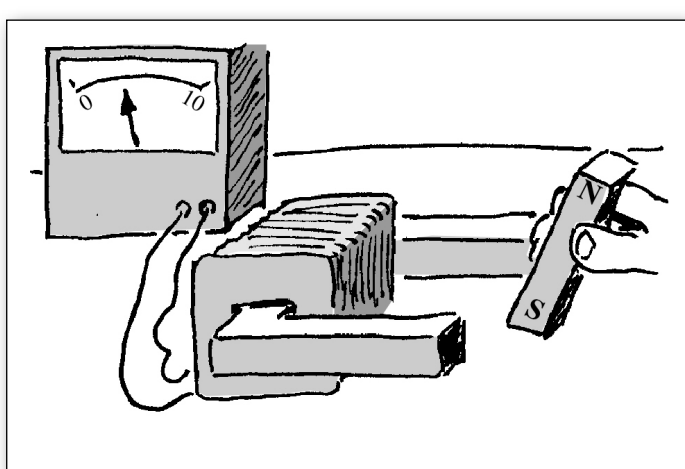


Abb. 18.52

Auch die Änderung der Magnetisierung im Innern der Spule verursacht eine Induktionsspannung.

Wir drehen nun den Dauermagneten um, so dass sein Nordpol dahin kommt, wo vorher sein Südpol war und sein Südpol dahin, wo vorher der Nordpol war. Auch bei diesem Vorgang wird in der Spule eine Spannung induziert. Das Ergebnis dieses Versuchs ist also:

Auch wenn sich die Magnetisierung des Materials in der Spule ändert, wird eine Spannung (ein Strom) induziert.

Die Funktionsweise einiger wichtiger Geräte beruht auf der Induktion. Wir lernen im Folgenden solche Geräte kennen.

Aufgaben

1. In einer Spule soll mit Hilfe eines Dauermagneten eine Spannung induziert werden. Wie muss man es anstellen, damit die Spannung möglichst hoch wird? Nenne drei verschiedene Maßnahmen.
2. Eine Spule wird so gehalten, dass ihre Achse senkrecht steht, so dass man einen Gegenstand durch das Innere der Spule hindurchfallen lassen kann. An die Spule wird ein Oszilloskop angeschlossen. Man lässt einen Stabmagneten in Längsrichtung durch die Spule fallen. Was zeigt das Oszilloskop an?

18.14 Der Generator

Ein Generator tut gerade das Umgekehrte von dem, was ein Elektromotor tut. Während ein Elektromotor Energie mit dem Träger Elektrizität bekommt und mit dem Träger Drehimpuls abgibt, Abb. 18.53a, bekommt der Generator die Energie mit dem Energieträger Drehimpuls und gibt sie mit der Elektrizität wieder ab, Abb. 18.53b.

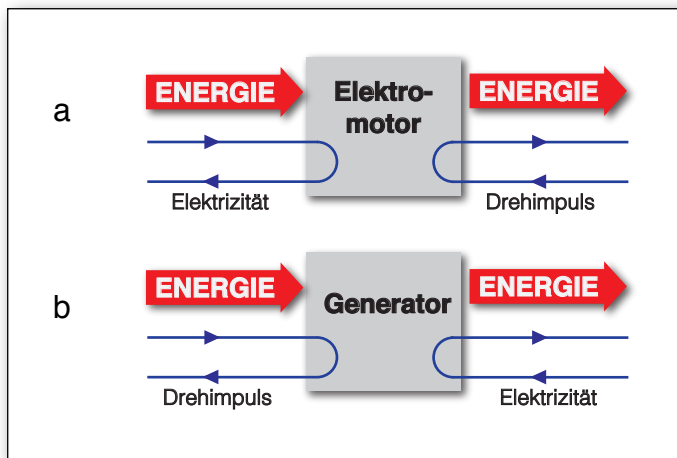


Abb. 18.53

Flussbilder von Elektromotor und Generator

Der Aufbau eines Generators unterscheidet sich daher im Prinzip auch gar nicht von dem eines Elektromotors. Wir können den in Abb. 18.47 skizzierten Motor als Generator benutzen. Wir brauchen dazu nur die elektrische Energiequelle durch einen elektrischen Energieempfänger, z. B. eine Lampe, zu ersetzen. Dreht man nun sehr schnell an der Welle, so beginnt die Lampe zu leuchten. Die Erklärung der Funktionsweise des Generators ist nicht schwierig: Der Eisenkern der drehbaren Spule wird durch die feststehenden Dauermagneten pro Umdrehung zweimal ummagnetisiert. Dabei wird jedes Mal eine Spannung zwischen den Enden der Spule induziert. Das Vorzeichen dieser Spannung wechselt zweimal pro Umdrehung. Die Schleifkontakte und der zweigeteilte Schleifring sorgen dafür, dass man an den Anschlüssen des Generators eine Spannung mit immer gleichem Vorzeichen erhält. (Der Betrag dieser Spannung ist aber nicht zeitlich konstant; eine richtige Gleichspannung ist es also nicht.)

Es ist sogar noch einfacher, einen Wechselspannungsgenerator zu bauen. Weißt du wie?

Der Generator ist eine der wichtigsten Maschinen in jedem Kraftwerk.

Oft bezeichnet man Generatoren mit einem anderen Namen: Beim Fahrrad heißen sie Dynamo, beim Auto Lichtmaschine.

18.15 Der Transformator

Viele elektrische Geräte, wie z. B. elektrische Zahnbürste, Computer, Spielzeugmotoren und die Ladegeräte von Handy und Smartphone, 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 heruntergesetzt oder „heruntertransformiert“ werden. Zu diesem Zweck setzt man zwischen Gerät und Steckdose einen *Transformator*.

Ein Transformator besteht aus einem Eisenkern mit zwei Spulen, Abb. 18.54. Die eine Spule, die so genannte *Primärspule*, wird an die Steckdose angeschlossen; mit der anderen, der *Sekundärspule*, verbindet man den Energieempfänger, d. h. das Gerät, das man mit Energie versorgen will.

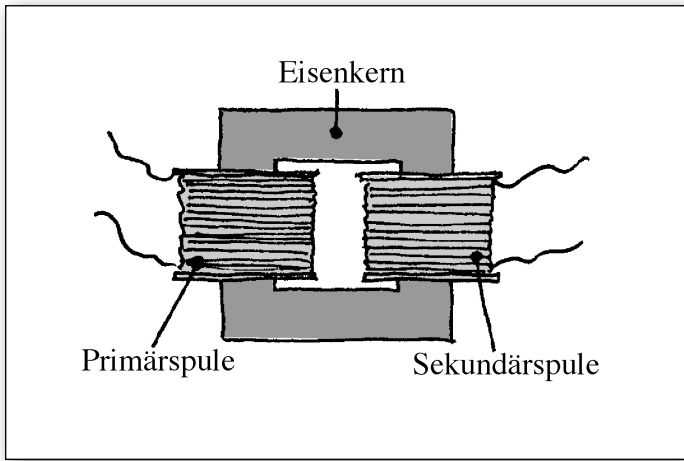


Abb. 18.54
Aufbau eines Transformators

Wir wollen uns mit der Funktionsweise des Transformators etwas vertraut machen. Wir verbinden die eine Spule eines Transformators mit einer Glühlampe und die andere über einen Schalter mit einer Batterie, Abb. 18.55. Schließt man nun den Schalter, so leuchtet die Lampe kurz auf. Öffnet man den Schalter wieder, so leuchtet sie wieder auf. Die Erklärung hierfür können wir leicht geben: Sowohl beim Schließen als auch beim Öffnen des Schalters ändert sich überall im Eisenkern die Magnetisierung. Da sie sich auch innerhalb der Sekundärspule ändert, wird zwischen den Anschlüssen dieser Spule eine Spannung induziert.

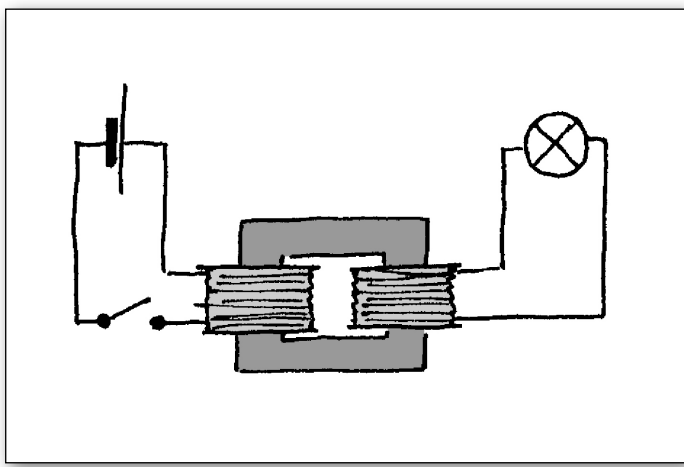


Abb. 18.55
Beim Öffnen und beim Schließen des Schalters leuchtet die Lampe kurz auf.

Damit die Lampe dauernd brennt, müsste man den elektrischen Strom in der Primärspule ständig, in schneller Folge, ein- und wieder ausschalten. Stattdessen kann man die Primärspule auch einfach mit einer Wechselspannungsquelle verbinden. Die in der Sekundärspule induzierte Spannung ist natürlich auch eine Wechselspannung. Wir sehen also, dass ein Transformator nur mit Wechselspannung funktioniert.

Wie schafft man es nun, eine Spannung mit Hilfe eines Transformators herunter- oder heraufzusetzen? 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 der verschiedensten Windungszahlen. Wir stellen 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:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

wobei U_1 und U_2 die Spannungen an Primär- bzw. Sekundärspule sind und n_1 und n_2 die entsprechenden Windungszahlen.

Während der elektrische Strom beim Transformator in zwei getrennten Stromkreisen fließt, Abb. 18.56a, fließt die Energie von der Primärseite zur Sekundärseite des Transformators hinüber, Abb. 18.56b

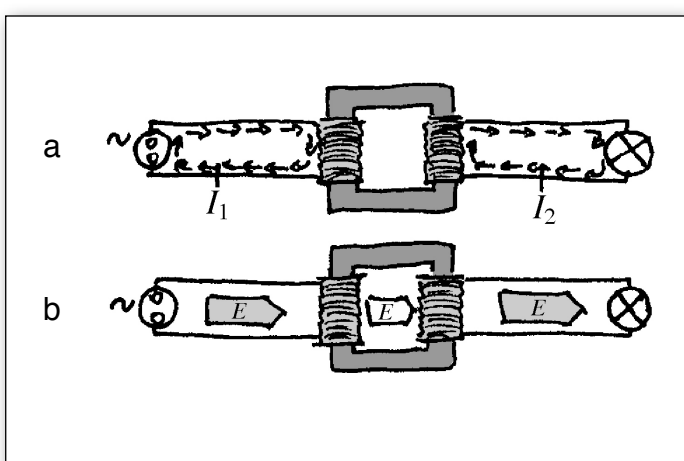


Abb. 18.56
Weg des elektrischen Stroms (a) und des Energiestroms (b) im Transformator

Die Stärke P_1 des Energiestroms, der in den Transformator hineinfließt, ist, von kleinen Verlusten abgesehen, genauso groß wie die Stärke P_2 des Energiestroms, der den Transformator verlässt. Es ist also

$$P_1 = P_2.$$

Und weil $P = U \cdot I$ ist, muss gelten

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2.$$

U_1 , U_2 , I_1 und I_2 sind die Spannungen und Stromstärken von Primär- bzw. Sekundärstromkreis.

Aus der letzten Gleichung folgt, dass mit einer Abnahme der Spannung im Transformator eine Zunahme der elektrischen Stromstärke um denselben Faktor verbunden ist. Ebenso ist mit einer Zunahme der Spannung eine Abnahme der elektrischen Stromstärke um denselben Faktor verbunden.

Aufgaben

1. Die Spulen eines Transformators haben 1000 bzw. 5000 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 1000 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. 18.57 fließt ein Energiestrom von 100 kW. Welche Anforderungen sind an die Zuleitungen, welche an die Wegleitungen zu stellen? Warum transportiert man elektrizitätsgetragene Energie vorzugsweise mit Hochspannung?

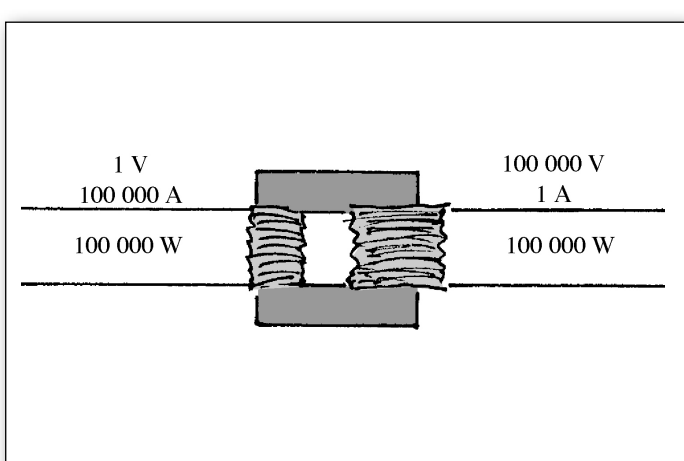


Abb. 18.57
Zu Aufgabe 4

18.16 Das magnetische Feld induzierter Ströme

Blättere noch einmal zurück zu Abschnitt 18.10. Wir hatten dort gesehen, dass ein Elektromagnet

- einen Dauermagneten anziehen und abstoßen kann, Abb. 18.44;
- einen anderen Elektromagneten anziehen und abstoßen kann, Abb. 18.46;
- aber ein Stück Weicheisen immer anzieht, Abb. 18.45.

Wir machen nun einige Versuche, die den in Abschnitt 18.10 beschriebenen ähnlich sind, Abb. 18.58. Wir hängen zunächst neben einen Elektromagneten einen Metallring mit einem Schlitz. Wir schalten den Elektromagneten ein, und es passiert nichts – wie du es wohl auch erwartet hast. Ein elektrischer Leiter, in dem kein Strom fließt, ist schließlich kein Magnet, und er ist auch kein Weicheisenstück.

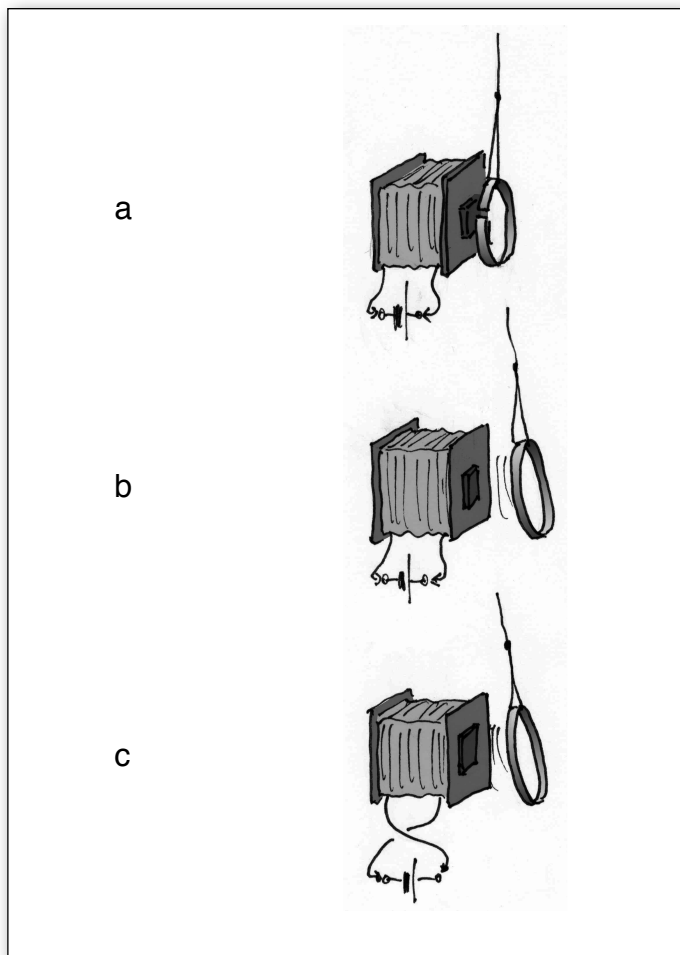


Abb. 18.58

(a) Ein nicht geschlossener Metallring wird weder angezogen noch abgestoßen. (b) und (c) Ein geschlossener Ring wird beim Einschalten des Elektromagneten immer weggedrückt, egal in welche Richtung der Strom fließt.

Wir ändern den Versuch nun ganz wenig ab: Wir nehmen einen Ring ohne Schlitz, d. h. ohne Unterbrechung. Der Elektromagnet wird wieder eingeschaltet. Resultat: Der Ring wird weggestoßen. Wie kommt das?

Es ist nur dadurch zu erklären, dass im Ring ein elektrischer Strom geflossen ist. Wie kommt dieser Strom zustande? Durch Induktion natürlich. Beim Einschalten des Elektromagneten ändert sich das magnetische Feld im Ring, so dass in ihm ein elektrischer Strom induziert wird. Dieser Strom wiederum verursacht ein magnetisches Feld. Beide Felder zusammen – das des Elektromagneten und das des Rings – bewirken die Abstoßung. Die Abstoßung verschwindet aber sofort wieder, denn das induzierte magnetische Feld existiert ja nur für sehr kurze Zeit: nur während des Einschaltens des Elektromagneten.

Wir machen das Experiment noch einmal, vertauschen aber vorher die Anschlüsse des Elektromagneten. Der Strom fließt also nach dem Einschalten in die andere Richtung als vorher. Die Beobachtung: Der Ring wird wieder weggedrückt. Überraschung! Oder doch nicht? Eigentlich war das Ergebnis zu erwarten: Wir haben ja erstens den Elektromagneten umgepolt. Zweitens hat aber auch der induzierte Strom seine Richtung gewechselt. Wir haben also beide „Magneten“ (Elektromagnet und Ring) umgedreht. Und dabei verwandelt sich natürlich Abstoßung nicht in Anziehung.

Wir können damit eine Regel formulieren:

Die Richtung des in einem Leiter induzierten Stroms ist so, dass Abstoßung entsteht zwischen dem Leiter und dem Magneten, der die Induktion verursacht.

18.17 Supraleiter

Es gibt Stoffe, die ihren elektrischen Widerstand verlieren, wenn man sie unter eine bestimmte Temperatur abkühlt. Man nennt sie *Supraleiter*. Die Übergangstemperatur vom normalen in den supraleitenden Zustand liegt bei manchen dieser Stoffe relativ hoch: bei etwa $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Man kann diese Stoffe recht leicht in den supraleitenden Zustand bringen, nämlich, 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, deren Feld nach oben weist. Wir nähern dem Magneten nun von oben her ein kleines Stück supraleitenden Materials und lassen es los. Der Supraleiter fällt nicht herab, er schwebt über den Magneten, Abb. 18.59. Wir können 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).

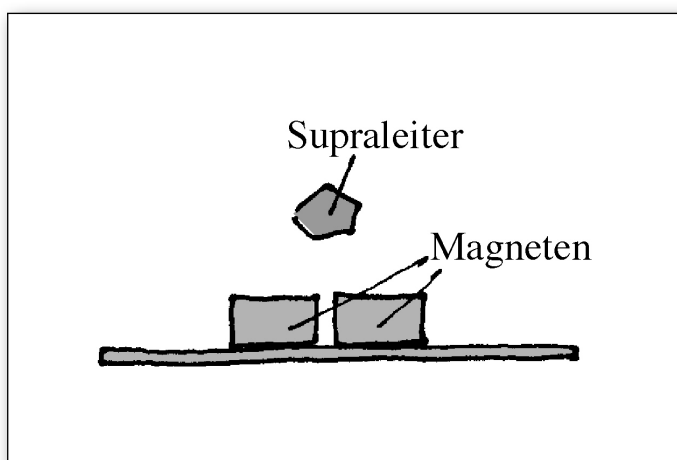


Abb. 18.59

Der Supraleiter wird durch das magnetische Feld in der Schwebe gehalten.

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? Wir erinnern uns an das Ergebnis des letzten Abschnitts. Dort hatten wir beobachtet, dass die Spule vom Elektromagneten stets abgestoßen wird.

Die Erklärung der Abstoßung des Supraleiters ist nun dieselbe: 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 der Spule hörten die induzierten Ströme gleich wieder auf zu fließen, sie wurden durch den Widerstand der Spule abgebremst. Beim Supraleiter fließen die einmal angeworfenen Ströme aber weiter, solange man ihn über den Magneten hängen lässt. 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.

Die Supraleiter haben also Eigenschaften, die denen der weichmagnetischen Stoffe sehr ähnlich sind. Auch sie lassen das magnetische Feld nicht in sich herein. Sie erreichen das aber durch einen anderen „Trick“: nicht durch das Ausbilden von magnetischen Polen, sondern durch das Anwerfen von elektrischen Strömen.

19

Elektrostatik

19.1 Ladung und Ladungsträger

Wenn sich in einem Draht Elektrizität von der einer Stelle zu einer 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 würde. 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 vielen 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, so dass 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: Elektrizität sitzt immer auf irgendwelchen Teilchen. Neben Protonen und Elektronen gibt es noch weitere Teilchen, die Elektrizität tragen: Positronen, Myonen, Antiprotonen und andere. Diese kommen unter normalen Bedingungen nicht vor. Man kann sie aber künstlich erzeugen. Sie haben allerdings 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. Elektrisch geladene Teilchen, also Elektronen, Protonen, Ionen usw., nennt man *Ladungsträger*.

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

19.2 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 positive, in manchen nur negative und in wieder anderen sowohl positive als auch negative Ladungsträger.

In Metallen sind die beweglichen Ladungsträger Elektronen. Allerdings können sich längst nicht alle Elektronen der Metallatome bewegen, sondern pro Atom gerade nur ein einziges. 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 Ladungsträger mit Ladungen beiderlei Vorzeichens.

Fließt 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. 19.1 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 von links nach rechts bewegen, in (b) fließen negative Ladungsträger von rechts nach links. In Teil (c) bewegen sich gleichzeitig positive Ladungsträger nach rechts und negative nach links; beide Ladungsträgersorten tragen zum Gesamtstrom bei.

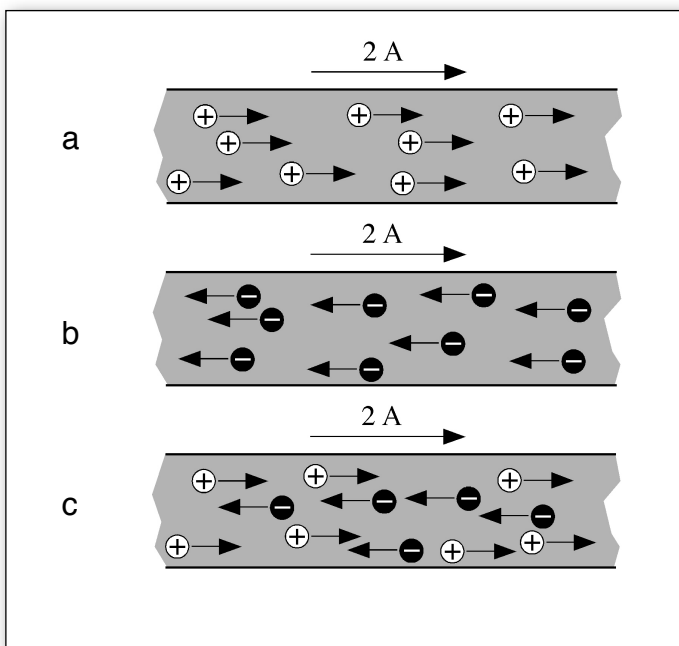


Abb. 19.1

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

Es wird dich überraschen, wie langsam sich die Ladungsträger in einem Leiter bewegen: Fließt in einem Kupferdraht von 1 mm² Querschnitt ein elektrischer Strom von 1 A, so beträgt die Geschwindigkeit der beweglichen Ladungsträger (der beweglichen Elektronen) 0,07 mm/s.

Man kann die Bewegung der Ladungsträger sogar sichtbar machen. Man lässt dazu einen elektrischen Strom durch eine Salzlösung fließen, Abb. 19.2. In einer flachen Rinne befindet sich auf der linken Seite eine Lösung von Kaliumnitrat, auf der rechten von Kaliumpermanganat. Die linke Lösung ist klar und durchsichtig, die rechte violett. Die Färbung der Kaliumpermanganatlösung kommt durch die negativen Permanganationen zustande. Wenn nun ein elektrischer Strom fließt, bewegen sich alle Ionen, auch die Permanganationen. Die Bewegung der Permanganationen hat zur Folge, dass sich die Grenze zwischen dem violetten und dem farblosen Gebiet verschiebt, und das kann man mit bloßem Auge gut erkennen. Fließt der elektrische Strom (in Abb. 19.2) von links nach rechts, so bewegen sich die violetten Ionen nach links, fließt der elektrische Strom nach links, so bewegen sie sich nach rechts.

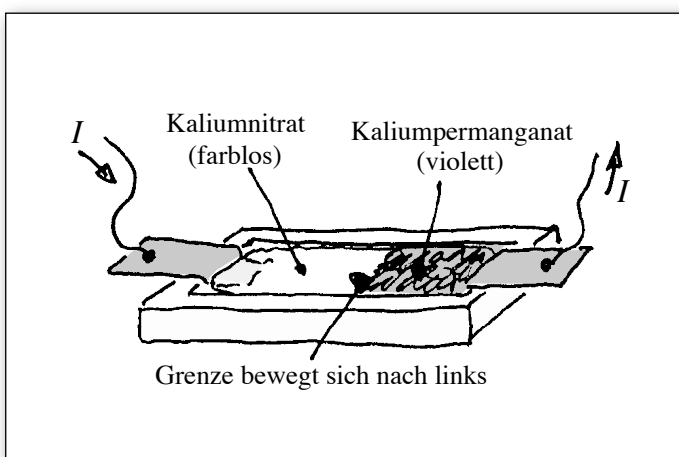


Abb. 19.2

Fließt durch die Lösung ein elektrischer Strom, so verschiebt sich die Grenze zwischen der violetten Kaliumpermanganatlösung und der farblosen Kaliumnitratlösung.

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? Welche Stärke hat er?
2. In einem Kupferdraht fließt ein elektrischer Strom von 2 A. Wie viele Elektronen bewegen sich pro Sekunde durch einen Querschnitt der Leitung?

19.3 Die Anhäufung von elektrischer Ladung

Unser ursprüngliches Anliegen war es, etwas über die Eigenschaften der Elektrizität zu erfahren. Wir haben uns dann aber klar gemacht, warum ein normaler Stromkreis überall elektrisch neutral ist, warum man also von der elektrischen Ladung normalerweise nichts merken kann. Wir wollen nun versuchen, die Neutralität eines elektrischen Leiters zu stören; wir wollen versuchen, Ladung auf ihm anzuhäufen, so dass 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. 19.3. Der linke Behälter ist mit Luft unter Normaldruck gefüllt. Wir möchten nun die Luftmenge in diesem Behälter vergrößern. Dazu drücken wir mit einer Pumpe Luft von außen in den Behälter hinein. Der Druck nimmt bei diesem Vorgang zu. Der rechte Behälter in Abb. 19.3 ist mit Wasser gefüllt, und wir möchten die Wassermenge in diesem 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 sehr wenig vergrößern. Das liegt daran, dass sich Wasser nicht so leicht zusammendrücken lässt wie Luft.

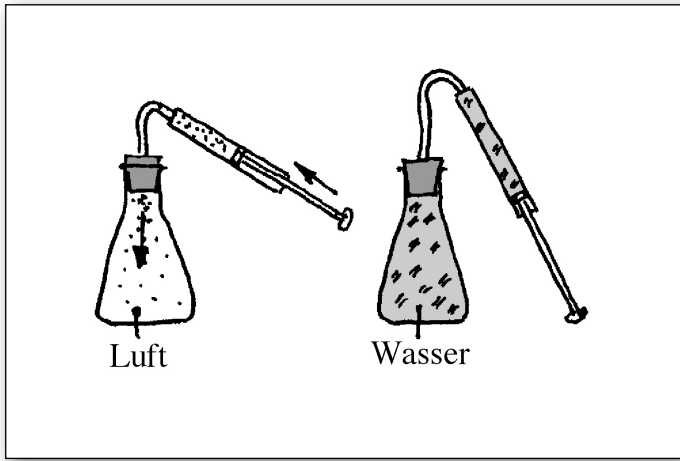


Abb. 19.3

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

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. 19.4 zeigt einen Versuch, der fehlschlägt: Der Plusanschluss einer Batterie ist mit einem Kabel verbunden, der Minusanschluss mit der Erde. Die Batterie sollte nun Elektrizität aus der Erde herausziehen und in das Kabel hineindrücken. Das Kabel sollte sich elektrisch aufladen und auch geladen bleiben, wenn man es von der Batterie löst. Berührt man es dann mit dem einen Anschluss eines Lämpchens, dessen anderer Anschluss geerdet ist, so sollte das Lämpchen aufleuchten, denn die angehäuften Elektrizität sollte über das Lämpchen zurück in die Erde fließen. Das Lämpchen leuchtet aber nicht auf. Warum nicht? Weil die Elektrizitätsmenge, die wir auf das Kabel gepumpt haben, viel zu klein ist.

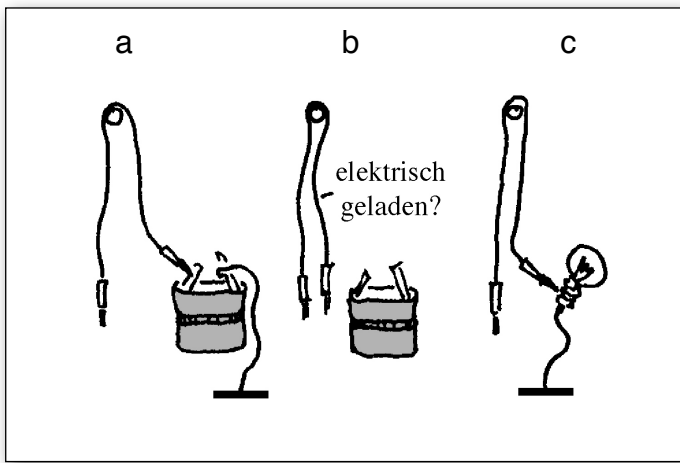


Abb. 19.4

(a) Die Batterie pumpt Elektrizität aus der Erde in das Kabel. (b) Das Kabel ist elektrisch geladen. (c) Das Lämpchen leuchtet nicht auf, weil die Ladung des Kabels viel zu gering ist.

Um eine Ladungsanhäufung auf dem Kabel nachzuweisen, müssen wir das Experiment in dreierlei 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. 19.5. Der Bandgenerator erzeugt Spannungen bis zu etwa 50 kV.

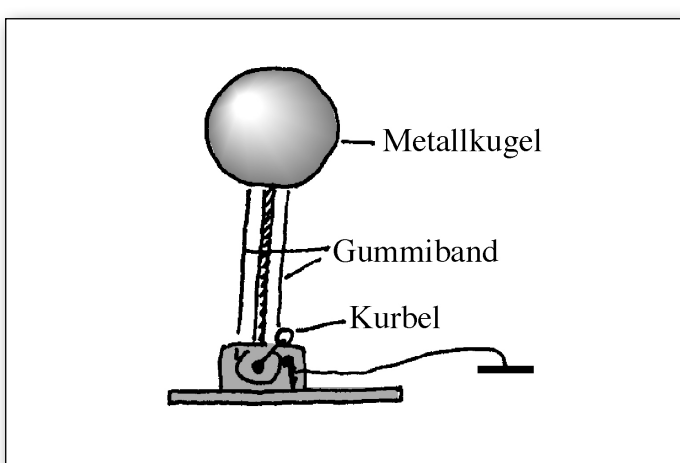


Abb. 19.5

Bandgenerator

(2) Zum Nachweis der Ladung des Kabels 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 Potential liegt.

(3) Wir hängen das Kabel über Isolatoren. Die normale Plastikisolation des Kabels ist nämlich zu schlecht, die angehäuften Elektrizität könnte über diese Isolierung und über den Tisch in die Erde abfließen.

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 Kabels. Wird der Minusanschluss des Netzgerätes geerdet, Abb. 19.6, so wird das Kabel positiv geladen. Da die beweglichen Ladungsträger des Kabels Elektronen sind, bedeutet das, dass dem Kabel Elektronen fehlen. Es hat weniger Elektronen als im ungeladenen Zustand. Wird der Plusanschluss geerdet und der Minusanschluss mit dem Kabel verbunden, so wird das Kabel negativ. Es hat einen Elektronenüberschuss.

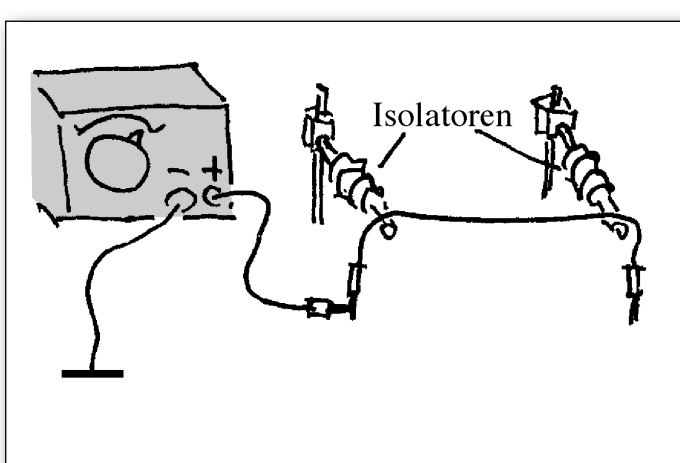


Abb. 19.6

Das Kabel ist positiv geladen, es herrscht Elektronenmangel.

Die Ladungsmenge, die wir im Kabel anhäufen, ist umso größer, je höher das Potential ist, auf das wir das Kabel bringen. Ein hohes positives Potential ist mit einer (relativ) großen positiven Ladungsmenge verbunden, ein hohes negatives Potential mit einer (relativ) großen negativen Ladungsmenge. Wir fassen dieses Ergebnis zusammen:

Je höher das elektrische Potential 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 Potential des Körpers.

19.4 Das elektrische Feld

Wir haben es nun geschafft, Ladung anzuhäufen und die angehäu- te Ladung auch nachzuweisen; wir haben aber noch keine besonde- ren Eigenschaften der elektrischen Ladung bemerkt. Um die Eigen- schaften der Elektrizität zu untersuchen, führen wir das in Abb. 19.7 skizzierte Experiment aus. 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. Laden wir die vorher positive Kugel negativ und die vorher negative positiv auf, so ändert sich nichts: B wird wieder zu A hingezogen.

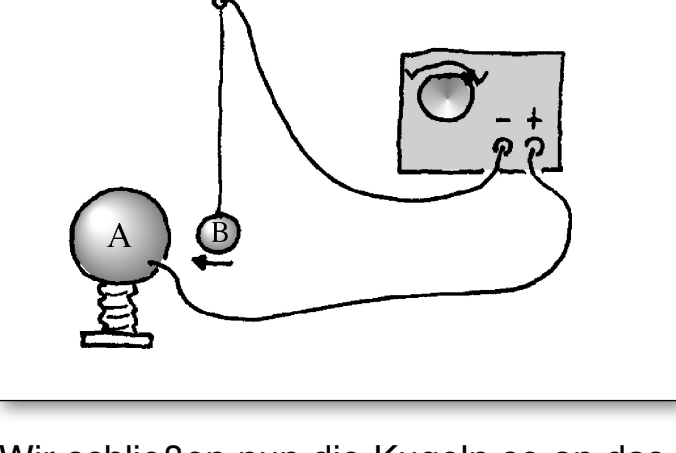


Abb. 19.7
Durch das elektrische Feld wird Kugel B zu Kugel A hingezogen.

Wir schließen nun die Kugeln so an das Netzgerät an, dass ihre La- dungen dasselbe Vorzeichen haben, Abb. 19.8. Jetzt wird B von A weggedrückt. Dabei ist es egal, ob beide Kugeln positiv oder beide negativ geladen sind.

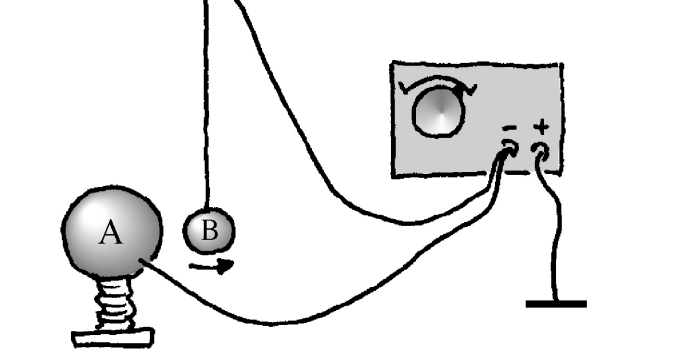


Abb. 19.8
Durch das elektrische Feld wird Kugel B von Kugel A weggedrückt.

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

Man nennt diese Verbindung *elektrisches Feld*.

Elektrisch geladene Gegenstände sind von einem elektrischen Feld umgeben. 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.

Wir machen schließlich ein Experiment, das noch einfacher ist als die vorangehenden, Abb. 19.9: Nur die feststehende Kugel A wird elektrisch geladen, Kugel B wird einfach isoliert aufgehängt. Überra- schenderweise 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.

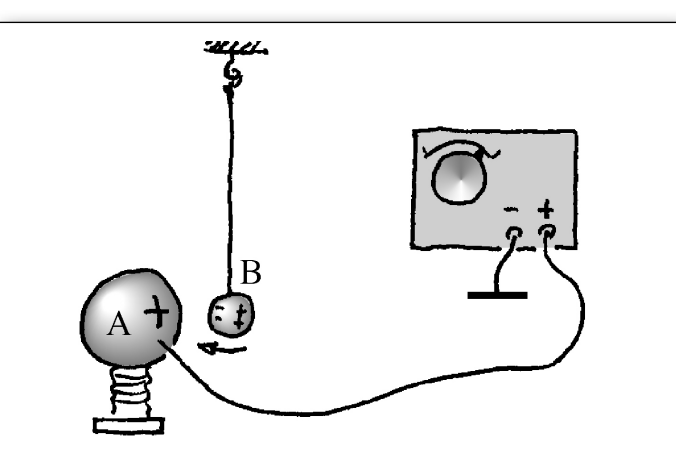


Abb. 19.9
Die beweglichen Ladungsträger auf B werden durch das elektrische Feld verschoben. An der Oberfläche von B bilden sich elektrisch geladene Bereiche.

Wir finden die Erklärung, wenn wir uns an eine ähnliche Erschei- nung 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 Pol zugewandten Seite einen Südpol und auf der entgegengesetzten Seite einen Nordpol, Abb. 19.10.

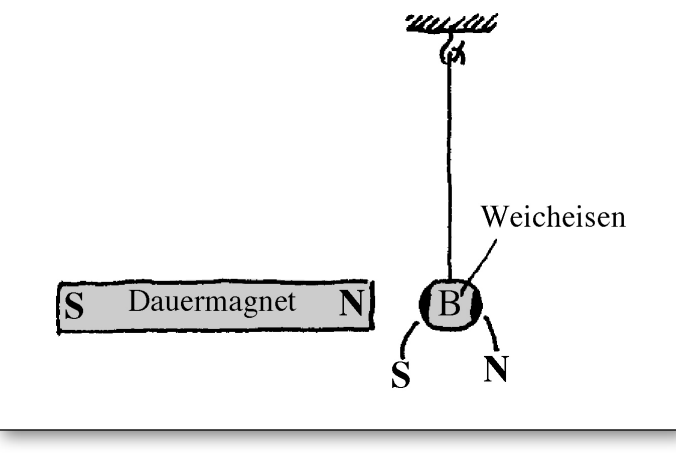


Abb. 19.10
B wird durch das magnetische Feld magnetisiert. An der Oberflä- che von B bilden sich Magnetpole.

Ganz ähnlich ist es bei unserem letzten Experiment. Das elektrische Feld zieht an den Ladungsträgern von B und verschiebt sie etwas, so dass sich B auf der einen Seite positiv und auf der gegenüberlie- genden 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 zuge- wandten Seite von B entgegengesetztes Vorzeichen, so dass B zu A hingezogen wird.

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

Als Nachweis dafür, dass ein Gegenstand elektrisch geladen ist, stand uns früher nur das Glimmlämpchen zur Verfügung. Ein ande- res Nachweisgerät für die Elektrizität ist das *Elektroskop*. Wir könn- en jetzt verstehen, wie es funktioniert.

Im Innern des Ringes, Abb. 19.11, befindet sich ein senkrechter Stab. Der Stab ist vom Ring elektrisch isoliert. An diesem Stab be- findet sich drehbar gelagert ein weiterer Stab. Dieser drehbare Stab ist sehr leicht, und er ist mit dem festen Stab leitend verbunden. Beide Stäbe sind mit dem oberen Anschluss des Elektroskops elektrisch leitend verbunden. Der Ring wird geerdet.

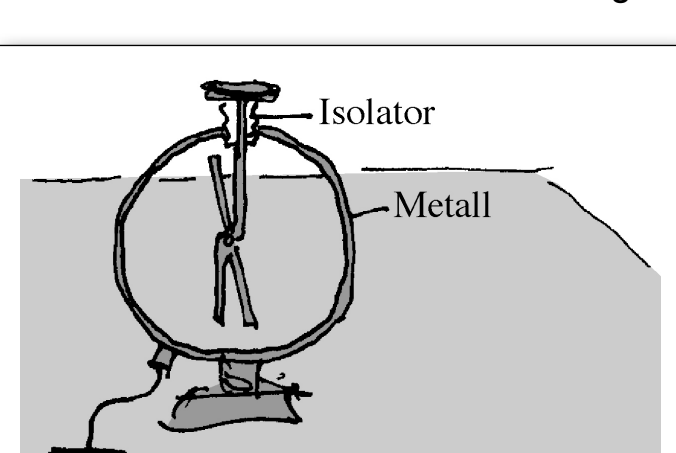


Abb. 19.11
Elektroskop. Der bewegliche Stab trägt Ladung desselben Vorzei- chens wie der feste.

Wir wollen das Elektroskop benutzen, um die auf der Kugel sitzende Ladung nachzuweisen. Dazu wird der obere Anschluss des Elektro- skops 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. 19.12.

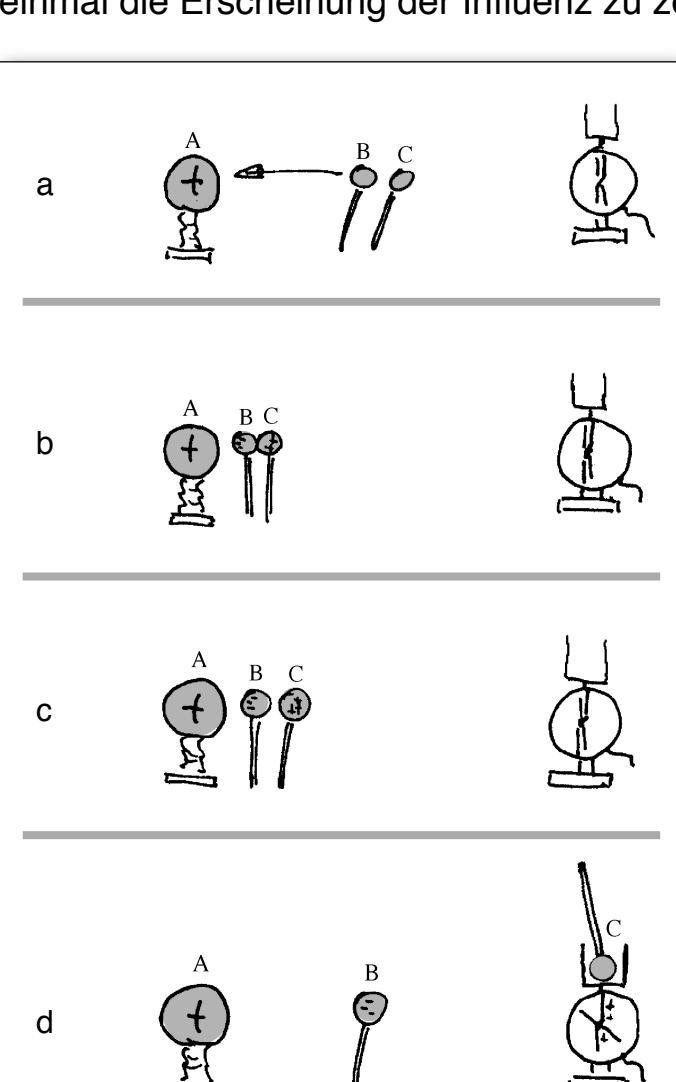


Abb. 19.12
(a) Die neutralen Kugeln B und C werden in die Nähe von A ge- bracht.
(b) Die Ladungen auf B und C trennen sich durch Influenz.
(c) Der Kontakt zwischen B und C wird unterbrochen.
(d) Die Ladung von C wird mit dem Elektroskop nachgewiesen.

Die große Kugel wurde positiv elektrisch geladen. Wir bringen zwei kleine, neutrale Kugeln B und C in den Bereich des Feldes der gro- ßen, Abb. 19.12a. B und C berühren sich gegenseitig, sie berühren aber nicht A, Abb. 19.12b. Durch das Feld von Kugel A werden La- dungen auf B und C getrennt, es findet Influenz statt. 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 in der Nähe von A sind, Abb. 19.12c. Wir führen sie dann aus dem Bereich der großen Kugel heraus, Abb. 19.12d. 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 Ku- geln, mit C zum Beispiel. Von C fließt negative Ladung auf das E- lektroskop, das Elektroskop schlägt aus. Wir berühren dann das E- lektroskop mit Kugel B. Jetzt fließt positive Elektrizität auf das Elektroskop und neutralisiert die negative, so dass der Ausschlag wieder zurückgeht.

Aufgaben

1. Auf Kugel B in Abb. 19.9 werden positive und negative Ladungsträ- ger 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 feststehenden Kugeln B und C aufgehängt, Abb. 19.13. Man bringt Kugel A kurz zur Berührung mit C und lässt sie dann los. Was passiert?

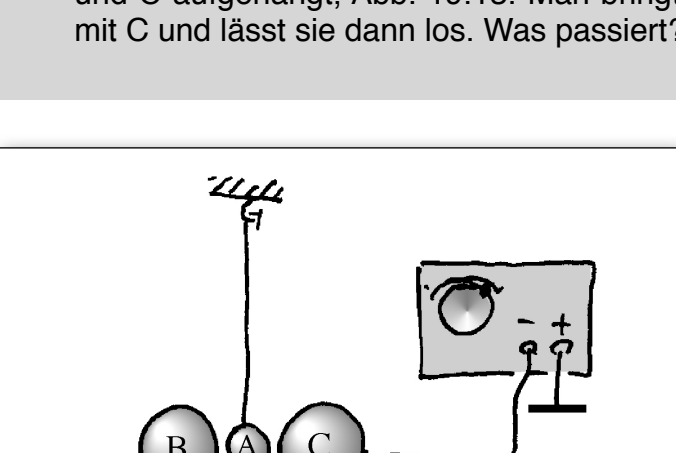


Abb. 19.13
Zu Aufgabe 3

19.5 Der Kondensator

Wir hatten Drähte und Metallkugeln elektrisch geladen. Trotz des hohen Potentials haben wir aber nur sehr wenig Ladung anhäufen können. Wir haben noch nicht untersucht, wie die Ladungsmenge von der Größe und der Form des geladenen Körpers abhängt. Das wollen wir jetzt tun. Es ist natürlich unser Ziel, herauszufinden wie man möglichst viel Ladung speichern kann.

Unsere erste Feststellung ist, dass die Elektrizität nur auf der äußeren Oberfläche eines geladenen Körpers sitzt. Das erkennt man daran, dass man bei gleichem Potential auf einer vollen Kugel nicht mehr Ladung unterbringt als auf einer hohlen, Abb. 19.14. Allerdings sitzt auf einer großen Kugel mehr Ladung als auf einer kleinen. Um viel Ladung zu speichern, muss man also einen Gegenstand mit großer äußerer Oberfläche verwenden.

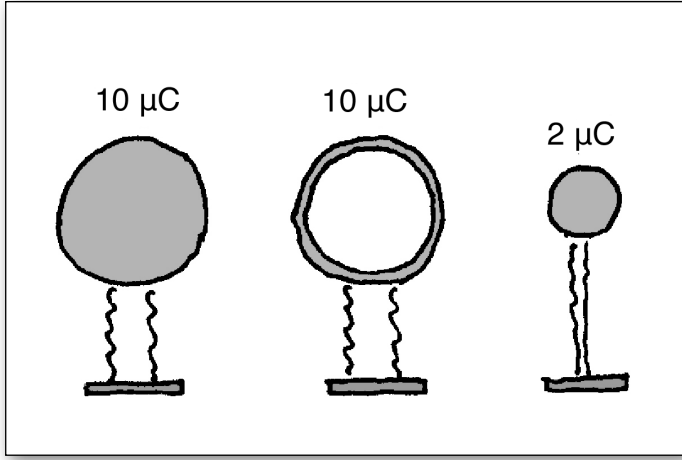


Abb. 19.14

Bei gleichem Potenzial sitzt auf einer hohlen Kugel dieselbe Elektrizitätsmenge wie auf einer gleich großen massiven Kugel, aber mehr als auf einer kleinen.

Es gibt aber eine noch viel wirksamere Methode, die angehäuften Ladungsmenge zu vergrößern: Man bringt den Körper, von dem man die Ladung herunternimmt, in die Nähe von dem, auf den man sie drauf tut. Je näher sich die beiden Körper sind, desto mehr Ladung enthalten sie bei vorgegebenem Potentialunterschied. Den größten Effekt erzielt man, wenn die beiden Körper plattenförmig sind und man den Abstand zwischen den Platten sehr gering macht. Das Feld zieht dann die Ladungen auf den Platten aufeinander zu, so dass sie nur auf den einander zugewandten Oberflächen der beiden Platten sitzen, Abb. 19.15. Ein solches Gerät zur Speicherung elektrischer Ladung nennt man einen *Kondensator*.

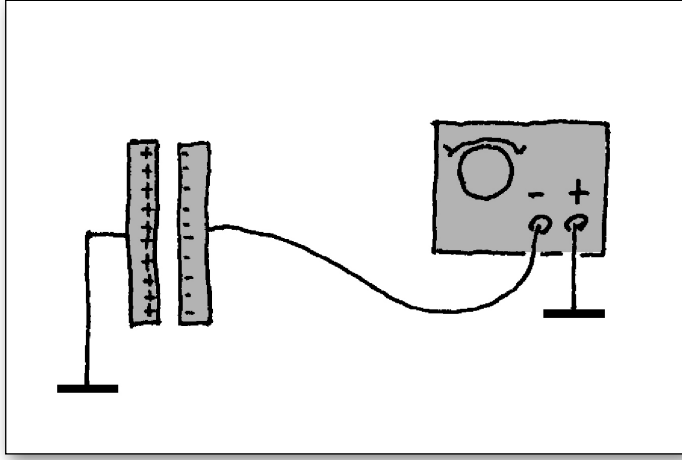


Abb. 19.15

Kondensator. Zwei Metallplatten stehen sich in sehr geringem Abstand gegenüber. Die Ladungen auf den Platten haben entgegengesetztes Vorzeichen.

Wir machen einen Versuch, der zeigt, dass das Fassungsvermögen eines Kondensators zunimmt, wenn man den Plattenabstand vermindert. Wir verwenden dazu einen Kondensator mit veränderlichem Plattenabstand. Die eine Platte, die negativ geladene zum Beispiel, wird geerdet. Wir laden den Kondensator zunächst bei großem Plattenabstand und entladen ihn dann über ein Glühlämpchen. Wir wiederholen diesen Versuch mehrere Male, wobei wir die Spannung am Netzgerät jedes Mal etwas vermindern, Abb. 19.16.

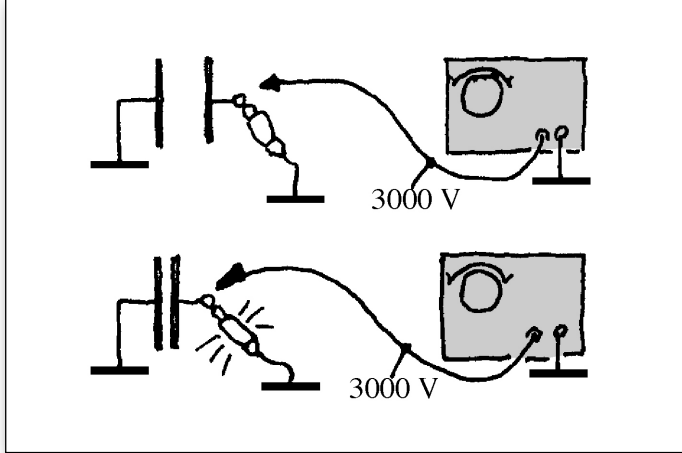


Abb. 19.16

Eine Verminderung des Plattenabstandes bewirkt eine Zunahme der Ladung auf den Platten.

Schließlich ist die Ladung des Kondensators so klein, dass kein Aufleuchten des Lämpchens mehr zu erkennen ist. Wir schieben nun die beiden Platten auf einen sehr geringen Abstand – etwa 2 mm – zusammen, und wiederholen den Versuch noch einmal mit der zuletzt eingestellten, niedrigen Spannung. Das Glühlämpchen leuchtet wieder kräftig auf. Bei gleicher Spannung befindet sich also bei kleinem Plattenabstand mehr Ladung auf den Platten als bei großem Abstand.

Je kleiner der Plattenabstand eines Kondensators ist, desto größer ist die gespeicherte Ladungsmenge.

In technischen Kondensatoren ist der Plattenabstand noch viel geringer und die Plattenfläche viel größer als in unserem Experimentierkondensator. Man erreicht das zum Beispiel dadurch, dass man zwei sehr dünne Schichten aus Aluminiumpapier, das von einer ebenfalls sehr dünnen Schicht Isoliermaterial überzogen ist, zu einem Zylinder aufwickelt, Abb. 19.17.

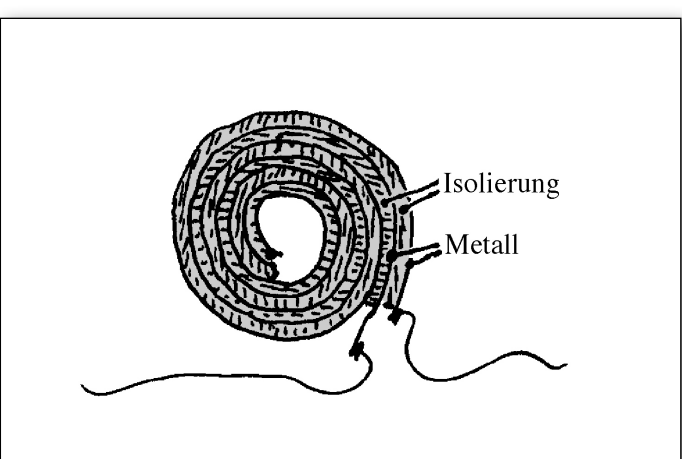


Abb. 19.17

Metallpapierkondensator im Querschnitt

Die Ladung auf einem technischen Kondensator kann so groß sein, dass ihr Nachweis ganz einfach wird. Wir bauen die auf Abb. 19.18 dargestellte Schaltung auf (du siehst hier auch gleich das technische Symbol des Kondensators). Der Kondensator wird geladen, indem er kurz an ein 6-V-Netzgerät angeschlossen wird. Er wird dann mit einem kleinen Elektromotor verbunden. Der Motor läuft ein paar Sekunden lang.

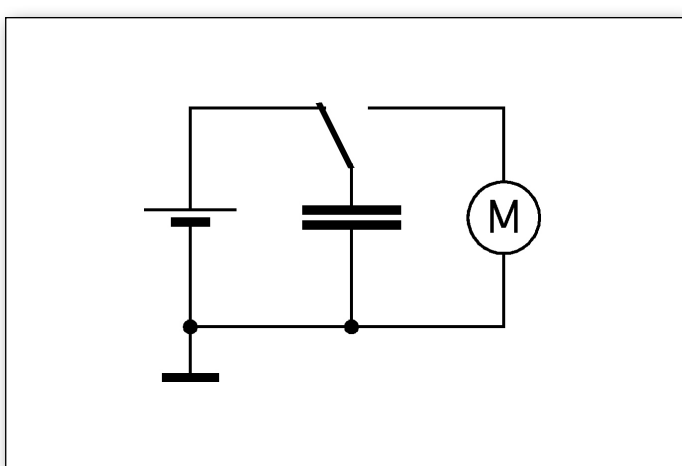


Abb. 19.18

Der Kondensator als Energiespeicher

Wir erkennen an diesem Experiment auch, 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 das magnetische 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 Funktion erfüllen wie der Akkumulator: Er speichert Energie. Er bekommt diese Energie beim Laden mit dem Energieträger Elektrizität, und er gibt sie beim Entladen mit demselben Energieträger wieder ab. Er unterscheidet sich vom Akku in zwei Eigenschaften: Man kann die Energie in den Kondensator viel schneller hineinbringen und viel schneller herausholen als beim Akkumulator. Dafür ist aber das Fassungsvermögen des Kondensators (für die Energie) viel kleiner als die des Akkumulators.

Kondensatoren sind in allen elektronischen Geräten zu finden.

19.6 Die Kapazität

Wir wollen untersuchen, wie viel elektrische Ladung sich auf den Platten eines Kondensators befindet. Beim Laden nimmt die Spannung zwischen den Platten zu. Wir laden den Kondensator so lange, bis die Spannung den höchsten zulässigen Wert erreicht hat. (Dieser Wert ist auf den Kondensator aufgedruckt. Wenn man ihn überschreitet, kann es zu einem Durchschlag zwischen den Platten kommen.)

Wir laden den Kondensator mit Hilfe eines Netzgeräts, das einen elektrischen Strom konstanter Stärke liefert. Um die gespeicherte Elektrizitätsmenge zu erhalten, benutzen wir die Beziehung

$$Q = I \cdot t.$$

Wir kennen die Stärke I des Ladestroms und messen die zum Laden benötigte Zeit t . Wir können damit die Elektrizitätsmenge Q , die sich am Ende des Ladevorgangs auf den Platten befindet, berechnen. Genauer gesagt: Q stellt die Ladung der positiven Platte dar. Auf der negativen sitzt die Ladung $-Q$.

Beispiel: Der Kondensator wird geladen, bis die Spannung 6 Volt beträgt. Die elektrische Stromstärke beim Laden beträgt 10 mA. Das Laden dauert 6 Sekunden. Die Elektrizitätsmenge auf den Platten ergibt sich zu

$$Q = I \cdot t = 10 \text{ mA} \cdot 6 \text{ s} = 60 \text{ mC}.$$

Wir entladen dann den Kondensator und laden ihn noch einmal, aber nur auf den halben Wert der Spannung. Wir stellen fest, dass wir hierzu auch nur die halbe Zeit brauchen. Auf den Platten sitzt daher auch nur halb so viel elektrische Ladung. Wir schließen, dass die Elektrizitätsmenge auf den Platten proportional zur elektrischen Spannung zwischen den Platten ist, Abb. 19.19:

$$Q \sim U.$$

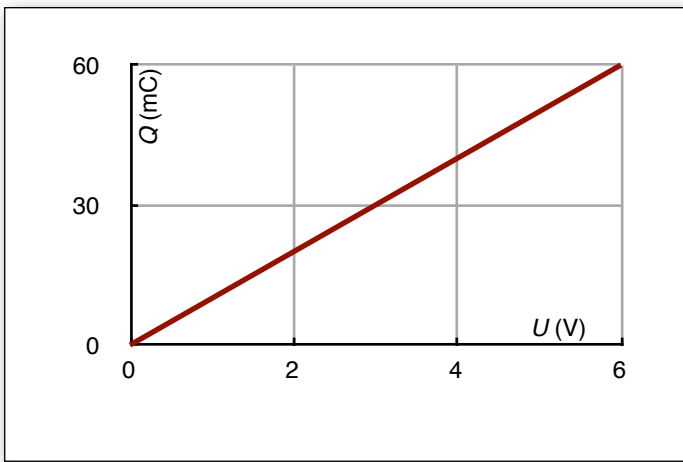


Abb. 19.19

Die Ladung auf den Platten eines Kondensators als Funktion der Spannung zwischen den Platten

Wir können diese Beziehung auch folgendermaßen erhalten. Wir tragen während des Ladevorgangs in einem Diagramm die Ladung auf den Platten über der Zeit auf. Da der Ladestrom konstant ist, nimmt die Ladungsmenge gleichmäßig mit der Zeit zu: Q ist eine lineare Funktion der Zeit, Abb. 19.20a. Wir zeichnen außerdem während des Ladevorgangs die Spannung zwischen den Kondensatorplatten als Funktion der Zeit auf: Es ergibt sich wieder eine lineare Funktion, Abb. 19.20b. Der Vergleich von Abb. 19.20a mit Abb. 19.20b zeigt, dass U auch eine lineare Funktion von Q ist.

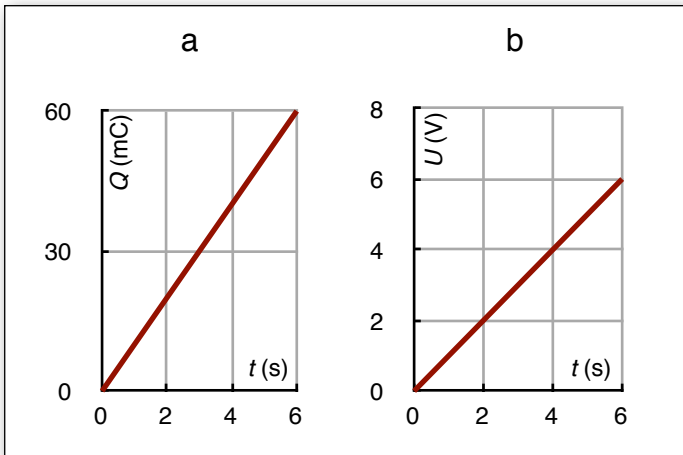


Abb. 19.20

Ladung und Spannung beim Laden eines Kondensators als Funktion der Zeit

Dass $Q \sim U$ ist, ist gleichbedeutend damit, dass der Quotient Q/U konstant ist. Man nennt diesen Quotienten die Kapazität C des Kondensators:

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

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

Der Wert der Kapazität ist auf technische Kondensatoren aufgedruckt. Aus der oben stehenden Gleichung folgt, dass die Maßeinheit der Kapazität Coulomb/Volt ist. Für diese Einheit benutzt man die Abkürzung Farad (F). Es gilt also

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

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

Beispiel: In unserem Beispiel betrug die elektrische Ladung des Kondensators 60 mC, als zwischen den Kondensatorplatten eine Spannung von 6 Volt herrschte. Daraus ergibt sich die Kapazität des Kondensators:

$$C = Q/U = 60 \text{ mC}/6 \text{ V} = 10 \text{ mF}.$$

Die Spannung U zwischen den Platten eines Kondensators ist proportional zur elektrischen Ladung Q , die auf den Platten sitzt. Den Quotienten Q/U nennt man die Kapazität des Kondensators.

Aufgaben

- Ein Kondensator wird mit einer konstanten elektrischen Stromstärke von 2 mA geladen, bis die Spannung zwischen seinen Platten 240 Volt beträgt. Das Laden dauert 2 Minuten.
 - Wie viel elektrische Ladung sitzt am Ende des Ladevorgangs auf den Platten?
 - Welche Kapazität hat der Kondensator?
- Zwischen den Platten eines 80- μ F-Kondensators liegt eine Spannung von 150 Volt. Welche Elektrizitätsmenge sitzt auf den Platten?

19.7 Die Luftelektrizität

Hält man ein geerdetes Kabel in die Nähe der geladenen Kugel eines Bandgenerators, so „springt ein Funke über“. Genauer gesagt passiert das Folgende: In der Luft befindet sich immer eine geringe Menge von Ionen. Diese werden in dem starken Feld zwischen dem Ende des geerdeten Kabels und der Kugel so stark beschleunigt, dass sie, wenn sie mit Molekülen aus der Luft zusammenstoßen, diese ionisieren. Diese neuen Ionen ionisieren weitere Moleküle usw. So bildet sich ein „Schlauch“ aus ionisierter Luft, und dieser ist leitfähig, und er leuchtet. Die Kugel entlädt sich über ihn.

Viel eindrucksvoller sieht man dieselbe Erscheinung beim Gewitter, in Form des Blitzes. Auch hier wird die Luft ionisiert, und zwar zwischen der Erde und einer geladenen Wolke. Die Spannung ist hier allerdings sehr viel höher als bei unserem Bandgenerator, nämlich viele Millionen Volt.

Die Elektrizität fließt nun in der Atmosphäre in einem sehr merkwürdigen Stromkreis. Um diesen Stromkreis zu verstehen, und um zu verstehen, welche Vorgänge bei einem Gewitter ablaufen, müssen wir uns zunächst mit der Atmosphäre bei schönem Wetter befassen.

Die elektrische Leitfähigkeit der Luft ist in Bodennähe sehr gering. Sie wächst aber mit zunehmender Höhe, denn die Anzahl und die Beweglichkeit der Ionen nimmt nach oben hin stark zu. Man kann etwas vereinfachend sagen, dass die Atmosphäre in einer Höhe oberhalb von etwa 50 km eine gut leitende Schicht bildet. Man nennt diesen Teil der Atmosphäre die Ionosphäre. (Der Luftdruck beträgt hier weniger als 1/1000 des Drucks am Erdboden.) Die Ionosphäre und die Erdoberfläche bilden damit sozusagen die beiden Platten eines riesigen Kondensators.

Die Ionosphäre befindet sich nun ständig auf einem Potential von etwa 300 000 Volt. Zwischen ihr und der Erdoberfläche liegt die schlecht leitende Luftschicht, die insgesamt einen Widerstand von etwa 200 Ω hat. Die Potentialdifferenz zwischen der Ionosphäre und der Erdoberfläche führt zu einem vertikal gerichteten elektrischen Strom von 1 500 A, Abb. 19.21.

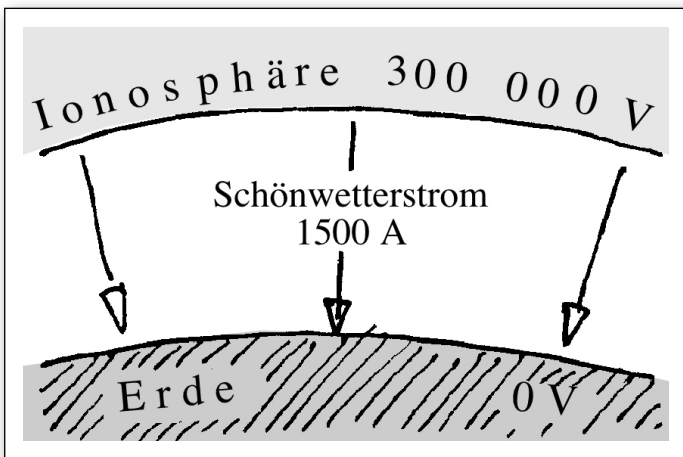


Abb. 19.21

Das elektrische Potential der Ionosphäre ist um etwa 300 000 Volt höher als das der Erde. Von der Ionosphäre zur Erde fließt ein Schönwetterstrom von etwa 1500 A.

Von diesem *Schönwetterstrom* merkt man aber fast nichts, da er sich auf die ganze Erde verteilt. Nun hätte dieser Strom zur Folge, dass sich die Ionosphäre recht schnell entlädt, die Spannung wäre in nicht mehr als einer halben Stunde zusammengebrochen. Dafür, dass sie nicht zusammenbricht, sorgen die Gewitterwolken.

Eine Gewitterwolke kann man sich vorstellen als eine riesige Elektrizitätspumpe, eine Art Batterie oder Bandgenerator. Wie sie funktioniert, werden wir gleich noch sehen. Im Augenblick wollen wir nur betrachten, wie sie in unseren atmosphärischen Stromkreis eingebaut ist, Abb. 19.22. Die Gewitterwolke pumpt Elektrizität von unten nach oben. An ihrer Unterseite entsteht ein stark negatives und an ihrer Oberseite ein stark positives Potential.

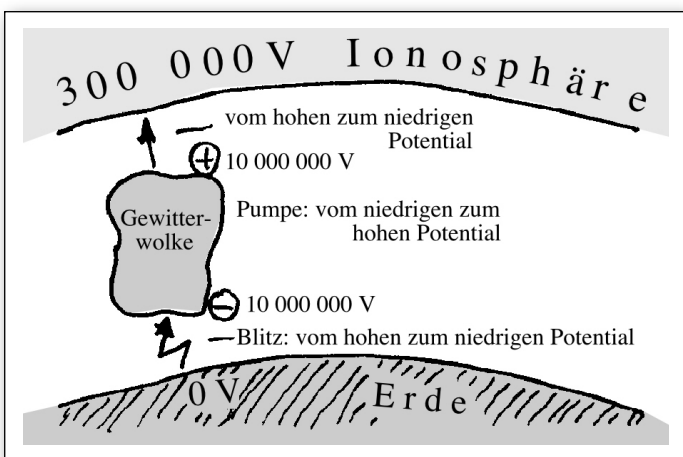


Abb. 19.22

Gewitterwolken pumpen ständig Elektrizität von der Erde zur Ionosphäre.

Da die Luft über der Wolke recht gut leitet, fließt vom oberen „Anschluss“ der Wolke ein elektrischer Strom zur Ionosphäre: vom höheren Potential (einige Millionen Volt) zum niedrigeren Potential (300 000 V).

Außerdem muss noch ein Strom von der Erde zum unteren „Anschluss“ der Wolke fließen, nämlich wieder vom höheren Potential (0 V) zum niedrigeren (minus einige Millionen Volt). Da hier unter der Wolke die Luft aber sehr schlecht leitet, kann dieser Strom nur über Blitze fließen. Die Blitze stellen also die untere Zuleitung zu unserer Elektrizitätspumpe dar.

Wie funktioniert nun diese Pumpe selbst? Was geht in einer Gewitterwolke vor? Wassertropfchen und Eisteilchen in einer Wolke sind elektrisch geladen. Die kleineren Teilchen tragen vorzugsweise positive, die größeren negative elektrische Ladung. Insgesamt, im Durchschnitt über alle Teilchen, ist die Wolke aber zunächst neutral. Nun laufen allerdings in einer Gewitterwolke Vorgänge ab, durch die die großen von den kleinen Teilchen getrennt werden. Damit wird auch die negative von der positiven Elektrizität getrennt, und es baut sich ein Potentialunterschied auf.

Für die Trennung nach der Größe, und damit auch nach dem Vorzeichen der elektrischen Ladung, ist der starke Aufwind innerhalb der Wolke verantwortlich: Kleine Teilchen werden, zusammen mit ihrer elektrischen Ladung, nach oben getragen; große Tropfen Graupeln oder Hagelkörner fallen als Niederschlag nach unten. Das Potential der Wolke wird dabei an ihrer Oberseite stark positiv und an ihrer Unterseite stark negativ.

Das Aufladen der Ionosphäre durch die Gewitterwolken ist nun nicht ein Vorgang, der nur ab und zu einmal passiert. Man kann ja die Ionosphäre als eine einzige, zusammenhängende Kondensatorplatte betrachten, und zu deren Aufladung tragen alle Gewitterwolken auf der ganzen Erde bei. Auf der Erde sind ständig etwa 2 000 Gewitter tätig, mit zusammen etwa 100 Blitzentladungen pro Sekunde. Die Elektrizitätspumpe, die die Ionosphäre auflädt, läuft also ununterbrochen.

20

Datentechnik

20.1 Verstärker

Für jede Art von Transport wird Energie gebraucht. Der Lastwagen, der Ziegelsteine von der Ziegelei zur Baustelle bringt, verbraucht Dieselkraftstoff und damit Energie. Damit Wasser durch eine Wasserleitung oder Erdöl durch eine Pipeline strömt, braucht man Pumpen und diese brauchen Energie. Wo bleibt die Energie, die für diese Transporte eingesetzt wird? Sie führt in jedem Fall dazu, dass der Transportweg etwas erwärmt wird: Es wird Entropie erzeugt. Zusammen mit dieser Entropie verteilt sich die Energie so in der Umgebung, dass man schließlich nichts mehr von ihr merkt.

Auch für den Transport von Daten ist Energie nötig. In den meisten Fällen wird diese Energie von der Datenquelle aus mitgeschickt, sie wird den Daten sozusagen als Wegzehrung mitgegeben. So tragen die Schallwellen, die ein Lautsprecher erzeugt, die elektromagnetischen Wellen, die von einer Antenne ausgehen oder das Licht, das vom Bildschirm eines Fernsehapparats kommt, außer den Daten noch Energie.

Wir können damit das graphische Symbol der Datenquelle vervollständigen, Abb. 20.1.

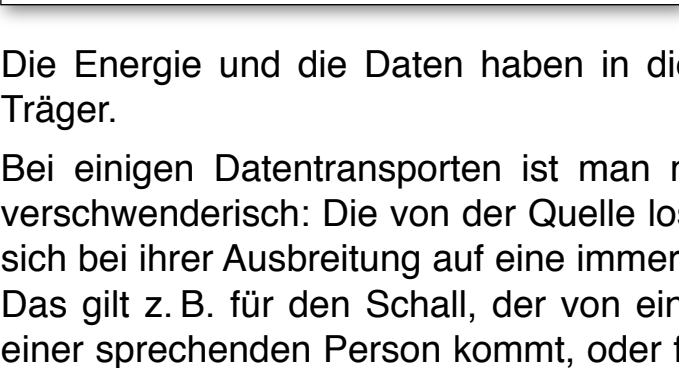


Abb. 20.1
Der Schall, der vom Lautsprecher kommt, trägt Daten und Energie.

Die Energie und die Daten haben in diesen Beispielen denselben Träger.

Bei einigen Datentransporten ist man mit der Energie besonders verschwenderisch: Die von der Quelle losgeschickte Energie verteilt sich bei ihrer Ausbreitung auf eine immer größere Fläche, Abb. 20.2. Das gilt z. B. für den Schall, der von einem Lautsprecher oder von einer sprechenden Person kommt, oder für die elektromagnetischen Wellen, die von einer Rundfunk- oder Fernsehsendeantenne ausgehen. Eine solche Verteilung der Energie im ganzen Raum ist immer dann praktisch, wenn man viele Empfänger erreichen will, ohne zu jedem einzelnen eine Leitung zu legen.

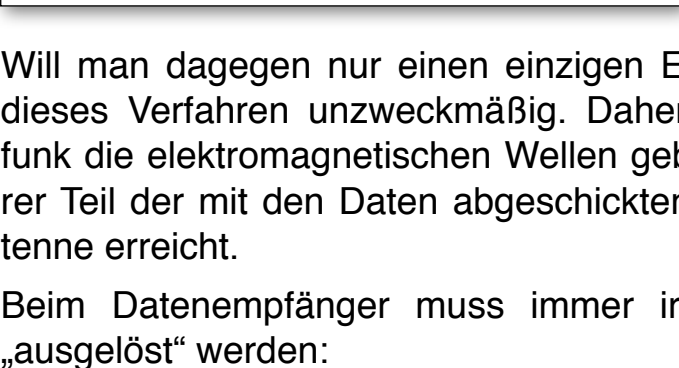


Abb. 20.2
Die von der Quelle ausgesandte Energie verteilt sich auf immer größere Flächen.

Will man dagegen nur einen einzigen Empfänger erreichen, so ist dieses Verfahren unzuweckmäßig. Daher werden z. B. beim Richtfunk die elektromagnetischen Wellen gebündelt, so dass ein größerteil der mit den Daten abgeschickten Energie die Empfangsantenne erreicht.

Beim Datenempfänger muss immer irgendetwas „betätigt“ oder „ausgelöst“ werden:

- in einer Empfangsantenne müssen elektrische Ströme induziert werden;
- das Trommelfell einer hörenden Person muss in Bewegung versetzt werden;
- die Membran eines Lautsprechers muss bewegt werden.

Diese Vorgänge können aber nur dann ablaufen, wenn mit den Daten noch genügend viel Energie ankommt. Sind die Energieverluste in einer Telefonleitung zu groß oder ist der Radioempfänger vom Sender zu weit entfernt, so funktioniert die Datenübertragung nicht mehr.

Damit trotz großer Entfernung von der Quelle beim Empfänger mit den Daten genügend viel Energie ankommt, benutzt man *Verstärker*. Ein Verstärker hat für die Daten einen Eingang und einen Ausgang. Die Daten kommen mit wenig Energie in den Verstärker hinein, und sie verlassen ihn mit viel Energie. Der Datenstrom bekommt also neue Wegzehrung. Abb. 20.3 zeigt symbolisch einen elektrischen Verstärker: Der Datenträger am Eingang und am Ausgang ist hier die Elektrizität.

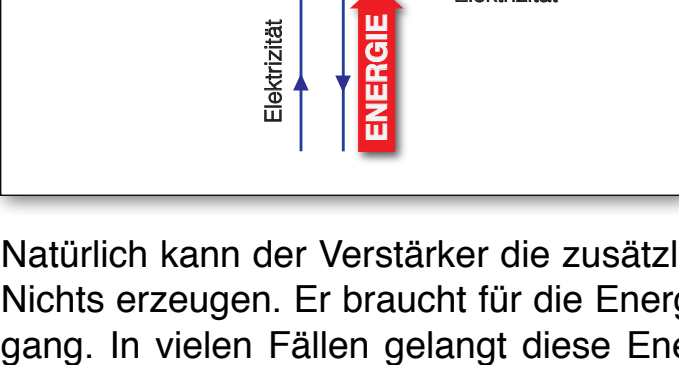


Abb. 20.3
Symbolische Darstellung eines elektrischen Verstärkers

Natürlich kann der Verstärker die zusätzliche Energie nicht aus dem Nichts erzeugen. Er braucht für die Energie noch einen zweiten Eingang. In vielen Fällen gelangt diese Energie über ein Netzkabel in den Verstärker.

In einem Verstärker wird der Energiestrom, der einen Datenstrom begleitet, vergrößert.

Am Beispiel des elektrischen Verstärkers wollen wir uns klar machen, was ein Verstärker genau tut. Wir nehmen der Einfachheit halber an, die Daten seien binär codiert. In den Verstärker hinein läuft ein „schwaches Signal“, das so aussehen könnte, wie es Abb. 20.4a zeigt. Hier ist die Energiestromstärke über der Zeit aufgetragen. Der Verstärker macht hieraus ein „starkes Signal“. Es ist wichtig, dass er zu dem Energiestrom des schwachen Signals nicht einfach einen Energiestrom konstanter Stärke hinzu*addiert*, wie es Abb. 20.4b zeigt. Das Ergebnis würde man immer noch ein schwaches Signal nennen, denn die Unterschiede zwischen den größeren und den kleineren Werten sind noch genauso schwer zu erkennen wie bei dem Signal von Abb. 20.4a. Der Verstärker muss vielmehr die Energiestromstärke mit einem möglichst großen Faktor *multiplizieren*. Das Ergebnis einer Multiplikation mit dem Faktor 8 zeigt Abb. 20.4c.

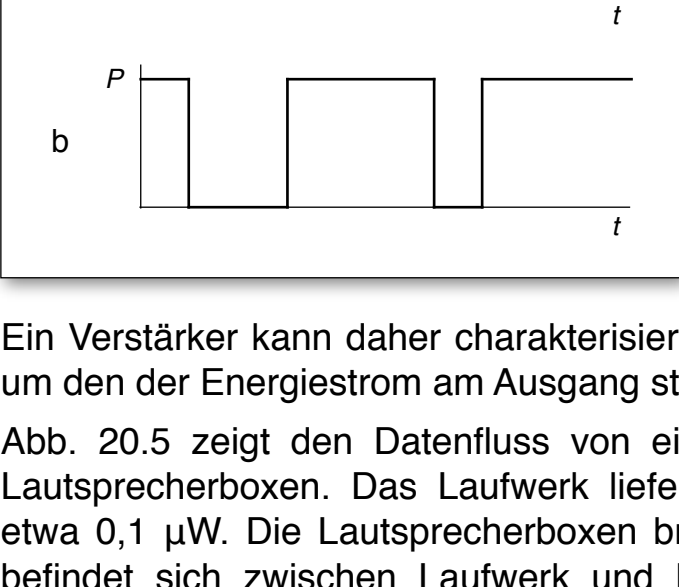


Abb. 20.4
Energiestromstärke P als Funktion der Zeit t

(a) Schwaches Signal
(b) Nach Addition eines Energiestroms konstanter Stärke ist das Signal immer noch schwach.
(c) Starkes Signal

Ein Verstärker kann daher charakterisiert werden durch den Faktor, um den der Energiestrom am Ausgang stärker ist als am Eingang.

Abb. 20.5 zeigt den Datenfluss von einem CD-Laufwerk zu den Lautsprecherboxen. Das Laufwerk liefert einen Energiestrom von etwa $0,1 \mu\text{W}$. Die Lautsprecherboxen brauchen aber 10 W . Daher befindet sich zwischen Laufwerk und Boxen ein Verstärker. Der *Verstärkungsfaktor* eines typischen Hifi-Verstärkers beträgt 10^8 .

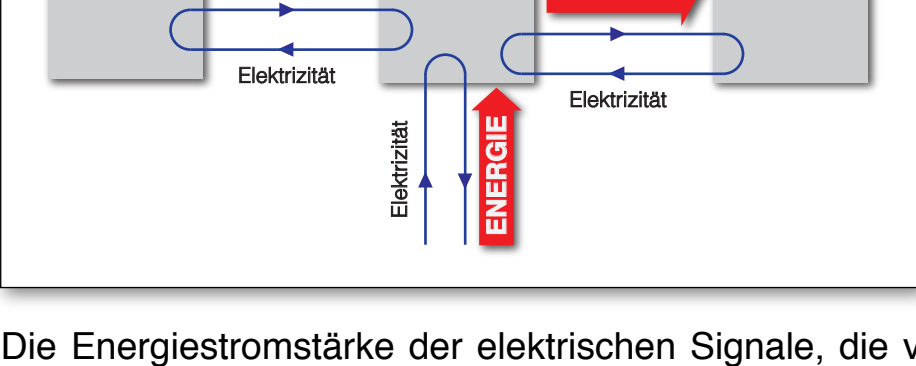


Abb. 20.5
Datenübertragung von einem CD-Laufwerk zu den Lautsprecherboxen

Die Energiestromstärke der elektrischen Signale, die von einer Radioantenne kommen, beträgt sogar nur etwa 1 pW (ein Millionstel von einem Millionstel Watt). Der Verstärkungsfaktor bei Radioempfang muss daher etwa 10^{13} betragen.

Abb. 20.6 zeigt das Flussbild eines Megafons. Die Daten gelangen mit dem Träger Schall ins Megafon hinein und kommen mit demselben Träger heraus, aber der Schall am Ausgang trägt viel mehr Energie als der am Eingang.

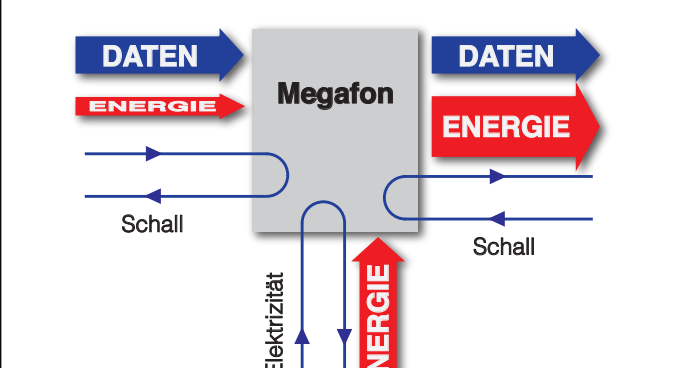


Abb. 20.6
Symbolische Darstellung eines Megafons

Einen sehr einfachen Verstärker für Binärzeichen stellt ein Relais dar, Abb. 20.7. Abb. 20.8 zeigt das entsprechende Flussbild.

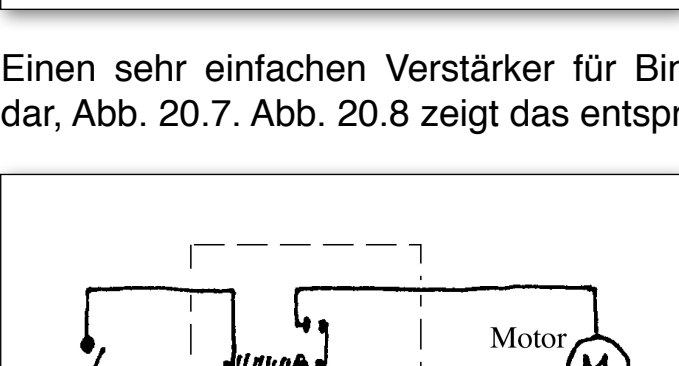


Abb. 20.7
Das Relais ist ein Verstärker für Binärzeichen.

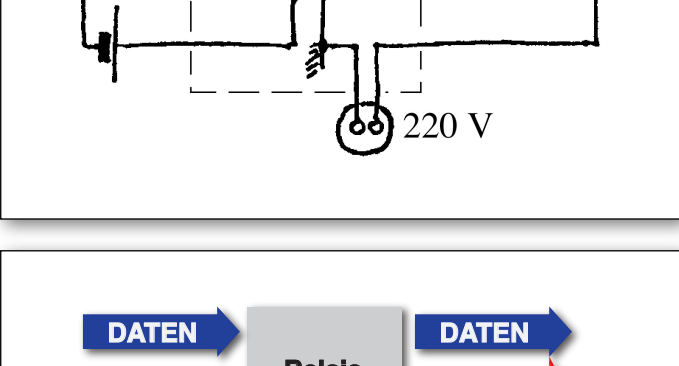


Abb. 20.8
Symbolische Darstellung eines Relais

Dieser Verstärker lässt sich leicht in einen Verstärker für optische Binärzeichen verwandeln, Abb. 20.9 und Abb. 20.10.

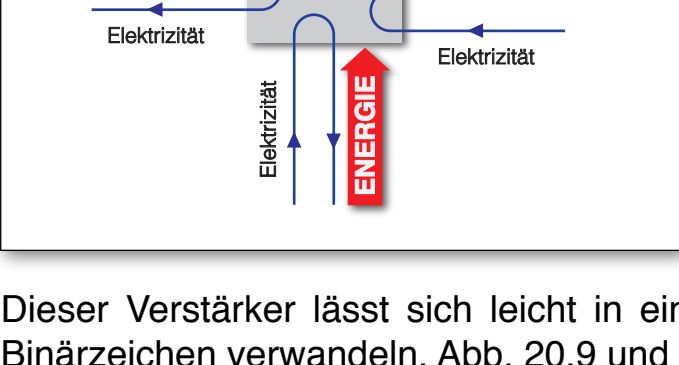


Abb. 20.9
Verstärker für optische Binärzeichen

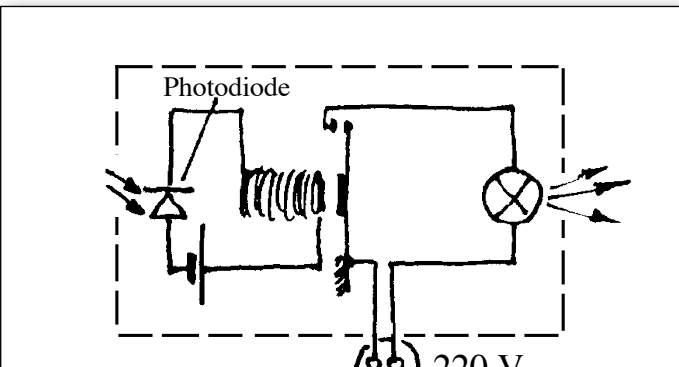


Abb. 20.10
Symbolische Darstellung des Verstärkers von Abb. 20.9

Das Fernsehprogramm kommt oft auf einem komplizierten Weg zum Zuschauer. Ein Fernsehsender hat eine Reichweite von nur etwa 50 km . Um ein Fernsehprogramm über eine größere Entfernung zu leiten, braucht man Zwischenstationen mit Verstärkern. Das sind die so genannten *Fernmeldetürme*, die man auf manchen Bergen stehen sieht. Die Daten werden vom einen zum nächsten mit gebündelten elektromagnetischen Wellen übertragen. Auf jedem Turm befindet sich eine Empfangs- und eine Sendeantenne. Zwischen Empfang und erneutem Senden werden die Signale verstärkt, Abb. 20.11. Dieselben Stationen dienen auch dazu, Telefongespräche über größere Entfernungen zu übertragen.

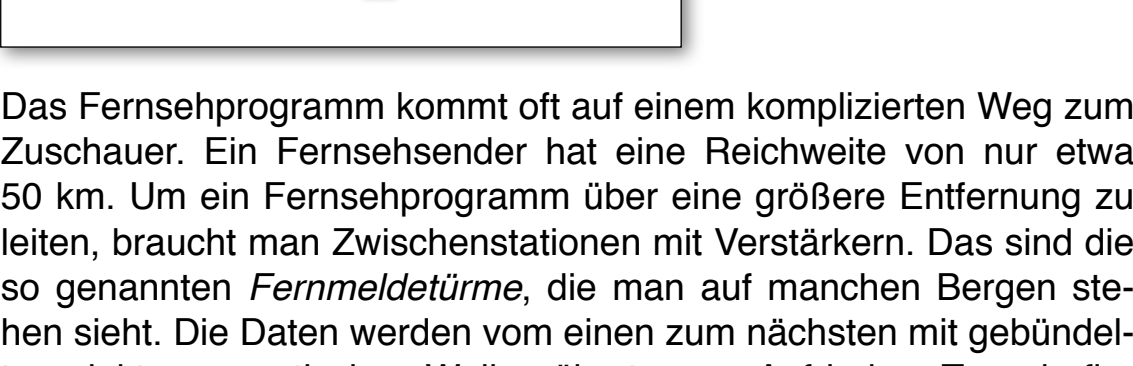


Abb. 20.11
Symbolische Darstellung der elektrischen Einrichtungen eines Fernmeldeturms

Die Türme müssen in Sichtweite voneinander stehen. Wenn über größere Entfernungen kein Turm gebaut werden kann, z. B. bei der Übertragung über den Ozean, wird die Station in einem Satelliten untergebracht.

Fernmeldetürme haben auch noch Sendeantennen für nicht gebündelte Wellen: so wird das Programm zu den einzelnen Fernsehapparaten übermittelt.

Zu diesem letzten Schritt der Verteilung, bei dem jeder Apparat die Daten über seine Empfangsantenne erhält, gibt es aber eine Konkurrenz: die Verteilung über Kabel. Beim Kabelfernsehen ist der Empfang weniger gestört, und man kann zwischen viel mehr Programmen wählen. Drahtlos kann man nicht so hohe Datenstromstärken erreichen.

Wovon hängt es ab, wie viel Energie ein Datenempfänger braucht? Wir hatten gesagt, im Empfänger muss irgendetwas ausgelöst werden. Aber könnte man nicht auch mit sehr, sehr wenig Energie etwas auslösen? Im Prinzip ja, allerdings tritt hier eine neue Schwierigkeit auf.

Neben der eigentlichen Datenquelle gibt es nämlich immer noch andere „Datenquellen“: Überall, in jeder Leitung und in jedem Umlader, entstehen unkontrollierbare Störungen. Und Störungen sind auch Daten – allerdings Daten, an denen der Empfänger nicht interessiert ist, die für ihn keinen Sinn haben. Stellt man etwa am Radioempfänger einen schwachen, d. h. weit entfernten Sender ein, so hört man neben der eigentlichen Sendung die verschiedensten Störungen. Bei einem guten Datenempfänger müssen die erwünschten Signale viel stärker sein als dieses „Rauschen“, und stärker heißt: Sie müssen mehr Energie haben.

Auf den Abbildungen 20.12a und 20.12b sind die Störungen durch die von unten kommenden Pfeile dargestellt. (Der Daten- und Energieträger wurde der Übersichtlichkeit halber weggelassen.) Abb. 20.12a zeigt eine schlechte Datenübertragung: Die erwünschten Daten haben weniger Energie als die Störungen. Die Datenübertragung von Abb. 20.12b ist besser. Die Störungen haben, verglichen mit den erwünschten Daten, wenig Energie. Der Empfänger kann darum leicht zwischen den erwünschten Daten und den Störungen unterscheiden.

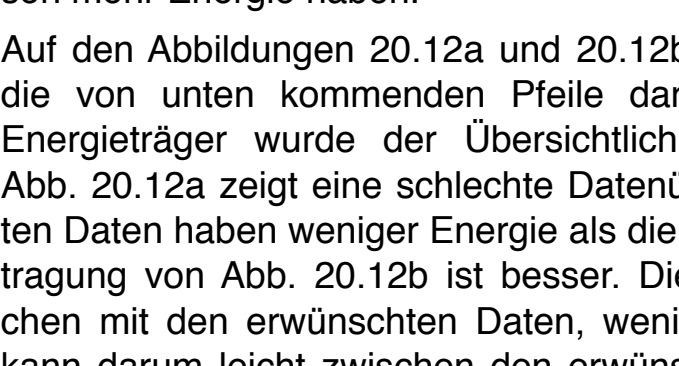


Abb. 20.12
Symbolische Darstellung einer Datenübertragung mit Störungen.

(a) Schlechte Übertragung.
(b) Bessere Übertragung

Was herauskommt, wenn der Empfänger zwischen erwünschten Daten und Störungen nicht mehr unterscheiden kann, zeigt das Spiel „Stille Post“: Mehrere Personen stellen sich in einer Reihe auf. Die erste Person in der Reihe flüstert der zweiten einen Satz zu, die zweite flüstert diesen Satz, oder das was sie davon verstanden hat, der dritten zu usw. Bei der letzten kommt dann oft etwas an, was mit dem ursprünglichen Satz nicht mehr viel zu tun hat. Hätten alle Spielteilnehmer laut gesprochen, d. h. ihre Daten mit mehr Energie versehen, so wäre der Satz wahrscheinlich unversehrt beim letzten angekommen.

Aufgaben

1. Nenne vier Beispiele für Datenübertragungen, an denen Verstärker beteiligt sind.
2. Auch ein Mensch kann die Rolle eines Verstärkers übernehmen. Nenne ein Beispiel.

20.2 Datenverarbeitung

Wir hatten den Transport und die Speicherung von Daten untersucht. Wir wenden uns nun der Datenverarbeitung zu. Datenverarbeitung findet in natürlichen und in technischen Systemen statt. Ein natürliches System, in dem Daten verarbeitet werden, ist das Gehirn von Mensch und Tier, ein technisches ist der Computer. Datenverarbeitende Systeme haben eine hierarchische Struktur. Man kann ihre Funktionsweise auf den verschiedenen Ebenen der Hierarchie beschreiben.

Die Grobstruktur datenverarbeitender Systeme

Eine Computeranlage besteht aus den folgenden großen Baueinheiten: 1. dem Computer selbst, 2. mehreren Ein- und Ausgabegeräten und 3. mehreren Speichern.

Ein Eingabegerät dient dazu, ankommende Daten für den Computer aufzubereiten, d. h. die Daten von dem Träger, mit dem sie ankommen, auf den Träger Elektrizität umzuladen und so zu codieren, dass der Computer etwas mit ihnen anfangen kann.

Das Datenausgabegerät codiert die Daten, die der Computer abgibt so, dass der Benutzer etwas mit ihnen anfangen kann. „Benutzer“ kann hier auch eine Maschine sein, die vom Computer gesteuert wird.

Es gibt eine ganze Reihe verschiedener Ein- und Ausgabegeräte, Tabelle 20.1. Die meisten davon wirst du kennen.

Eingabegeräte
Tastatur
Touchscreen
Scanner
Maus
Digitalkamera
Mikrofon
verschiedene Sensoren
Ausgabegeräte
Bildschirm
Drucker
Lautsprecher
verschiedene Effektoren

Tabelle 20.1
Ein- und Ausgabegeräte des Computers

Viele Computer dienen der Steuerung von industriellen Prozessen, z. B. in einer chemischen Fabrik oder in einem Kraftwerk. Solche Computer haben als Eingabegeräte so genannte *Sensoren*. Ein Sensor ist ein Gerät, das irgendeine physikalische Größe misst, z. B. die Temperatur, den Druck oder die Konzentration eines Stoffes, und die Messdaten mit dem Träger Elektrizität weitergibt. Der Computer berechnet aus diesen Messwerten, ob und wie der Prozess beeinflusst werden soll. Er gibt die Daten, die das Ergebnis seiner Rechnungen darstellen, an Ausgabegeräte weiter, die man *Effektoren* nennt. Effektoren sind z. B. elektrisch gesteuerte Ventile oder elektrisch gesteuerte Schalter, mit denen Pumpen, Gebläse, Heizungen oder Ähnliches ein- und ausgeschaltet werden können, um den in der Fabrik ablaufenden Prozess zu beeinflussen.

Die Struktur natürlicher datenverarbeitender Systeme ist ganz ähnlich. Dem Computer entspricht das Gehirn, den Eingabegeräten entsprechen die Sinnesorgane und als Ausgabegerät fungiert z. B. die Stimme oder die schreibende Hand.

Die unteren Ebenen datenverarbeitender Systeme

Wir fahren mit der Beschreibung datenverarbeitender Systeme auf einer sehr viel tieferen Ebene fort. Die Strukturen, um die es hier geht, sind so klein, dass man sie nur noch mit einem Mikroskop erkennen kann.

Beim Computer befinden sich auf dieser Ebene die elektronischen Bauelemente. Unter ihnen ist der Transistor das wichtigste. Die Funktionsweise des Transistors wirst du später kennen lernen. Wir erwähnen hier nur, dass ein Transistor ein elektrisch gesteuerter Schalter ist. Er tut also dasselbe wie ein Relais – nur sehr viel schneller.

Die gesamte Datenverarbeitung in einem Computer lässt sich auf das Öffnen und Schließen solcher „Schalter“ zurückführen. Da ein Schalter entweder offen oder geschlossen ist, sich also nur in einem von zwei Zuständen befinden kann, muss die Datenverarbeitung im Computer mit binär codierten Daten geschehen.

Die Beschreibung des Computers, die wir hier geben, entspricht den Geräten, die man heutzutage baut. Computer könnten aber auch ganz anders gebaut sein.

Die alten Rechenmaschinen, die ja auch schon eine primitive Art Computer darstellten, arbeiteten rein mechanisch. Später wurden Relais' als Schalter verwendet. Die heutigen elektronischen Computer haben gegenüber diesen elektromechanischen Maschinen große Vorteile: Ein Transistor ist sehr viel kleiner und sehr viel billiger als ein Relais; er ist außerdem viel zuverlässiger und er arbeitet viel schneller. Dass der elektronische Computer so viele Vorzüge hat, bedeutet aber nicht, dass es nicht ganz anders funktionierende Computer geben könnte, die noch leistungsfähiger wären. So arbeitet man an der Entwicklung optischer Computer, von denen man erwartet, dass sie noch schneller sind als die gegenwärtigen elektronischen Geräte. Datenträger ist hier nicht die Elektrizität, sondern das Licht.

Auch das Gehirn besteht aus vielen, sehr kleinen Bauelementen, von denen sich jedes in einem von zwei Zuständen befinden kann. Dies sind die Nervenzellen oder *Neuronen*. Die Zahl der Neuronen im Gehirn beträgt etwa 10^{10} . Das ist viel mehr als ein Computer Transistoren hat. Außerdem ist eine Nervenzelle ein wesentlich komplizierteres Bauelement als ein Transistor. Ein Neuron hat etwa 10 000 Eingänge, aber nur einen einzigen Ausgang, Abb. 20.13. Die Ausgangsleitung verzweigt sich sehr stark und ist mit den Eingängen anderer Nervenzellen verbunden. Man nennt eine solche Struktur ein *neuronaies Netz*.

Jeder Eingang einer Nervenzelle kann sich auf einem hohen oder niedrigen elektrischen Potential befinden. Es hängt von der Zahl der Eingänge ab, die auf hohem Potential liegen, ob sich der Ausgang der Nervenzelle auf hohem oder niedrigem Potential befindet.

Computerprogramme

Man kann sich leicht eine datenverarbeitende Maschine vorstellen, die nur einen einzigen Aufgabentyp bewältigen kann. Eine solche Maschine wäre sehr unpraktisch. Für jede neue Aufgabe müsste man ein neues Gerät bauen. Mit einem Computer kann man aber sehr viele verschiedene Aufgaben lösen. Selbst beim Taschenrechner hat man schon die Möglichkeit, zwischen mehreren Aufgaben durch Drücken der geeigneten Taste zu wählen: Addieren, Subtrahieren, Multiplizieren, Dividieren, Wurzelziehen etc. Bei richtigen Computern besteht diese Möglichkeit in noch viel größerem Ausmaß. Wenn man ihn programmiert, erteilt man ihm *Anweisungen*. Eine Anweisung kann den Computer z. B. dazu veranlassen, eine bestimmte Rechenoperation auszuführen, einen Zahlenwert aus dem externen Speicher zu lesen, einen Buchstaben auf den Bildschirm zu schreiben usw.

Datenreduktion

Eine Datenverarbeitungsanlage nimmt Daten auf und gibt Daten ab. Dasselbe trifft aber auch für Datenumlader und Codierer zu. Bedeutet das, dass ein Computer im Grunde nicht mehr ist als ein Codierer? Dass die Daten am Eingang dieselbe Information enthalten wie am Ausgang, nur anders verschlüsselt? Wäre das der Fall, so müsste die Datenmenge der aufgenommenen Daten genauso groß sein wie die der abgegebenen. Wir wollen untersuchen, ob das zutrifft. Wir betrachten zu diesem Zweck ein einfaches Beispiel.

Ein Computer sei so programmiert, dass er den Mittelwert von Zahlen berechnen kann. Der Einfachheit halber nehmen wir an, dass die einzugebenden Zahlen ganze Zahlen sind, und dass der Mittelwert ohne Stellen hinter dem Komma berechnet wird.

Wir lassen den Computer den Notenmittelwert einer Klassenarbeit berechnen. Wir nehmen an, die Klasse habe 30 Schüler und bei der Arbeit seien maximal 15 Punkte zu erreichen gewesen. In den Computer werden also 30 Zahlen eingetippt, von denen jede eine der 16 verschiedenen ganzen Zahlen von 0 bis 15 ist. Da $16 = 2^4$ ist, bekommt der Computer mit jeder Zahl 4 bit, zusammen also $30 \cdot 4 \text{ bit} = 120 \text{ bit}$.

Man startet nun das Programm, und der Computer gibt kurz darauf den Mittelwert aus: eine einzige der Zahlen von 0 bis 15. Die Datenmenge am Ausgang beträgt damit nur 4 bit, Abb. 20.14. Der Computer hat also die Datenmenge vermindert oder „reduziert“.

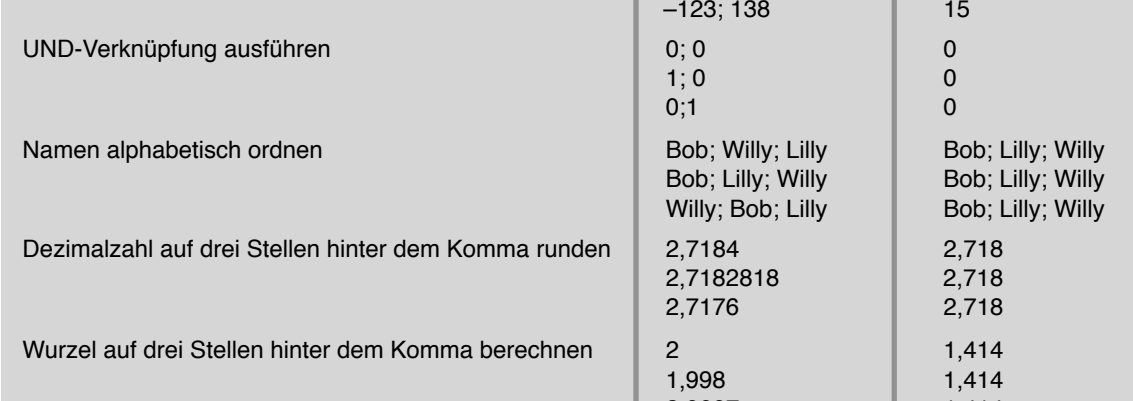


Abb. 20.14
Die Menge der Daten, die in den Computer hineingehen, ist größer als die Menge der Daten, die herauskommen.

Das ist überraschend. Heißt das denn, dass jemand, der die Daten vom Ausgang bekommt, weniger weiß, als jemand, der die Daten des Eingangs bekommt? Ja, genau das heißt es. Derjenige, der nur den Mittelwert kennt, kann daraus die Einzelpunktzahlen der Schüler nicht rekonstruieren. Aber ist das nicht schlecht? Wozu benutzt man denn den Computer überhaupt? Man benutzt ihn gerade deshalb, weil man mit den vielen Daten am Eingang nicht zurechtkommt. Wenn es einem z. B. darum geht, die Schulklasse als Ganzes mit einer Parallelklasse zu vergleichen, so ist einem die Datenmenge am Eingang des Rechners zu groß. Bei großen Datenmengen verliert der Mensch leicht die Übersicht, er kann die Daten nicht bewältigen. Er benutzt also den Computer nicht, weil er zu wenige, sondern weil er zu viele Daten hat.

Dass die Datenmenge bei der Verarbeitung im Computer abnimmt, erkennt man daran, dass man die Eingangsdaten aus den Ausgangsdaten nicht wiedergewinnen kann, auch wenn man das Computerprogramm genau kennt. Man kann dieselben Daten am Ausgang durch unterschiedliche Daten am Eingang erzeugen. Tabelle 20.2 zeigt dafür einige Beispiele. In der linken Spalte ist beschrieben, was der programmierte Computer tut. In der mittleren Spalte stehen Beispiele für Daten, die man eingibt, und in der rechten Spalte stehen die Daten, die am Ausgang erscheinen.

Was der programmierte Computer tut	Eingabedaten	Ausgabedaten
positive und negative Zahlen addieren	10; 5 5; 10 14; 1 -123; 138	15 15 15 15
UND-Verknüpfung ausführen	0; 0 1; 0 0; 1	0 0 0
Namen alphabetisch ordnen	Bob; Willy; Lilly Bob; Willy; Willy Willy; Bob; Lilly	Bob; Lilly; Willy Bob; Lilly; Willy Bob; Lilly; Willy
Dezimalzahl auf drei Stellen hinter dem Komma runden	2,7184 2,7182818 2,7176	2,718 2,718 2,718
Wurzel auf drei Stellen hinter dem Komma berechnen	2 1,998 2,0007	1,414 1,414 1,414

Tabelle 20.2
Die Datenmenge am Ausgang des Computers ist kleiner als die am Eingang.

Die beiden letzten Beispiele zeigen, dass schon durch Runden ein Datenverlust entsteht.

In einigen Fällen ist die Datenmenge am Ausgang genauso groß wie am Eingang, d. h. man kann die Eingangsdaten aus den Ausgangsdaten zurückgewinnen. Ein sehr einfaches Beispiel hierfür ist die Vorzeichenumkehr. Aber auch jeder Codierer hat diese Eigenschaft. Wird der Computer nur dazu benutzt, Daten zu speichern, so findet natürlich auch keine Datenreduktion statt.

Wir machen die Datenbilanz noch für ein komplizierteres Beispiel. Der Computer soll diesmal zur Bilderkennung verwendet werden, Abb. 20.15. Eingabegerät ist eine Digitalkamera, Ausgabegerät ein Drucker. Im Idealfall geht der Vorgang der Bilderkennung so vor sich: Man richtet die Kamera auf den zu erkennenden Gegenstand, z. B. eine Rose, man startet das Programm und kurz darauf druckt der Drucker das Wort „Rose“. Praktisch verwendet man das Verfahren etwa zum Lesen von Handschriften oder zum Erkennen von Fingerabdrücken.

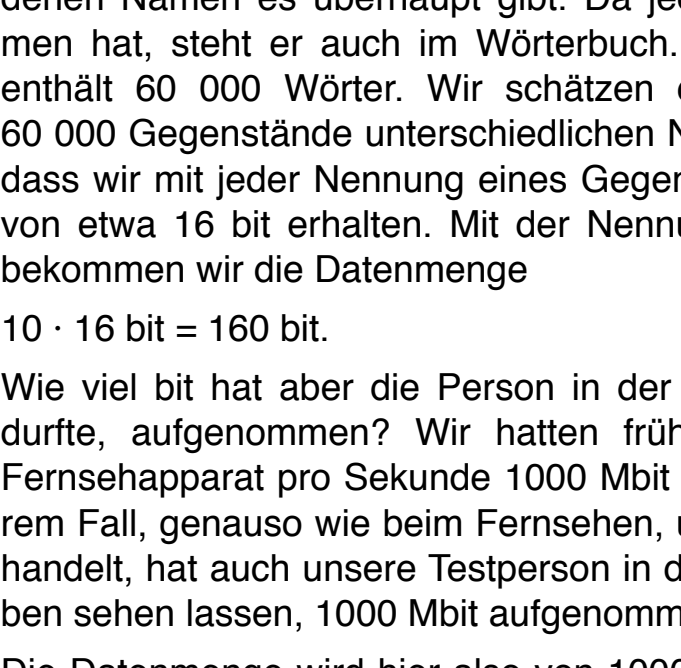


Abb. 20.15
Die Bilderkennungsanlage besteht aus Digitalkamera, Computer und Drucker.

Wir nehmen an, auf einem Blatt Papier befinde sich eine Sieben. Die Sieben kann sehr verschieden aussehen, Abb. 20.16. Wie immer sie aber aussieht, der Drucker druckt stets dasselbe: eine ganz gewöhnliche Sieben aus seinem eigenen Zeichensatz. Am Eingang kann also eines von sehr vielen verschiedenen Bildern stehen, nämlich jede denkbare Sieben, am Ausgang erscheint immer dasselbe Bild.

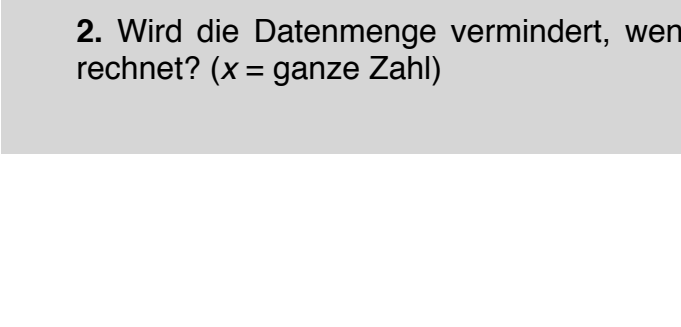


Abb. 20.16
Jedes dieser Zeichen soll der Computer als „Sieben“ erkennen.

Um welchen Betrag wird die Datenmenge in diesem Fall reduziert? Wir hatten früher berechnet, dass ein Bild 50 Mbit enthält. Der Computer bekommt daher von der Kamera 50 Mbit.

Der Drucker bekommt vom Computer die Anweisung, ein Schriftzeichen zu drucken. Ein Schriftzeichen trägt, wie wir auch früher festgestellt hatten, 7 bit.

Der Computer reduziert hier also die Datenmenge von 50 Mbit auf 7 bit.

Was diese Bilderkennungsanlage leistet, tut unser Gehirn Sekunde für Sekunde: Die optische und akustische Wahrnehmung unserer Umgebung beruht auf Datenreduktion. Man kann sich das folgendermaßen klar machen:

Wir verbinden einer Person die Augen, führen sie in eine ihr unbekannte Umgebung, entfernen die Augenbinde für genau eine Sekunde und führen sie dann wieder zurück in die alte Umgebung. Wir fragen sie dann, welche Gegenstände sie gesehen hat. Sie wird uns wahrscheinlich nicht mehr als 10 Gegenstände nennen können. Wie viel bit gibt sie mit dem Benennen dieser 10 Gegenstände von sich?

Um die Datenmenge zu erhalten, die der Name eines Gegenstandes trägt, müssen wir wissen, wie viele Gegenstände mit verschiedenen Namen es überhaupt gibt. Da jeder Gegenstand einen Namen hat, steht er auch im Wörterbuch. Ein typisches Wörterbuch enthält 60 000 Wörter. Wir schätzen daher großzügig, dass es 60 000 Gegenstände unterschiedlichen Namens gibt. Das bedeutet, dass wir mit jeder Nennung eines Gegenstandes eine Datenmenge von etwa 16 bit erhalten. Mit der Nennung von 10 Gegenständen bekommen wir die Datenmenge

$$10 \cdot 16 \text{ bit} = 160 \text{ bit}.$$

Wie viel bit hat aber die Person in der Sekunde, die sie schauen durfte, aufgenommen? Wir hatten früher abgeschätzt, dass ein Fernsehapparat pro Sekunde 1000 Mbit abgibt. Da es sich in unserem Fall, genauso wie beim Fernsehen, um optische Wahrnehmung handelt, hat auch unsere Testperson in der Sekunde, die wir sie haben sehen lassen, 1000 Mbit aufgenommen.

Die Datenmenge wird hier also von 1000 Mbit auf 160 bit reduziert. Auch in Auge und Gehirn des Menschen findet somit eine gewaltige Datenreduktion statt, und man erkennt, dass diese der wesentliche Bestandteil dessen ist, was man Wahrnehmung nennt.

Wahrnehmung beruht auf Datenreduktion.

Den riesigen Datenstrom, der durch die Pupillen in die Augen gelangt, könnte das Gehirn ohne Reduktion nicht weiterverarbeiten.

Aufgaben

- Begründe, weshalb der Computer eine Datenreduktion durchführt, wenn er so programmiert ist, dass er zu jeder eingegebenen ganzen Zahl x den Wert von x^2 berechnet und am Bildschirm anzeigt.
- Wird die Datenmenge vermindert, wenn man den Wert von x^3 berechnet? (x = ganze Zahl)

20.3 Verallgemeinerung der Definition der Datenmenge

Abb. 20.17 zeigt drei Beispiele für Datenübertragungen zwischen einer Person A (der Quelle) und einer Person B (dem Empfänger). Die drei Beispiele unterscheiden sich im Zeichenvorrat. Im Fall (a) stehen 2 Zeichen zur Verfügung, nämlich grünes Licht und rotes Licht. Im Fall (b) sind es 8 Zeichen, nämlich die Ziffern 1 bis 8, und im Fall (c) sind es 32 Zeichen: 26 Großbuchstaben und 6 Satzzeichen. Wir stellen uns nun die Frage, wie schwer es für den jeweiligen Empfänger B ist, das nächste Zeichen zu erraten, noch ehe es bei ihm eingetroffen ist.

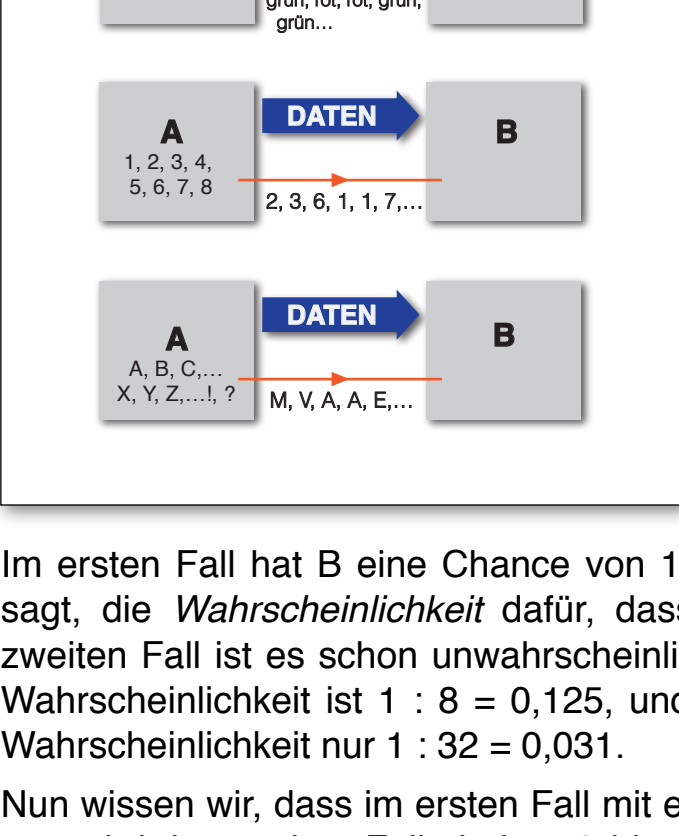


Abb. 20.17
Drei Datenübertragungen mit unterschiedlichem Zeichenvorrat

Im ersten Fall hat B eine Chance von $1 : 2$, richtig zu tippen. Man sagt, die *Wahrscheinlichkeit* dafür, dass B richtig rät, ist 0,5. Im zweiten Fall ist es schon unwahrscheinlicher, dass B richtig rät, die Wahrscheinlichkeit ist $1 : 8 = 0,125$, und im dritten Fall beträgt die Wahrscheinlichkeit nur $1 : 32 = 0,031$.

Nun wissen wir, dass im ersten Fall mit einem Zeichen 1 bit übertragen wird, im zweiten Fall sind es 3 bit und im dritten 5 bit pro Zeichen. Wir haben damit die Regel:

Je leichter es für den Empfänger ist, ein Zeichen vorauszusagen, desto weniger bit trägt das Zeichen.

Wir brauchen dieses Ergebnis für die Analyse des folgenden Ratespiels.

Willy denkt sich eine der ganzen Zahlen von 1 bis 64. Bob soll die Zahl herausfinden, indem er möglichst wenige Ja-Nein-Fragen an Willy stellt.

Wir nehmen an, Willy denkt sich die 28. Bob kann nun verschiedene Ratestrategien anwenden. Wir wollen zwei solche Strategien miteinander vergleichen.

1. Strategie

B: Ist es die 1?

W: Nein.

B: Ist es die 2?

W: Nein.

B: Ist es die 3?

W: Nein.

...

B: Ist es die 28?

W: Ja.

Bob hat 28 Fragen gebraucht, um die Zahl herauszubekommen.

2. Strategie

B: Ist die Zahl größer als 32?

W: Nein.

B: Ist die Zahl größer als 16?

W: Ja.

B: Ist die Zahl größer als 24?

W: Ja.

B: Ist die Zahl größer als 28?

W: Nein.

B: Ist die Zahl größer als 26?

W: Ja.

B: Ist die Zahl größer als 27?

W: Ja.

Bob kennt die Zahl, nachdem er 6 Fragen gestellt hat.

Dieses Beispiel stellt uns vor ein Problem. Wir hatten früher das Bit folgendermaßen definiert: Ein bit ist die Datenmenge, die mit der Antwort auf eine Ja-Nein-Frage übertragen wird. Wie viel bit hat nun Bob bekommen? 28 oder 6? Die Datenmenge, die insgesamt übertragen wurde, kann ja nicht davon abhängen, ob sich die Partner bei der Übertragung dumm oder klug anstellen. Welches auch immer die Strategie ist – am Ende weiß Bob die Zahl, d. h. die Daten sind bei ihm angekommen.

Wie viel bit Bob wirklich bekommen hat, können wir auch auf einem anderen, sichereren Weg entscheiden: Willy hätte ja Bob die Zahl auch einfach nennen können. In diesem Fall ist es leicht, die Bit-Zahl anzugeben: Die Zahl stellt eine Auswahl aus einem Zeichenvorrat von 64 Zeichen dar. Da $64 = 2^6$ ist, trägt die Zahl 6 bit. Bob muss also auch beim Ratespiel insgesamt 6 bit bekommen. Das bedeutet aber, dass er bei Verwendung der ersten Strategie pro Ja-Nein-Frage weniger als 1 bit bekommt.

Dass Bob bei der schlechten Strategie pro Antwort weniger bit bekommt als bei der guten, stimmt auch mit der Regel überein, die wir am Anfang dieses Abschnitts gefunden hatten: „Je leichter es für den Empfänger ist, ein Zeichen vorauszusagen, desto weniger bit trägt das Zeichen.“ Tatsächlich hat Bob bei der schlechten Strategie eine große Chance, die richtige Antwort vorauszusagen. Er weiß nämlich, dass auf die Frage „Ist es die 1?“ mit großer Wahrscheinlichkeit die Antwort „Nein“ kommt. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass er sich irrt, beträgt nur $1 : 64$, die Wahrscheinlichkeit dafür, dass er Recht hat $63 : 64$. Bei der guten Strategie ist seine Unsicherheit über die nächste Antwort viel größer. Egal ob er annimmt, die nächste Antwort sei „ja“ oder „nein“, die Wahrscheinlichkeit dafür, dass er Recht hat, ist nur $1 : 2$.

Wir schließen aus dem Vergleich der beiden Strategien, dass man mit der Antwort auf eine Ja-Nein-Frage nur dann 1 bit erhält, wenn die beiden Antworten gleich wahrscheinlich sind.

Das Entsprechende gilt, wenn der Zeichenvorrat größer ist, wenn man also keine Binärzeichen mehr verwendet. Enthält der Zeichenvorrat 4 Zeichen, so trägt eines dieser Zeichen nur dann 2 bit, wenn alle 4 Zeichen gleich wahrscheinlich sind. Bei einem Zeichenvorrat von 8 Zeichen trägt jedes Zeichen nur dann 3 bit, wenn alle 8 Zeichen gleich wahrscheinlich sind.

Mit einem Binärzeichen wird nur dann 1 bit übertragen, wenn die beiden Zeichen des Zeichenvorrats gleich wahrscheinlich sind. In allen anderen Fällen wird weniger als 1 bit übertragen.

Wir hatten früher einmal berechnet, dass mit einem Schriftzeichen knapp 7 bit übertragen werden. Wir hatten dabei stillschweigend vorausgesetzt, dass alle Schriftzeichen gleich wahrscheinlich sind. Tatsächlich sind in einem gewöhnlichen Text die Schriftzeichen nicht gleich wahrscheinlich. So tritt ein „e“, ein „t“ oder das Leerzeichen häufiger auf als das „q“, das „x“ oder das Ausrufezeichen. Daraus folgt, dass wir die Bit-Zahl pro Schriftzeichen überschätzt hatten.

Immer wenn man Nachrichten mit einem Zeichensatz überträgt, dessen Zeichen nicht gleich wahrscheinlich sind, sagt man, der entsprechende Code sei *redundant*.

Man kann z. B. den folgenden, stark redundanten Code vereinbaren. Eine Nachricht wird mit Schriftzeichen übertragen, aber jeder Buchstabe wird zweimal nacheinander übertragen. Das Wort „Baum“ sieht dann so aus: „BBaauumm“. Nachdem das erste B beim Empfänger angekommen ist, sind die verschiedenen Schriftzeichen sehr ungleich wahrscheinlich: Es kommt als nächstes Zeichen sicher kein a, kein A, kein b, kein c, kein C etc. Der Empfänger weiß genau, dass noch ein B kommen wird. Genauso weiß er, nachdem das erste a angekommen ist, dass der nächste Buchstabe wieder ein a ist.

Redundanz erhöht den Aufwand bei der Übertragung, die Übertragung dauert länger. Trotzdem ist das Vorhandensein von Redundanz oft erwünscht, denn bei einem redundanten Code ist die Nachricht weniger anfällig gegen Störungen auf dem Übertragungsweg. Auch wenn bei der Zeichenfolge BBaauumm ein paar Zeichen verloren gehen, so dass z. B. nur noch B aa umm ankommt, ist das Wort beim Empfänger noch zu erkennen.

Fußball und Zahlenlotto

Willy und Lilly haben wieder einmal eine Datenübertragung mit roten und grünen Lichtzeichen geplant. Lilly soll Willy mitteilen

– um 10:00 h, ob der HSV gewonnen hat (gewonnen: „grün“, verloren oder unentschieden: „rot“);

– um 10:05 h, ob Willy im Lotto sechs Richtige hat (gewonnen: „grün“, nicht gewonnen: „rot“).

Bei welcher der beiden Datenübertragungen ist die übertragene Datenmenge größer? Wir benutzen zur Beantwortung dieser Frage die Regel: „Je leichter es für den Empfänger ist, ein Zeichen vorauszusagen, desto weniger bit trägt das Zeichen.“

Bei der ersten Übertragung ist es schwer vorauszusagen, ob „rot“ oder „grün“ kommen wird: Der HSV hat eine gute Chance zu gewinnen, aber sein Gegner ist auch recht stark. Im zweiten Fall dagegen ist Willy ziemlich sicher, dass sein Spiel so ausgeht, wie es bisher immer ausgegangen ist: Er wird keine sechs Richtigen haben. Die übertragene Datenmenge ist also im ersten Fall größer als im zweiten.

Mit unserer verbesserten Definition der Datenmenge kommen wir zu demselben Ergebnis: Wir nehmen an, dass die Wahrscheinlichkeit dafür, dass der HSV gewinnt, gerade gleich 0,5 ist. Ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das erste Zeichen „grün“ ist, ist also genauso groß wie die, dass es „rot“ ist. Mit dem ersten Zeichen wird daher, nach unserer verbesserten Definition, genau 1 bit übertragen. Bei der zweiten Übertragung dagegen sind die Wahrscheinlichkeiten für „grün“ und „rot“ sehr unterschiedlich: „rot“ ist viel wahrscheinlicher als „grün“. Es wird daher weniger als 1 bit übertragen.

Die beste Wägestrategie

Unter 27 gleich aussehenden Kugeln befindet sich eine, die schwerer ist als die 26 anderen, gleich schweren. Mit Hilfe einer Balkenwaage soll mit möglichst wenigen Wägungen herausgefunden werden, welches die schwerere Kugel ist. Dabei dürfen nur Kugeln auf die Waagschalen gelegt werden, keine Gewichtsstücke oder sonstigen anderen Körper, Abb. 20.18.

Mit jeder Wägung beantwortet die Waage eine Frage, die man ihr stellt. Die Waage kann drei verschiedene Antworten geben: 1. Die rechte Waagschale geht nach unten, 2. die linke Waagschale geht nach unten und 3. Gleichgewicht.

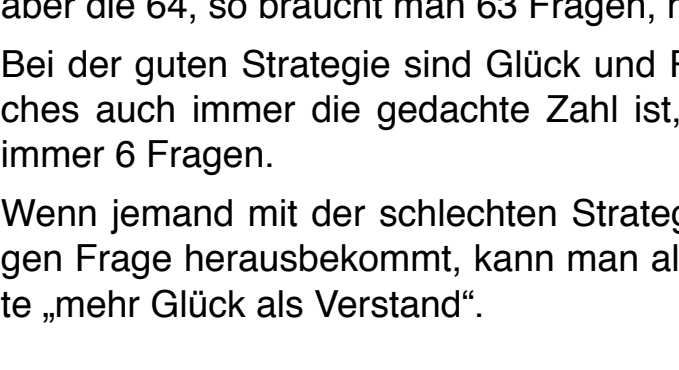


Abb. 20.18
Wie viele Wägungen muss man machen, um die schwerere Kugel zu identifizieren?

Wenn man mit möglichst wenigen Wägungen auskommen will, muss man so stellen, dass man möglichst viele bit pro Wägung erhält. Das bedeutet: Die drei Antworten müssen bei jeder Wägung möglichst gleich wahrscheinlich sein. Es ist sicher ungeschickt, damit anzufangen, dass man auf jede Waagschale eine Kugel legt. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Waage im Gleichgewicht bleibt, ist dann viel größer als die, dass sie sich nach rechts oder nach links neigt.

Wie viele Wägungen sind notwendig?

Welches ist die beste Strategie?

Glück und Pech

Wir vergleichen noch einmal die beiden Strategien für das Erraten einer Zahl von 1 bis 64, die wir am Anfang des Abschnitts untersucht hatten. Die schlechte Strategie beginnt mit der Frage „Ist es die 1?“. Man sieht, dass man hier Glück oder Pech haben kann. Ist die gedachte Zahl tatsächlich die 1, so hat man sie mit einer einzigen Frage herausbekommen, man hat Glück gehabt. Ist die gedachte Zahl aber die 64, so braucht man 63 Fragen, man hat Pech gehabt.

Bei der guten Strategie sind Glück und Pech ausgeschlossen. Welches auch immer die gedachte Zahl ist, man braucht zum Erraten immer 6 Fragen.

Wenn jemand mit der schlechten Strategie die Zahl mit einer einzigen Frage herausbekommt, kann man also mit Recht sagen, er hatte „mehr Glück als Verstand“.

Musik und Datenmenge

Wenn ein Musikstück gespielt und gehört wird, werden Daten übertragen. Der Spieler mit dem Instrument ist die Quelle, der Hörer der Empfänger.

Wir nehmen an, das Instrument sei ein Xylophon mit 15 Tönen. Es sollen nur Viertelnoten angeschlagen werden, wobei eine Viertelpause auch als Ton zählt. Werden alle Töne mit gleicher Wahrscheinlichkeit angeschlagen, so trägt jeder Ton 4 bit, andernfalls weniger.

Während man Musik hört, hat man eine bestimmte Erwartung darüber, welches wohl der nächste Ton sein wird. Bei einer Melodie, die so anfängt, wie es Abb. 20.19 zeigt, erwartet man vielleicht, dass der nächste Ton ein c¹ ist. Es ist unwahrscheinlich, dass z. B. ein f¹ oder ein h¹ folgt.

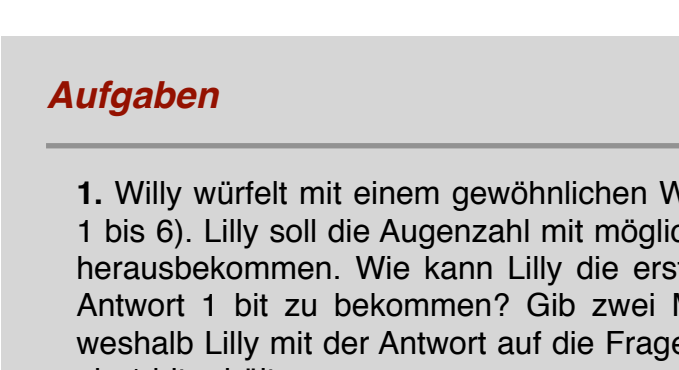


Abb. 20.19
Welches ist der nächste Ton?

Man kann nun feststellen, dass man ein Musikstück als unschön empfindet,

– wenn die Erwartung zu oft enttäuscht wird;

– wenn die Erwartung zu oft erfüllt wird.

Wenn die Melodie nie so weitergeht wie man es erwartet, erscheint sie uns als chaotisch, oder „unverständlich“. Dieser Fall liegt vor, wenn jeder Ton gleich wahrscheinlich ist, wenn also die Töne die maximale Bit-Zahl tragen.

Geht dagegen die Tonfolge sehr oft so weiter wie man erwartet, so empfindet man sie als langweilig. In diesem Fall bekommt man mit jedem neuen Ton wenig bit, man kann ihn ja leicht im Voraus erraten.

Wir haben damit eine Regel für das Komponieren gefunden: Die Datenmenge darf nicht zu groß und nicht zu klein sein.

Die historische Entwicklung der Musik verlief so, dass die Datenmenge ständig zugenommen hat. Das erklärt, warum man die jeweils moderne Musik stets als schwerer verständlich empfunden hat, als die alte.

Aufgaben

- Willy würfelt mit einem gewöhnlichen Würfel (d. h. Augenzahlen von 1 bis 6). Lilly soll die Augenzahl mit möglichst wenigen Ja-Nein-Fragen herausbekommen. Wie kann Lilly die erste Frage stellen, um mit der Antwort 1 bit zu bekommen? Gib zwei Möglichkeiten an. Begründe, weshalb Lilly mit der Antwort auf die Frage „Ist es die Sechs?“ weniger als 1 bit erhält.
- Ein Skatspiel besteht aus 32 verschiedenen Karten. Welches ist die Minimalzahl an Ja-Nein-Fragen, die man stellen muss, um eine willkürlich herausgegriffene Karte mit Sicherheit zu erraten?
- Lilly denkt sich irgendeinen Begriff. Willy muss den Begriff herausfinden, indem er Ja-Nein-Fragen an Lilly stellt, und zwar so wenige Fragen wie möglich. Welche Strategie muss Willy verfolgen? Wie viele Fragen sind bei dieser Strategie ungefähr notwendig?

21

Das Licht

21.1 Lichtquellen

Gegenstände, die Licht aussenden, nennt man *Lichtquellen*. Zu ihnen gehören:

- die Sonne und die anderen Fixsterne;
- der Glühdraht einer Glühlampe;
- die Leuchtröhre;
- die Flamme einer Kerze;
- die Leuchtdiode;
- der Bildschirm des Fernsehers;
- der Laser.

Man kann einen Gegenstand dadurch zum Leuchten bringen, dass man ihn erhitzt. Jeder Gegenstand, jeder Stoff beginnt zu leuchten, wenn seine Temperatur über etwa 800°C ansteigt. Einige der aufgezählten Lichtquellen beruhen auf diesem Prinzip: Sonne, Fixsterne und Glühlampen. Auch die Kerzenflamme leuchtet nur deshalb, weil sich in der Flamme sehr kleine glühende Kohlenstoffpartikel befinden.

Man kann aber auch Licht erzeugen, ohne etwas zu erhitzen: Die Leuchtröhre, die Leuchtdiode, der Fernsehbildschirm und der Laser sind kalte Lichtquellen.

Nicht jeder Gegenstand, von dem Licht ausgeht, ist eine Lichtquelle. Viele Körper geben nur deshalb Licht ab, weil sie Licht empfangen. Sie werfen das ankommende Licht, oder einen Teil davon, einfach zurück. Die meisten Körper, die uns umgeben, gehören in diese Kategorie. Insbesondere gibt es auch einige gut sichtbare Himmelskörper, die nicht selbst leuchten, die nur das Licht zurückwerfen, das sie von der Sonne bekommen: der Mond und die Planeten.

21.2 Einige Eigenschaften des Lichts

Licht ist ein Stoff – allerdings ein recht eigenartiger Stoff. Wir diskutieren einige seiner Eigenschaften.

Die Geschwindigkeit des Lichts

Wir blenden aus dem Licht, das von einer Glühlampe kommt, einen Lichtstrahl aus. Oder wir benutzen gleich einen Laser, denn ein Laser erzeugt von vornherein einen dünnen Lichtstrahl.

Wo der Strahl auf die Wand trifft, sieht man einen hellen Fleck. Wir unterbrechen den Lichtstrahl für kurze Zeit, indem wir mit der Hand durch ihn hindurchfahren. Der Fleck an der Wand verschwindet im selben Augenblick, in dem die Hand den Strahl unterbricht, und er taucht wieder auf, sobald die Hand den Lichtweg wieder freigibt. Das Licht scheint, um von der Stelle der Hand bis zur Wand zu gelangen, keine Zeit zu brauchen. Tatsächlich braucht es doch eine gewisse, wenn auch sehr, sehr kurze Zeit. Licht bewegt sich nämlich sehr schnell: mit der Geschwindigkeit $v = 300\,000\text{ km/s}$.

Wie kann man das so eindeutig sagen? Hängt die Geschwindigkeit des Lichts nicht davon ab, wie schnell es von der Quelle weggeschleudert wird? Gibt es denn keine Lichtquellen, die langsames Licht abgeben? Schließlich kann man doch auch einen schnelleren oder langsameren Wasserstrahl erzeugen. Nein, man kann das Licht nicht schneller und nicht langsamer machen als $300\,000\text{ km/s}$ – wenigstens, solange sich das Licht in der Luft oder im Vakuum bewegt.

Es gibt aber doch eine Methode, Licht dazu zu bringen, dass es sich langsamer bewegt: Man lässt es in Glas laufen, oder in einem anderen durchsichtigen festen oder flüssigen Material. Die Lichtgeschwindigkeit in Glas beträgt etwa $200\,000\text{ km/s}$. In Wasser bewegt sich Licht mit einer Geschwindigkeit von $225\,000\text{ km/s}$. Ein richtiges Bremsen des Lichts ist das aber nicht, denn sobald das Licht aus dem Glas oder dem Wasser wieder austritt, nimmt es seine alte Geschwindigkeit von $300\,000\text{ km/s}$ wieder an, Abb. 21.1. Zu jedem Material gehört also eine bestimmte Lichtgeschwindigkeit.



Abb. 21.1
Wenn das Licht aus dem Glas austritt, nimmt es wieder die alte Geschwindigkeit an.

Dass die Geschwindigkeit des Lichts so hoch ist, hat eine Konsequenz, die jeder kennt: Es bewegt sich praktisch geradlinig. Der Wasserstrahl in Abb. 21.2 ist zur Erde hin gekrümmt. Je stärker der Strahl ist – je schneller sich das Wasser bewegt –, desto gerader wird er. Würde sich das Wasser im Wasserstrahl so schnell bewegen wie das Licht, so wäre der Wasserstrahl auch so gerade wie ein Lichtstrahl.

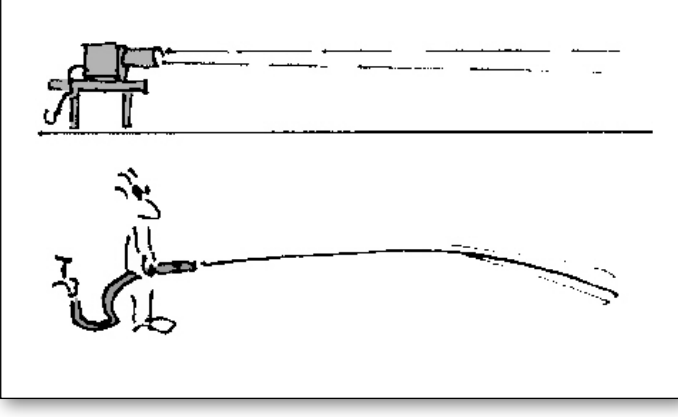


Abb. 21.2
Das Wasser des Wasserstrahls fällt zur Erde, das Licht des Lichtstrahls dagegen (fast) nicht.

Licht bewegt sich (fast) geradlinig.

Licht ist unsichtbar

Kann man Licht sehen? Eigentlich enthält schon die Frage einen Widerspruch. Sie ist von der Art wie etwa die Frage: „Kann man Geld bezahlen?“ Denn Licht ist ja gerade das Hilfsmittel, mit dem wir sehen. Wenn wir einen Gegenstand sehen, kommt Licht von dem Gegenstand in unsere Augen. Wir sagen dann: „Wir sehen den Gegenstand“, und nicht „wir sehen das Licht, das von dem Gegenstand kommt“. Trotzdem mag es einen wundern, dass man Licht tatsächlich nicht sehen kann. Um uns davon zu überzeugen, lassen wir einen Laserstrahl von links nach rechts durch den Klassenraum laufen. Wir sehen den Laser, und wir sehen einen hellen Fleck an der Wand, aber zwischendrin, über den ganzen Weg des Lichts sehen wir nichts – es sei denn, die Luft ist staubig. Dann sehen wir den Weg des Lichtstrahls. Aber was wir dabei sehen, ist wieder nicht das Licht, sondern es sind die beleuchteten Staubeilchen.

Es ist übrigens eindrucksvoll, sich klar zu machen, dass der schwarze Nachthimmel voll ist mit Licht, außer in einem kleinen Bereich im Schatten der Erde. Aber dieses Licht sehen wir nicht, Abb. 21.3.

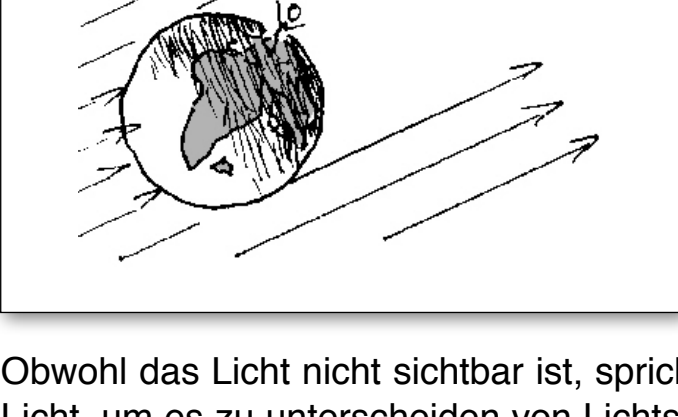


Abb. 21.3
Der schwarze Nachthimmel ist voll mit Licht.

Obwohl das Licht nicht sichtbar ist, spricht man oft von „sichtbarem“ Licht, um es zu unterscheiden von Lichtsorten, für die unsere Augen nicht empfindlich sind, etwa das ultraviolette und das infrarote Licht. Das ultraviolette und das infrarote Licht nennt man „unsichtbares“ Licht.

Das Gewicht des Lichts

Licht ist sehr leicht. (Das Wort „Licht“ hat denselben Ursprung wie das Wort „leicht“.)

Man könnte glauben, und man hat auch lange Zeit geglaubt, Licht habe gar kein Gewicht. Das hat sich aber als falsch erwiesen. Man kann inzwischen die Masse von Licht sogar feststellen. Das Licht, das eine 60-W-Lampe in einer Stunde abgibt, wiegt etwa 10^{-13} kg . Bei unserer wichtigsten Lichtquelle, der Sonne, kommen allerdings recht große Massen zusammen. Das Licht, das die Sonne in einer Sekunde abstrahlt, wiegt etwa vier Millionen Tonnen. Um so viel wird also die Sonne in jeder Sekunde leichter.

Die Durchdringung von Licht durch Licht

Wir erzeugen zwei Lichtbündel und richten sie auf eine Wand, Abb. 21.4a. Wir drehen nun die Lichtquellen so, dass sich die Lichtbündel durchdringen, Abb. 21.4b. Was passiert, wenn man das eine Lichtbündel unterbricht? Merkt das zweite etwas davon? Es passiert gar nichts. Offensichtlich durchdringen sich Lichtstrahlen, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen. Der eine läuft einfach durch den anderen hindurch.

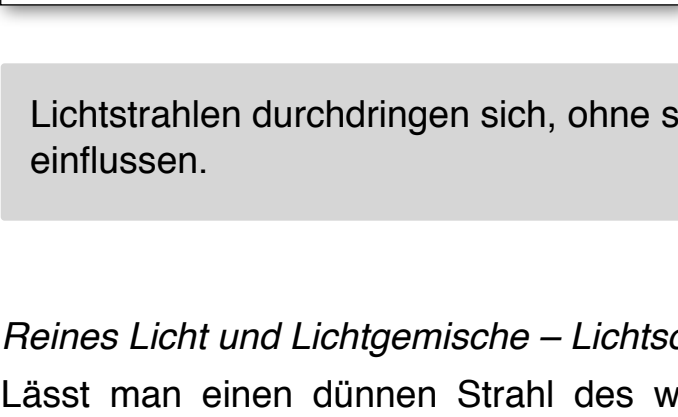


Abb. 21.4
Die beiden Lichtbündel tun sich gegenseitig nichts.

Lichtstrahlen durchdringen sich, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.

Reines Licht und Lichtgemische – Lichtsorten

Lässt man einen dünnen Strahl des weißen Lichts, das von der Sonne kommt, oder des Lichts einer Glühlampe auf ein Glasprisma fallen, Abb. 21.5, so macht man zweierlei bemerkenswerte Beobachtungen:

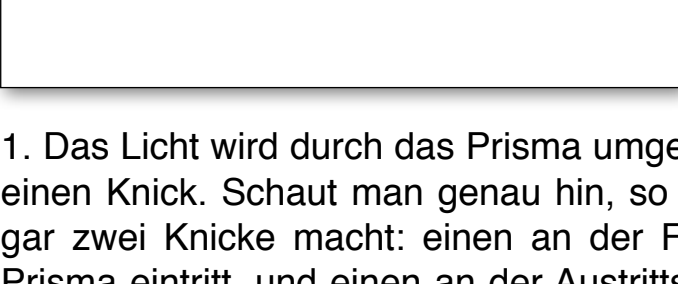


Abb. 21.5
Das Gemisch der einfallenden Lichtsorten wird durch das Prisma in seine Bestandteile zerlegt.

1. Das Licht wird durch das Prisma umgelenkt, der Lichtstrahl macht einen Knick. Schaut man genau hin, so stellt man fest, dass er sogar zwei Knicke macht: einen an der Fläche, durch die er in das Prisma eintritt, und einen an der Austrittsfläche. Im Innern des Prismas läuft er gerade.

2. Lässt man das austretende Licht auf einen weißen Schirm fallen, der sich in größerer Entfernung vom Prisma befindet, so sieht man auf dem Schirm die Farben des Regenbogens, Abb. 21.6.

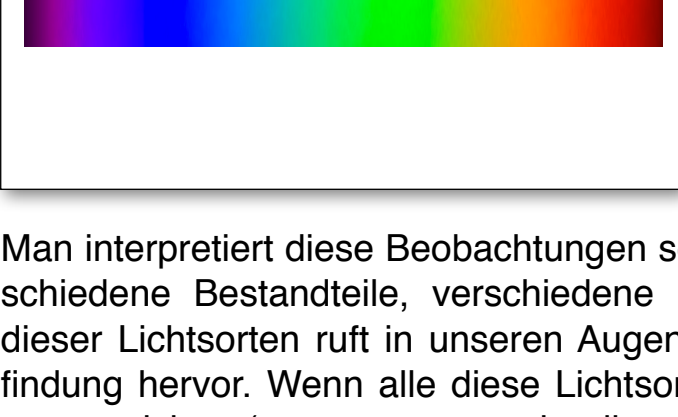


Abb. 21.6
Reihenfolge der Lichtsorten auf dem Schirm nach der Zerlegung durch das Prisma

Man interpretiert diese Beobachtungen so: Weißes Licht enthält verschiedene Bestandteile, verschiedene Lichtsorten. Jede einzelne dieser Lichtsorten ruft in unseren Augen eine bestimmte Farbbezeichnung hervor. Wenn alle diese Lichtsorten zusammen unsere Augen erreichen (genauer: wenn sie alle auf dieselbe Stelle der Netzhaut fallen), so empfinden wir „weiß“.

Was geschieht nun mit dem weißen Lichtgemisch im Prisma? Das Prisma lenkt Lichtstrahlen ab. Aber es lenkt nicht alle Lichtsorten gleich stark ab. Darum zerlegt es das weiße Gemisch in seine Bestandteile.

Wir können die Lichtsorten durch den Farbeindruck charakterisieren, den sie in unseren Augen hervorrufen. Wir werden aber später sehen, dass der Farbeindruck kein sehr zuverlässiges Kennzeichen einer Lichtsorte ist. Unsere Augen sind nämlich so gebaut, dass ein und derselbe Farbeindruck auf unterschiedliche Arten zustande kommen kann.

Außerdem gibt es Licht, auf das unsere Augen gar nicht reagieren. So gibt es Licht, das durch das Prisma weniger abgelenkt wird als das rote Licht. Man nennt es *infrarotes* Licht, Abb. 21.7. Infrarotes Licht wird von allen Gegenständen abgestrahlt, wenn ihre Temperatur nur höher ist als 0 K . Je höher die Temperatur, desto mehr strahlen die Gegenstände.

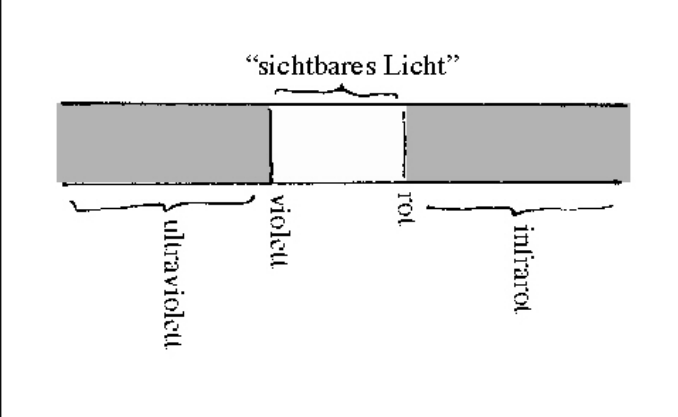


Abb. 21.7
Jenseits des blauen und des roten Lichts treffen „unsichtbare“ Lichtsorten auf den Schirm.

Es gibt auch Licht, das vom Prisma stärker abgelenkt wird als das violette Licht. Man nennt es *ultraviolettes* Licht. Es bildet einen kleinen Anteil des Sonnenlichts und auch einiger künstlicher Lichtquellen.

Du wirst später lernen, dass zu den Lichtsorten noch viele andere Strahlungen gehören, von denen du sicher schon gehört hast:

- Gammastrahlen, die manche radioaktiven Stoffe abgeben;
- Röntgenstrahlen;
- Mikrowellen;
- Strahlung, die beim Radar benutzt wird;
- Radio- und Fernsehwellen.

Alle diese Strahlungen sind also von derselben Natur. Du siehst, dass manche von ihnen den Namen Wellen tragen. Tatsächlich haben sie alle – und damit auch das Licht – etwas mit den Wellen des Wassers gemeinsam. Man sagt daher auch von all diesen Strahlen, es seien Wellen. Der vollständige Name ist „elektromagnetische Wellen“. Auch Licht ist also eine elektromagnetische Welle.

Bei einer Welle im Wasser nennt man den Abstand zwischen zwei benachbarten „Wellenbergen“ die *Wellenlänge*, Abb. 21.8. (Dies ist natürlich auch der Abstand zwischen zwei benachbarten Wellentälern oder zwei sonstigen gleichwertigen Punkten.)

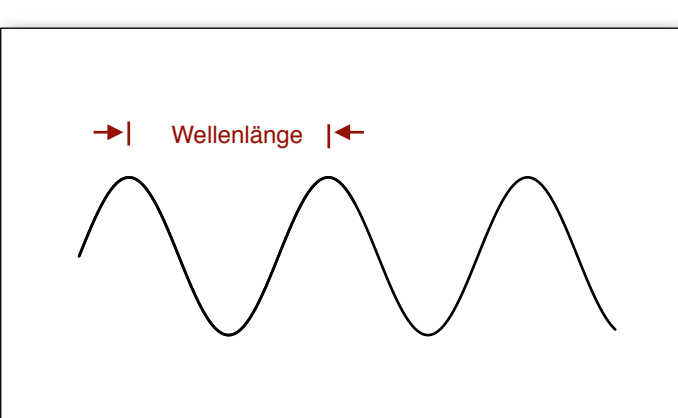


Abb. 21.8
Die Wellenlänge ist der Abstand zwischen zwei benachbarten Wellenbergen.

Genauso hat nun auch Licht eine Wellenlänge, und zwar jede Lichtsorte eine andere. Jede Lichtsorte ist eine Welle einer anderen Wellenlänge. Und Lichtgemische, wie das weiße Licht zum Beispiel, sind Gemische aus Wellen verschiedener Wellenlängen. Die Wellenlänge der verschiedenen Lichtsorten, die wir mit den Augen wahrnehmen können, sind sehr, sehr klein: Sie liegen im Bereich von 400 nm bis 800 nm . „nm“ ist die Abkürzung von Nanometer. Ein Nanometer ist ein Millionstel Millimeter.

Abb. 21.9 zeigt die Zuordnung zwischen Farben und Wellenlängen. Diese Erklärung über die Wellennatur des Lichts ist nur ein Vorgriff. Sie gestattet uns im Augenblick nur, die Lichtsorten eindeutig zu kennzeichnen. Wir können zum Beispiel sagen, der Laser gibt Licht von der und der Wellenlänge ab, statt einfach zu sagen das Licht sei rot.

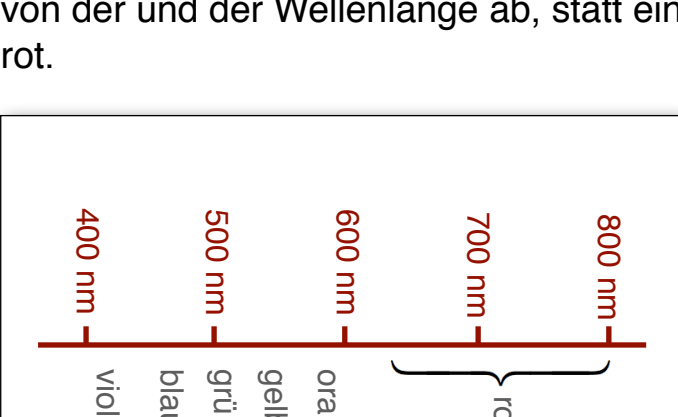


Abb. 21.9
Zusammenhang zwischen Farbe und Wellenlänge

Aber bedenke, dass wir eigentlich mehr neue Fragen aufwerfen als beantworten, z. B.: Wie kann man denn den Wert der Wellenlänge einer bestimmten Lichtsorte feststellen? Und was ist denn hier eigentlich gewollt? Diese Fragen führen uns im Augenblick von unserem eigentlichen Thema weg. Wir werden sie später genauer untersuchen.

21.3 Wenn Licht auf Materie trifft

Licht und Luft tun sich gegenseitig nicht viel. Licht läuft durch die Luft fast genauso ungestört hindurch wie durch den luftleeren Raum zwischen Sonne und Erde. Dasselbe gilt für andere Gase.

Trifft das Licht dagegen auf feste oder flüssige Materie, so kann es sehr stark verändert werden. Im Wesentlichen kann ihm zweierlei widerfahren:

- Seine Richtung kann sich ändern.
- Seine Zusammensetzung aus Lichtsorten kann sich ändern.

Wir beginnen unsere Untersuchung mit der Frage, was mit der Richtung des Lichts passiert, wenn es auf einen Gegenstand trifft. Wir brauchen für diese Untersuchung einen abgedunkelten Raum und Licht einheitlicher Richtung; es muss nicht aus einer einzigen Sorte bestehen. Wir stellen also zunächst einen Strahl weißes Licht her.

Reflexion und Streuung

Viele Körper werfen das Licht, das auf sie trifft, fast vollständig zurück. Dieses Zurückwerfen kann allerdings auf unterschiedliche Art geschehen.

Wir lassen unseren weißen Lichtstrahl auf ein Blatt weißes Papier fallen. Das Papier wirft das Licht in alle Richtungen zurück, Abb. 21.10. Man erkennt es daran, dass der ganze Raum etwas hell wird, alle Wände sind gut zu sehen. Sie bekommen ihr Licht von der Stelle des Papiers, die von unserem Lichtstrahl getroffen wird. Dass das Papier das Licht in alle Richtungen zurückwirft, erkennt man auch anders: Man sieht die Auftreffstelle des Lichts als hellen Fleck, egal aus welcher Richtung man schaut.

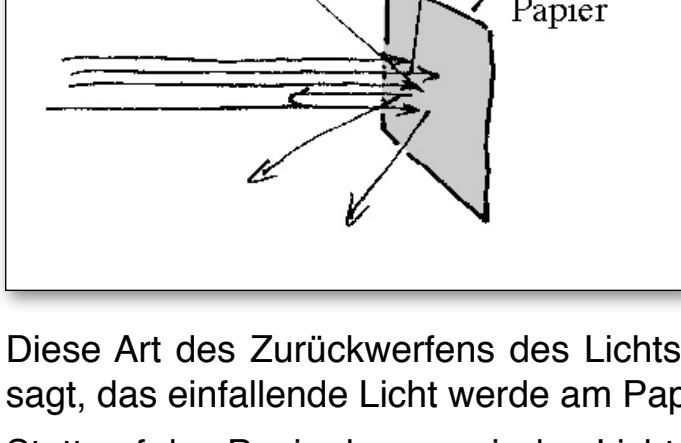


Abb. 21.10
Eine matte, weiße Oberfläche wirft das Licht in alle Richtungen zurück, sie *stret* das Licht.

Diese Art des Zurückwerfens des Lichts nennt man *Streuung*. Man sagt, das einfallende Licht werde am Papier gestreut.

Statt auf das Papier lassen wir den Lichtstrahl nun auf einen Spiegel fallen, Abb. 21.11. Wieder wird das ganze Licht zurückgeworfen – diesmal aber nur in eine einzige Richtung. Man erkennt es daran, dass irgendwo an der Wand ein einziger heller Fleck zu sehen ist. Und wieder erkennt man es auf noch eine andere Art: Wenn man auf den Spiegel schaut, ist die Auftreffstelle des Lichts fast nicht zu sehen – außer man schaut aus einer ganz bestimmten Richtung, aus derjenigen Richtung, in die das ganze Licht zurückgeworfen wird. Achtung! In diese Richtung darf man nicht schauen, falls man zum Experimentieren einen Laser benutzt. Der Laserstrahl ist so gut gebündelt, dass er den Augen schadet.

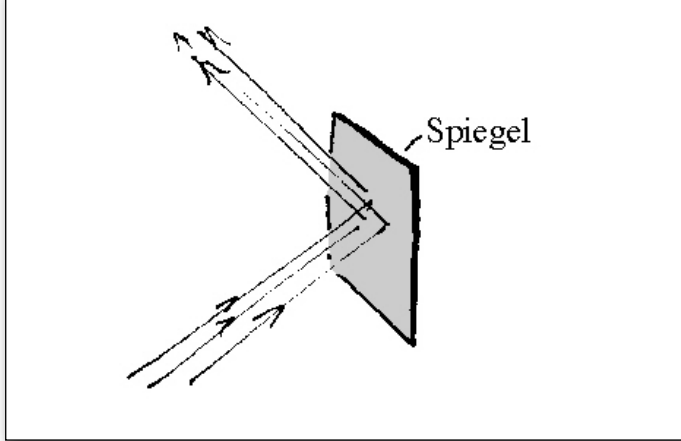


Abb. 21.11
Ein Spiegel wirft das Licht in eine einzige Richtung zurück, er *reflektiert* das Licht.

Man nennt diese Art des Zurückwerfens von Licht *Reflexion*.

Transparenz und Streuung

Es gibt Körper, die das Licht geradeaus durchlassen: Zum Beispiel eine Glasscheibe, auf die unser Lichtstrahl senkrecht auftrifft.

Wir halten eine Glasscheibe in einen Lichtstrahl senkrecht zur Strahlrichtung und stellen fest, dass sich der Lichtfleck an der Wand beim Einbringen der Scheibe nicht rührt, Abb. 21.12. Das Glas ist durchsichtig, oder *transparent*, wie man auch sagt.

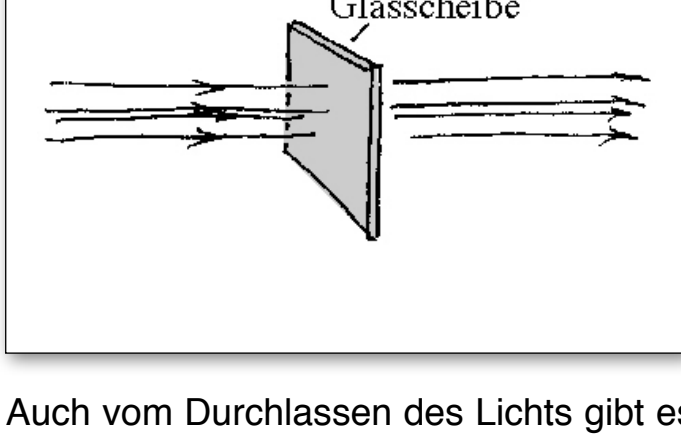


Abb. 21.12
Eine Glasscheibe lässt senkrecht einfallendes Licht gerade durch.

Auch vom Durchlassen des Lichts gibt es eine zweite Variante. Eine Scheibe aus mattem Glas lässt das Licht zum größten Teil durch. Sie streut es aber dabei. Und ein Teil wird auch noch zurückgestreut, Abb. 21.13.

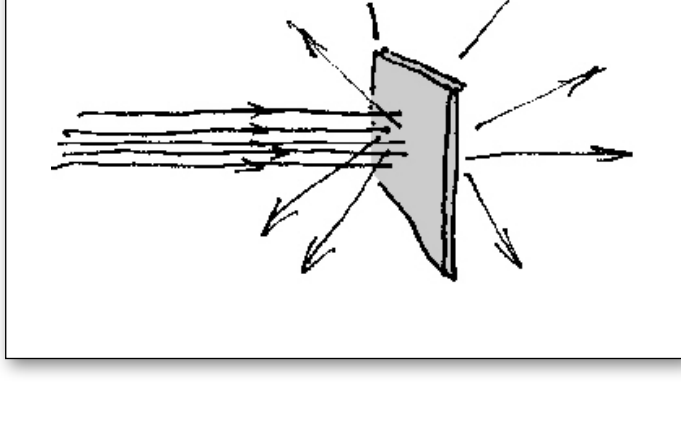


Abb. 21.13
Eine Mattscheibe lässt Licht durch, streut es aber dabei.

Absorption

Wir lassen das Licht nun auf ein Stück schwarzes Papier fallen. Noch besser eignet sich ein schwarzer Wollpullover. Von dem einfallenden Licht kommt fast nichts zurück, und es geht auch nichts hindurch. Das Licht wird von dem Papier bzw. dem Pullover *absorbiert*.

Kompliziertere Fälle

Wir haben bisher Spezialfälle betrachtet: Das Licht wurde entweder vollständig reflektiert oder vollständig durchgelassen oder vollständig absorbiert. Im Allgemeinen widerfährt dem Licht nicht nur eine dieser Möglichkeiten.

Es wird fast immer ein Teil des Lichts reflektiert, ein Teil zurückgestreut, ein Teil ohne Streuung durchgelassen, ein Teil mit Streuung durchgelassen und ein Teil absorbiert. Je nach Gegenstand sind die verschiedenen Anteile verschieden groß.

Betrachte zum Beispiel ein Blatt graues, glänzendes Papier, Zeitstriftenpapier zum Beispiel, Abb. 21.14. Das Papier wirft einen recht großen Teil des auftreffenden Lichts zurück, und zwar zum Teil gestreut und zum Teil reflektiert. Der reflektierte Teil des Lichts ist für den Glanz des Papiers verantwortlich. Ein weiterer Teil des Lichts wird durchgelassen, und zwar fast ausschließlich gestreut. Der Rest schließlich wird von dem Papier absorbiert. Würde nichts absorbiert, so wäre das Papier weiß und nicht grau.

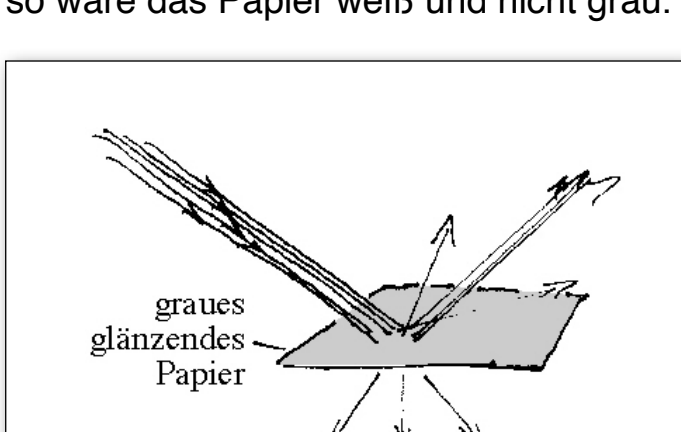


Abb. 21.14
Graues, glänzendes Papier reflektiert, streut und lässt durch.

Es wird aber noch komplizierter. Was mit dem Licht passiert, wenn es auf einen Gegenstand trifft, hängt nämlich auch noch davon ab, unter welchem Winkel es auftrifft.

Während eine Glasscheibe das Licht, das senkrecht auftrifft, zum größten Teil durchlässt, reflektiert dieselbe Scheibe dasselbe Licht zum größten Teil, wenn es unter einem sehr spitzen Winkel auftrifft, Abb. 21.15. Überzeuge dich davon.

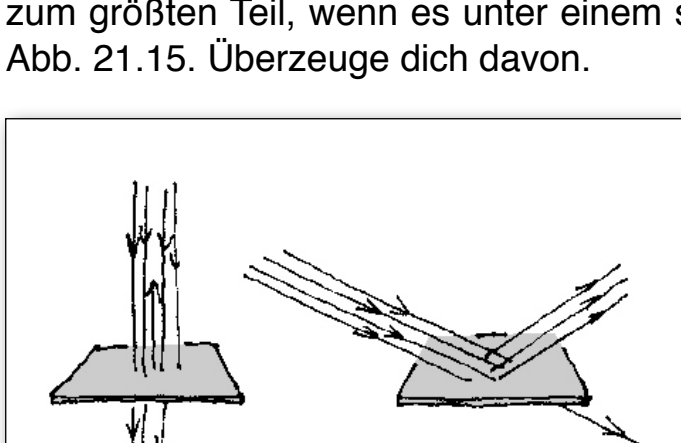


Abb. 21.15
Trifft das Licht senkrecht auf die Glasscheibe, so wird der größte Teil durchgelassen; trifft es flach auf, so wird der größte Teil reflektiert.

Schließlich ist all das, was wir bisher aufgezählt haben, noch davon abhängig, von welcher Sorte das Licht ist. Und das ist besonders wichtig.

Weißes Licht, d. h. ein Gemisch aus allen Lichtsorten, fällt auf ein T-Shirt. Das T-Shirt absorbiert alle Lichtsorten außer dem blauen Licht, Abb. 21.16. Vom T-Shirt kommt daher nur blaues Licht zurück. Wir sagen: „Das T-Shirt *ist* blau.“ Was sieht man, wenn man das T-Shirt mit reinem rotem Licht beleuchtet? Das rote Licht wird absorbiert. Anderes Licht ist nicht vorhanden. Es wird also gar kein Licht zurückgeworfen, das T-Shirt erscheint schwarz.

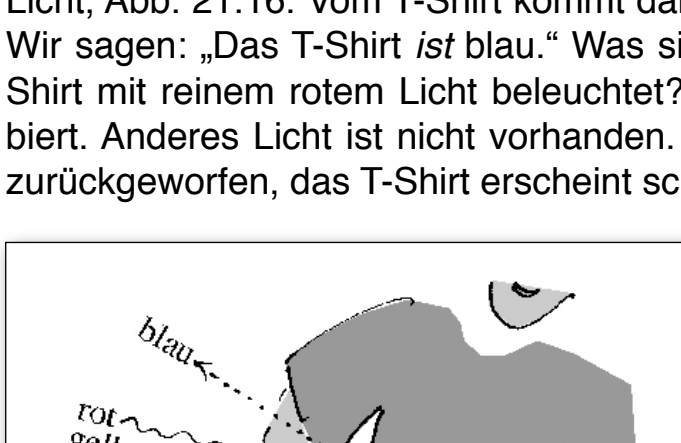


Abb. 21.16
Das T-Shirt absorbiert alles Licht außer dem blauen. Das blaue Licht wird zurückgestreut.

Genauso wie verschiedene Gegenstände verschiedene Lichtsorten verschieden stark zurückwerfen, lassen manche Gegenstände die verschiedenen Lichtsorten auch verschieden gut durch. Hierzu gehören farbige Gläser, Abb. 21.17. Das grüne Glas einer Limonadenflasche lässt grünes Licht durch und absorbiert den Rest.

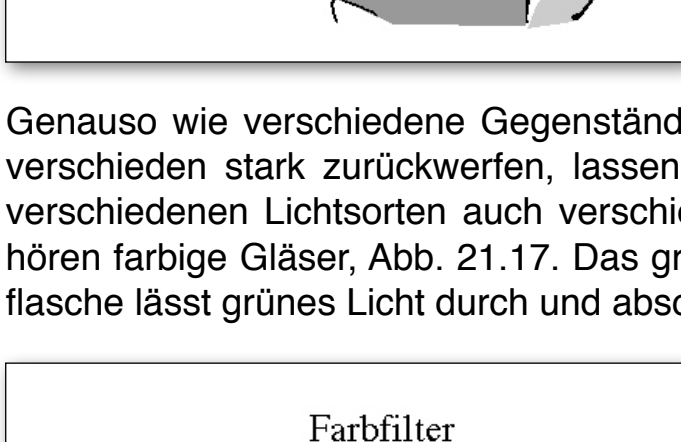


Abb. 21.17
Das Farbfilter absorbiert alles Licht außer dem grünen. Das grüne Licht wird durchgelassen.

Es ist interessant, farbige Glasplatten, so genannte *Farbfilter*, hintereinander zu halten, Abb. 21.18. Zwei Filter, die je nur eine Lichtsorte durchlassen, aber jedes eine andere, lassen, wenn man sie hintereinander setzt, gar kein Licht mehr durch.

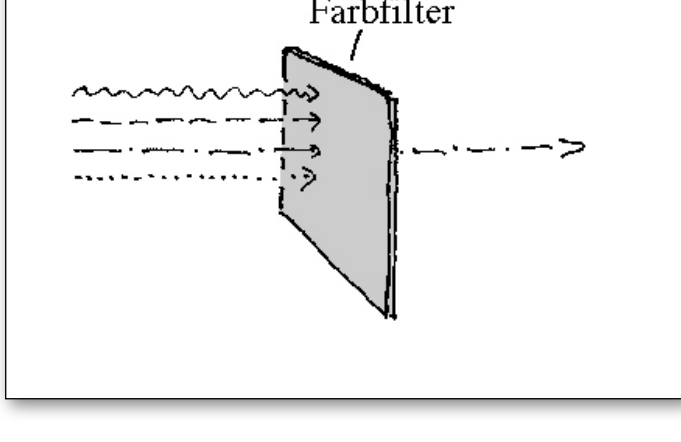


Abb. 21.18
Scheibe A lässt nur grünes Licht durch, Scheibe B nur gelbes. Beide Scheiben hintereinander gestellt lassen gar kein Licht durch.

Interessant, aber recht selten, ist auch die folgende Erscheinung: Ein Gegenstand lässt eine Lichtsorte durch und wirft den Rest zurück. Eine Scheibe mit dieser Eigenschaft ändert ihre Farbe, je nachdem, ob man sie gegen das Licht betrachtet, oder von der Seite, von der das Licht kommt, Abb. 21.19. Dies war ein grober Überblick über die Vielfalt der Erscheinungen, die man beobachten kann, wenn Licht auf einen Gegenstand trifft.

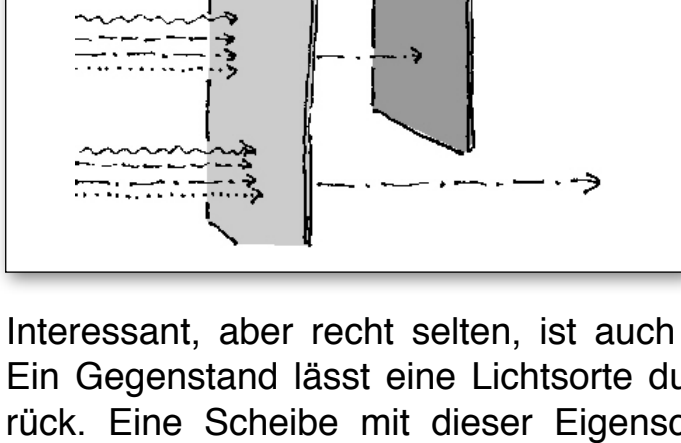


Abb. 21.19
Manche Farbfilter reflektieren das Licht, das sie nicht durchlassen.

Kannst du nun beschreiben, was mit dem Licht der Sonne passiert, das auf einen glänzenden roten Apfel fällt? Oder auf das leicht durchscheinende Blatt eines Baumes?

Aufgaben

1. Das Licht der Sonne trifft auf einen glänzenden roten Apfel. Was passiert mit dem Licht?
2. Das Licht der Sonne trifft auf die leicht durchscheinenden Blätter eines Baumes. Was passiert mit dem Licht?
3. Ein dunkelroter Pullover sieht bei Beleuchtung mit dem blauen Licht einer Reklameleuchtröhre ganz schwarz aus. Wie kommt das?
4. Es gibt silberne Verpackungsfolie, durch die man hindurchschauen kann, wenn man sie gegen das Licht hält. Was passiert mit dem Licht, das auf die Folie trifft?
5. Das Licht der Projektionslampe eines Filmprojektors fällt auf den Film. Was passiert mit dem Licht?
6. Eine farbige Postkarte wird normal beleuchtet. Was passiert mit dem Licht, das auf die Postkarte fällt?
7. Die Bürger von Schilda haben ein Rathaus ohne Fenster gebaut. Damit es im Rathaus hell wird, wollten sie das Licht mit Säcken hineintragen. Warum geht das nicht?

21.4 Diffuses und kohärentes Licht

Wir denken uns irgendwo in der Mitte des Zimmers einen kleinen kugelförmigen Raumbereich R abgegrenzt, Abb. 21.20. Was für Lichtstrahlen gehen durch diesen Raumbereich? Es kommt Licht aus den verschiedensten Richtungen. Von rechts her, vom Fenster, kommt viel; auch von den Wänden kommt noch recht viel. Von unten, vom dunklen Fußboden dagegen, kommt wenig Licht. Irgendwo befindet sich ein ganz schwarzer Gegenstand. Aus dieser Richtung kommt fast gar kein Licht zu unserem Raumbereich.

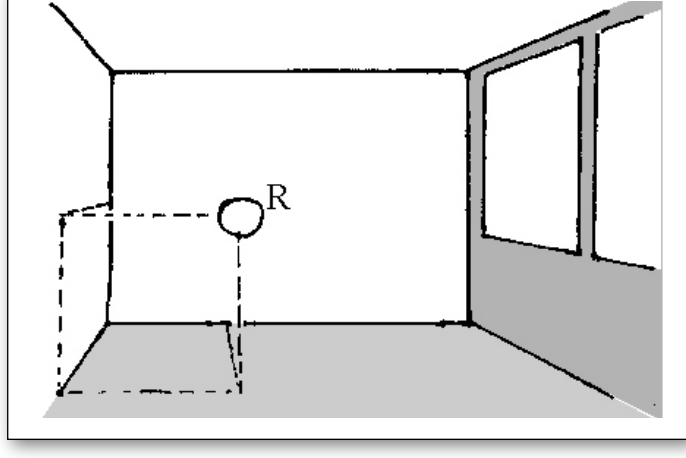


Abb. 21.20
Was für Licht durchkreuzt den kleinen Raumbereich R ?

Um das Licht in R vollständig zu beschreiben, genügt es aber nicht, nur zu sagen, wie viel Licht in jeder Richtung läuft. Man muss zusätzlich noch angeben, wie die Lichtsorten verteilt sind. So kommt von der Fensterseite her Licht aller Lichtsorten, während von den blau gestrichenen Wänden nur blaues Licht zu unserem Raumbereich kommt.

Wir betrachten einige spezielle Situationen.

Es ist ein trüber Tag. Wir gehen mitsamt unserem Raumbereich R nach draußen. In Abb. 21.21 ist R vergrößert und im Querschnitt dargestellt. Es sind viele typische Lichtstrahlen eingezeichnet. Strahlen unterschiedlicher Lichtsorten sind durch unterschiedliche Strichelung gekennzeichnet. Man sieht: Es kommt Licht von links, von rechts, von oben, kurz, aus allen Richtungen des „oberen Halbraums“. Wenn sich *an einem Ort* Licht vieler verschiedener Richtungen befindet, sagt man, das Licht sei dort *diffus*.

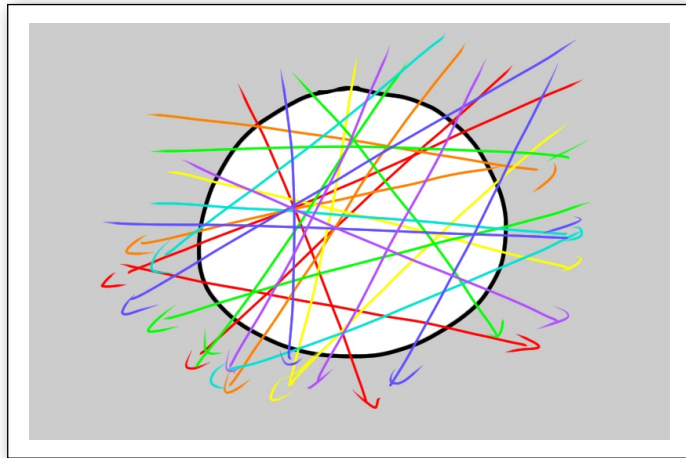


Abb. 21.21
Diffuses Licht verschiedener Farben

Wir stellen uns nun vor, über der Wolkendecke liege ein riesiges Farbfilter. Auf der Erde kommt dann nur noch Licht einer Sorte an. Das Licht, das wir in unserem Bereich R hätten, ist in Abb. 21.22 dargestellt. Es ist immer noch diffus. Im Gegensatz zu vorher besteht es aber nur noch aus einer Lichtsorte. Man sagt es ist *monochromatisch*.

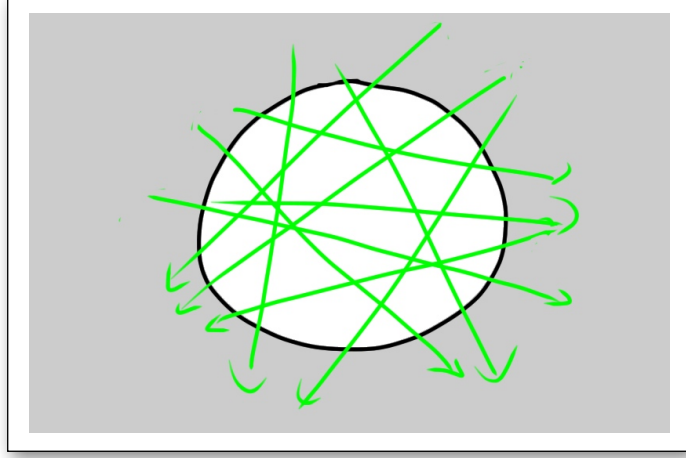


Abb. 21.22
Diffuses, monochromatisches Licht

Eine weitere einfache Situation: Es ist Nacht, und es gibt nur eine einzige Lampe, die weit von uns, und damit von R , entfernt ist, Abb. 21.23.

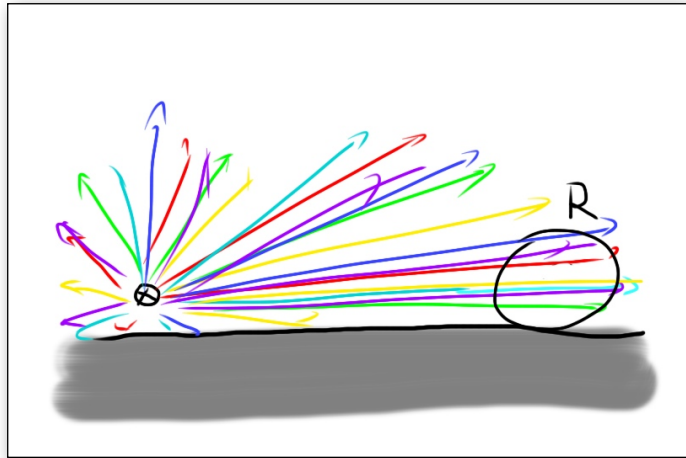


Abb. 21.23
Das Licht im Raumbereich R hat eine einheitliche Richtung.

Abb. 21.24 zeigt die Lichtverteilung in R . Alle Lichtstrahlen haben jetzt nahezu dieselbe Richtung.

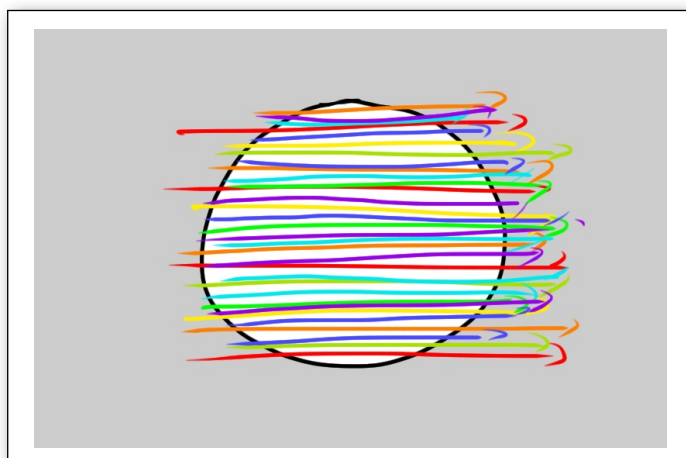


Abb. 21.24
Licht einheitlicher Richtung

Schließlich stellen wir vor die Lichtquelle noch ein Farbfilter. Das Licht, das durch R läuft, zeigt Abb. 21.25. Es ist monochromatisch und hat eine einzige Richtung. Es ist das reinste Licht, das man sich überhaupt vorstellen kann. Es ist weder ein Gemisch verschiedener Lichtsorten wie in Abb. 21.24, noch ist es ein Gemisch von Licht verschiedener Richtungen wie in Abb. 21.22. Und es ist schon gar nicht ein Gemisch verschiedener Sorten und Richtungen gleichzeitig wie in Abb. 21.21.

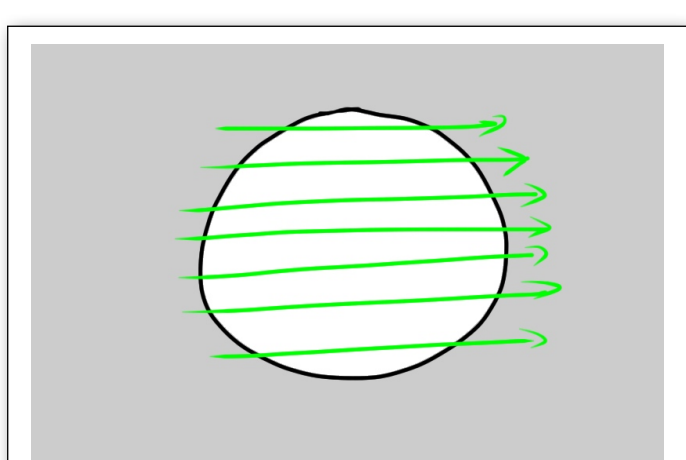


Abb. 21.25
Kohärentes Licht: Einheitliche Richtung und einheitliche Farbe

Solches Licht, das sowohl von der Lichtsorte als auch von der Richtung her völlig einheitlich ist, nennt man *kohärentes Licht*. Es ist zum Experimentieren besonders gut geeignet.

Kohärentes Licht: eine einzige Lichtsorte, eine einzige Richtung.

Wie man sich kohärentes Licht beschaffen kann, sollte dir nach den vorangegangenen Betrachtungen klar sein. Entweder man stellt eine sehr kleine Lichtquelle, vor die man ein Farbfilter setzt, in sehr großer Entfernung auf. Oder man macht es so wie es Abb. 21.26 zeigt: Man stellt die Lichtquelle nicht in großer Entfernung auf, blendet dafür aber die „falschen“ Richtungen aus.

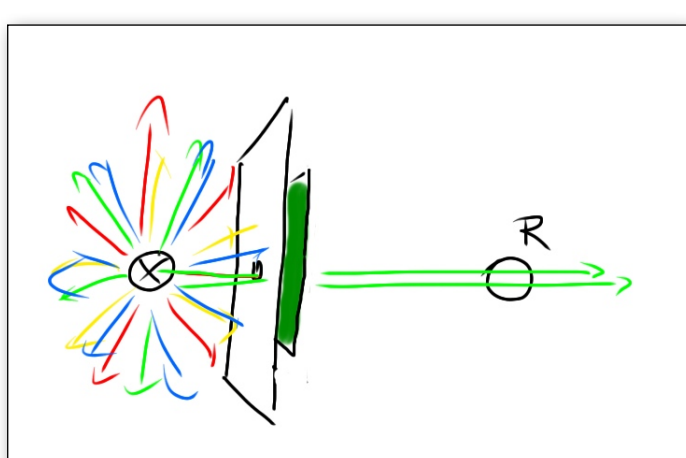


Abb. 21.26
So kann man kohärentes Licht herstellen.

Nach beiden Methoden bekommt man zwar kohärentes Licht, aber Licht, das nur sehr schwach ist, Licht sehr geringer *Intensität*. Es gibt nun eine viel elegantere Methode, um sich kohärentes Licht zu beschaffen, und zwar Licht sehr hoher Intensität: Man nimmt als Lichtquelle einen *Laser*. Das Licht von Lasern zeichnet sich dadurch aus, dass es von Natur aus kohärent ist. Wir wissen jetzt also auch, was das Besondere am Laserlicht ist:

Laserlicht ist kohärent.

Aufgaben

1. Es herrscht Nebel, so dass man „die Hand vor den Augen nicht sieht“. Wie sieht die Lichtverteilung in einem kleinen Raumbereich mitten im Nebel aus?
2. Auf eine Straßenkreuzung kommen nachts aus großer Entfernung zwei Autos im rechten Winkel aufeinander zu. Wie ist die Lichtverteilung im Bereich der Kreuzung (von oben gesehen)?
3. Du stehst auf der Straße. Es ist dunkel. Du siehst vor dir in sehr großer Entfernung die Rücklichter eines Autos. Wie ist die Lichtverteilung direkt vor dir?

21.5 Das Reflexionsgesetz

Wir richten einen Lichtstrahl auf einen Spiegel. Das Licht wird reflektiert; es wird in eine bestimmte, andere Richtung abgelenkt. Wovon hängt diese Richtung ab? Wie kann man sie verändern?

Man sieht leicht, dass der reflektierte Lichtstrahl umso flacher ausläuft, je flacher der einfallende Strahl auf den Spiegel trifft. Wenn man die Winkel nachmisst, den *Einfallswinkel* und den *Reflexionswinkel*, so stellt man fest, dass beide gleich sind, Abb. 21.27.

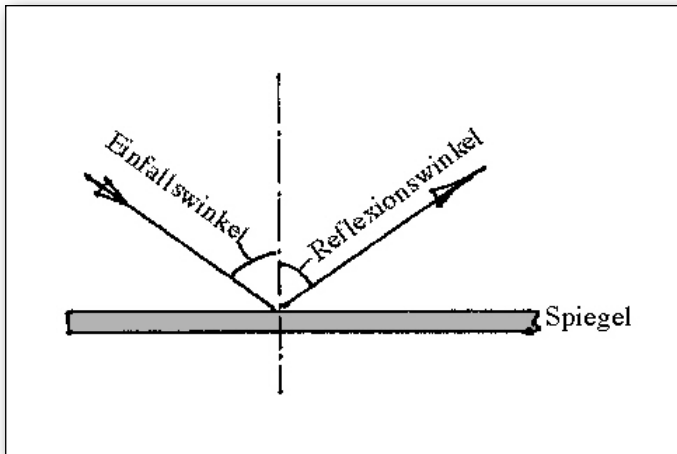


Abb. 21.27

Einfalls- und Reflexionswinkel sind gleich.

Bei derselben Gelegenheit stellt man noch fest, dass einfallender und reflektierter Strahl in einer Ebene liegen, die senkrecht auf der Spiegeloberfläche steht. Wir errichten an der Auftreffstelle auf den Spiegel die Senkrechte auf die Spiegeloberfläche, das *Einfallslot*. Es gilt damit:

Einfallender Strahl, reflektierter Strahl und Einfallslot liegen in einer Ebene.

Einfallswinkel = Reflexionswinkel

Diese Aussagen nennt man das Reflexionsgesetz.

Aufgaben

1. Abb. 21.28a zeigt von oben gesehen zwei ebene Spiegel, die einen rechten Winkel bilden. Von links unten fällt paralleles Licht ein. Zeichne den weiteren Verlauf der Strahlen A und B.
2. Abb. 21.28b zeigt eine gekrümmte spiegelnde Fläche, auf die Licht aus einer einheitlichen Richtung trifft. Das Einfallslot liegt für jeden Punkt der Fläche in der Zeichenebene. Zeichne den weiteren Verlauf der Strahlen A und B.

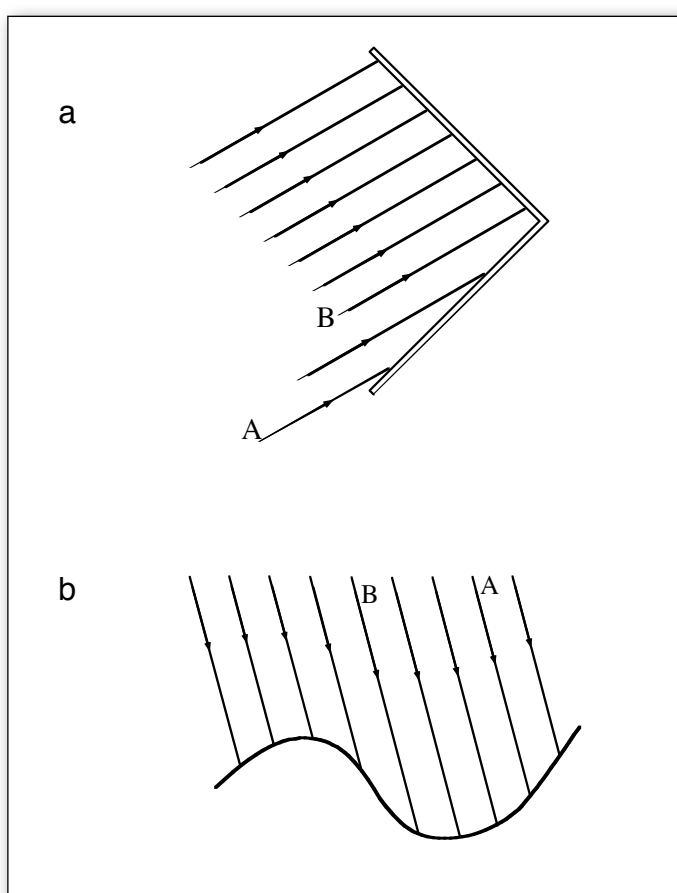


Abb. 21.28

Zu den Aufgaben 1 und 2

21.6 Der ebene Spiegel

Abb. 21.29 zeigt einen Spiegel, vor dem eine Flasche steht. Man sieht die Flasche vor dem Spiegel, und man sieht eine zweite Flasche, die hinter dem Spiegel zu stehen scheint. Die „Phantom-Flasche“ hinter dem Spiegel befindet sich genau in der Verlängerung der Senkrechten, die man von der richtigen Flasche auf den Spiegel zeichnen kann. Wie kommt diese Erscheinung, dieses „Spiegelbild“, zustande?

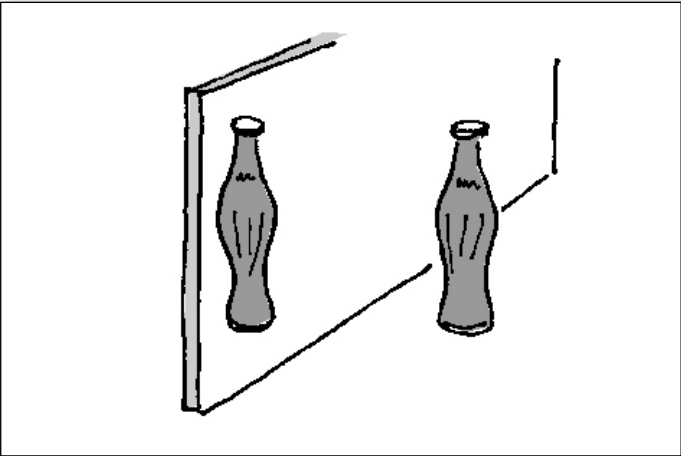


Abb. 21.29
Hinter dem Spiegel scheint eine zweite Flasche zu stehen.

Um es zu verstehen, genügt es, das Reflexionsgesetz anzuwenden. P sei ein bestimmter Punkt eines Gegenstandes. Von P geht Licht aus, und zwar in die verschiedensten Richtungen. In Abb. 21.30 sind drei der vielen Strahlen, die von P ausgehen, eingezeichnet. Alle drei Strahlen treffen auf den Spiegel. Außerdem sind die entsprechenden reflektierten Strahlen eingezeichnet. Verlängert man nun die reflektierten Strahlen nach hinten – siehe die gestrichelten Linien –, so treffen sie sich in einem Punkt P' . Die reflektierten Strahlen kommen vom Spiegel, und zwar von den verschiedenen Punkten A , B und C der Spiegeloberfläche. Sie scheinen aber alle von einem einzigen Punkt P' auszugehen, der hinter dem Spiegel liegt.

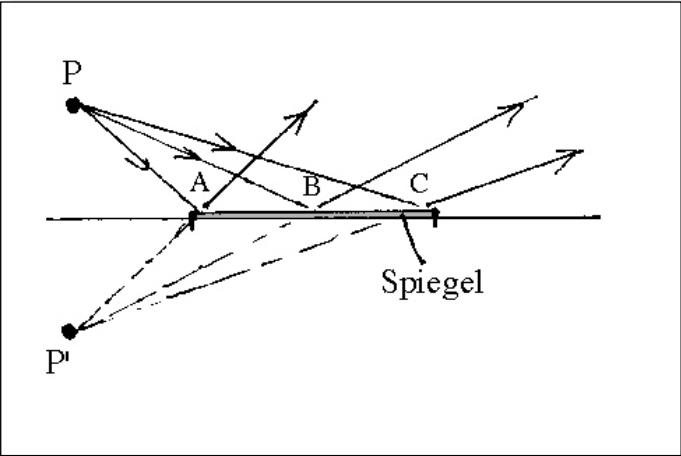


Abb. 21.30
Die reflektierten Lichtstrahlen scheinen vom Punkt P' zu kommen.

In Abb. 21.31 wurde der Spiegel durch eine Fensteröffnung ersetzt. Und dort, wo in Abb. 21.30 der lichtaussendende Punkt P' zu liegen scheint, befindet sich in Abb. 21.31 wirklich ein lichtaussendender Punkt. Das Licht, das in Abb. 21.31 aus der Fensteröffnung kommt, ist nicht zu unterscheiden von dem, das in Abb. 21.30 vom Spiegel kommt.

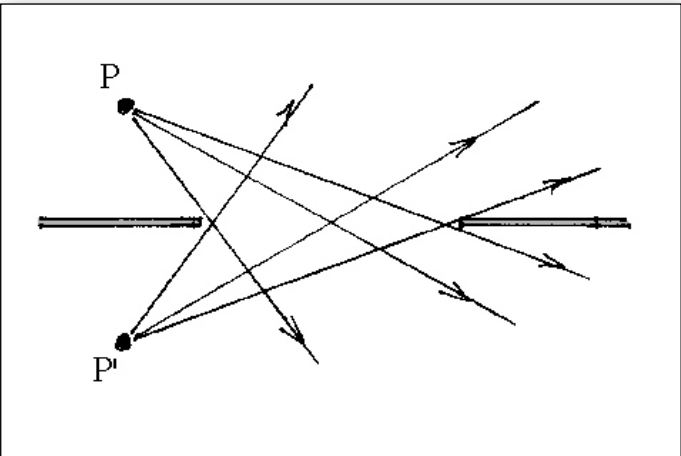


Abb. 21.31
Die Lichtverteilung oberhalb des Fensters ist dieselbe wie die in Abb. 21.30 oberhalb des Spiegels.

Aufgabe

Abb. 21.32 zeigt einen Spiegel von oben gesehen und einen stabförmigen Gegenstand. Bestimme die Lage des scheinbaren Gegenstandes hinter dem Spiegel. Zeichne Strahlen ein.

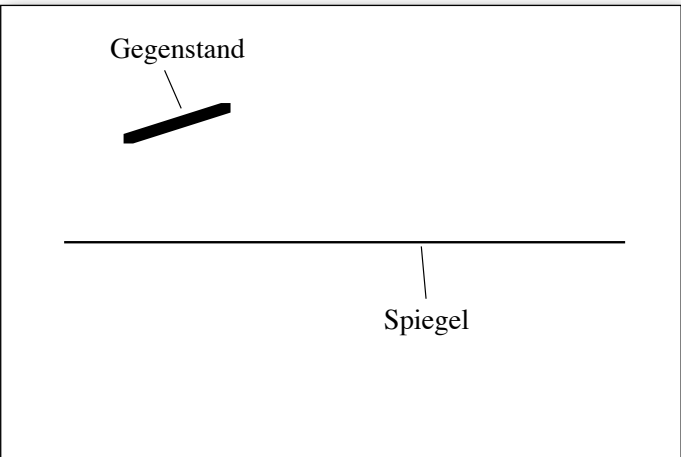


Abb. 21.32
Zur Aufgabe

21.7 Parabolspiegel

Oft braucht man sehr viel Licht an einer einzigen Stelle. Man möchte Licht, das sehr weit verteilt ankommt, auf einen kleinen Raumbe- reich konzentrieren. Um zu sehen, wie man das erreicht, betrachten wir ein Beispiel.

Der Kessel eines Kraftwerks soll mit Sonnenlicht geheizt werden. Stellt man den Kessel einfach in die Sonne, so wird er kaum warm, es trifft viel zu wenig Sonnenlicht auf. Man müsste das Sonnenlicht, das auf einen größeren Teil der Erdoberfläche trifft, irgendwie auf- sammeln. Man schafft dies mit Hilfe von Spiegeln, Abb. 21.33.

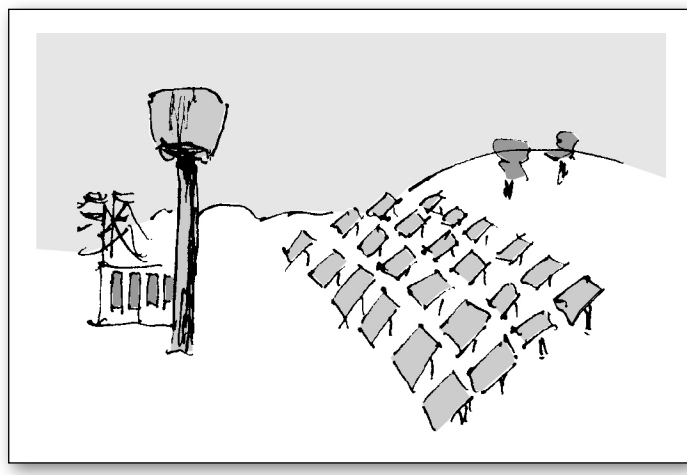


Abb. 21.33

Solkraftwerk: Die Spiegel kon- zentrieren das Sonnenlicht auf den Kessel am oberen Ende des Turms.

Jeder Spiegel ist so orientiert, dass das von ihm zurückgeworfene Sonnenlicht gerade auf den Kessel fällt. Damit man Licht von einer möglichst großen Fläche nutzen kann, wird der Kessel auf einem Turm installiert. Daher der Name Turmkraftwerk.

Im Prinzip könnte man statt der vielen Einzelspiegel einen einzigen großen, zusammenhängenden Spiegel aufbauen, Abb. 21.34. Ein so riesiger Spiegel, wie er für ein Kraftwerk gebraucht wird, ist natürlich unpraktisch, und er brächte auch keinen Vorteil. Die Methode ist aber sehr interessant für kleine Anordnungen.

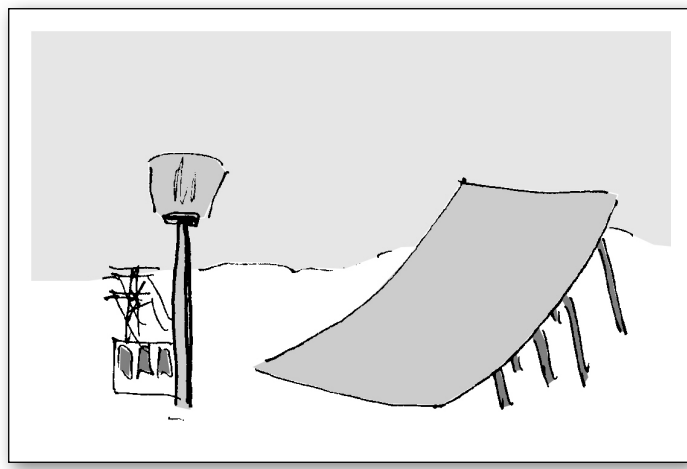


Abb. 21.34

Man könnte die einzelnen Spiegel in Abb. 21.33 durch einen einzi- gen, gewölbten Spiegel ersetzen.

Wenn Licht aus einer einzigen Richtung kommt, wenn es sich also um paralleles Licht handelt, so kann man es mit einem Spiegel in einen einzigen Punkt konzentrieren, vorausgesetzt, der Spiegel hat die richtige Form: Seine Oberfläche muss im Querschnitt eine Para- bel sein. Man nennt solche Spiegel *Parabolspiegel*.

Licht, das parallel zur Symmetrieachse der Parabel einfällt, wird so reflektiert, dass es sich in einem Punkt trifft. Dieser Punkt heißt der *Brennpunkt* des Spiegels.

Da das Sonnenlicht nicht ganz parallel ist, wird es nicht in einem Punkt konzentriert, sondern in einem kleinen Fleck.

Man kann mit einem Parabolspiegel paralleles Licht in einen einzi- gen Punkt konzentrieren. Aber man kann den Spiegel auch umge- kehrt betreiben, nämlich um Licht, das von einem Punkt ausgeht, parallel zu machen.

Wir nehmen eine Lichtquelle, die „so punktförmig wie möglich“ ist, eine Glühlampe mit einem sehr kompakten Glühdraht zum Beispiel. Wir stellen die Lampe so auf, dass sich der Glühdraht im Brenn- punkt eines Parabolspiegels befindet. Der Spiegel wirft das Licht, das auf ihn trifft, so zurück, dass es (fast) parallel ist. Was wir auf- gebaut haben, ist ein Scheinwerfer, ähnlich wie ihn jedes Auto hat, oder auch jede Taschenlampe.

Parabolspiegel haben noch viele andere Anwendungen. Sie werden in beiden Richtungen gebraucht: zum Konzentrieren von parallelem Licht auf einen Punkt und zum Parallelmachen von Licht, das von einer sehr kleinen, also praktisch punktförmigen Quelle ausgeht. Sehr häufig werden sie für Licht benutzt, das weit außerhalb des Empfindlichkeitsbereichs unserer Augen liegt. Man braucht solche Spiegel sowohl für Sende- als auch für Empfangsantennen der ver- schiedensten Arten elektromagnetischer Wellen.

Der Parabolspiegel der Sendeantenne erzeugt aus der Strahlung der eigentlichen, praktisch punktförmigen Antenne einen Strahl von relativ parallelem „Licht“, und der Spiegel der Empfangsantenne sammelt die einfallende Strahlung wieder auf und konzentriert sie auf die kleine Empfangsantenne.

Solche Sende- und Empfangsantennen befinden sich auf jedem Fernmeldeturm. Mit ihnen werden Fernsehprogramme, Hörfunkpro- gramme und Telefongespräche von einem Turm zum nächsten über- tragen.

Parabolantennen werden außerdem benutzt, um Daten zu Satelliten zu schicken und von Satelliten zu empfangen. Auch zum Direktemp- fang des Satellitenfernsehens benutzt man eine Antenne mit Para- bolspiegel.

Der Parabolspiegel des Radars am Flughafen dient gleichzeitig zum Senden und zum Empfangen, Abb. 21.35.

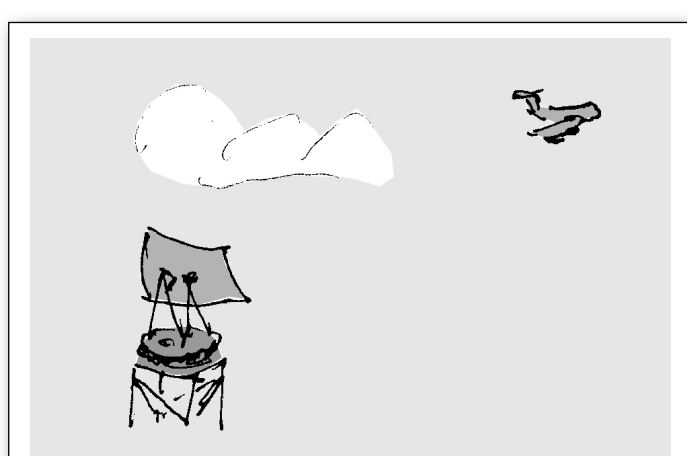


Abb. 21.35

Radarantenne

Er erzeugt einen relativ dünnen Strahl elektromagnetischer Wellen. Da sich die Antenne dreht, läuft der Strahl im Kreis herum. Das „Licht“, das er aussendet, wird nur von Metallen zurückgeworfen. Trifft der Strahl etwa auf ein Flugzeug, so wird Strahlung zurückge- worfen, vom Parabolspiegel konzentriert und von der Antenne im Brennpunkt aufgefangen. Man erfährt so, in welcher Richtung sich das Flugzeug befindet.

Zurück zum gewöhnlichen Licht.

Was macht unser Spiegelfeld in Abb. 21.33 bei trübem Wetter? Wir betrachten einen einzigen Spiegel. Er wirft das einfallende Licht ei- ner einzigen Richtung auf den Kessel. Das meiste einfallende Licht wird aber in andere Richtungen gelenkt, es ist verloren. Wie man den Spiegel auch dreht – das meiste Licht geht daneben.

Das gilt auch für den Parabolspiegel. Es gibt überhaupt keinen Spiegel, mit dem man diffuses Licht konzentrieren kann.

Diffuses Licht kann man nicht konzentrieren.

Aufgabe

Der Parabolspiegel in Abb. 21.36 wird von diffusem Licht getroffen. Zeige, dass der Spiegel das Licht nicht konzentriert und nicht parallel macht.

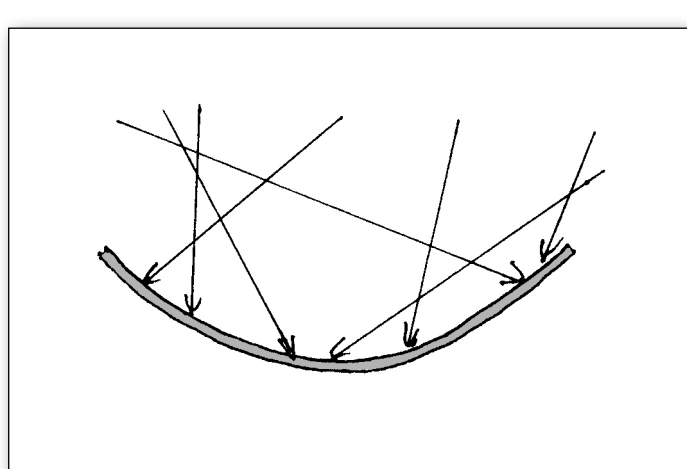


Abb. 21.36

Zur Aufgabe

21.8 Lichtbrechung

Für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen braucht man einen dünnen Lichtstrahl.

Wir füllen ein Aquarium mit Wasser und geben in das Wasser einige Tropfen Milch. Dadurch wird das Wasser etwas trüb. Wenn jetzt der Lichtstrahl durch das Wasser läuft, sieht man gut, welchen Weg er nimmt.

Wir schicken den Strahl von oben her in das Wasser hinein, Abb. 21.37. Die wichtigste Feststellung: Beim Eintritt ins Wasser wird der Strahl geknickt – außer wenn er genau senkrecht auf die Wasseroberfläche fällt. Je schräger er auftrifft, desto stärker wird er geknickt, und zwar immer von der Wasseroberfläche weg.



Abb. 21.37
Das Lichtbündel wird an der Wasseroberfläche geknickt.

Dieses Abknicken von Lichtstrahlen nennt man *Brechung*. Man sagt, das Licht werde gebrochen.

In Abb. 21.38 sind einfallender und gebrochener Strahl noch einmal dargestellt. Außerdem ist bei der Auftreffstelle noch das Einfallslot eingezeichnet. Den Winkel des einfallenden Strahls gegen das Lot bezeichnen wir mit α ; der Winkel zwischen gebrochenem Strahl und Lot ist β .

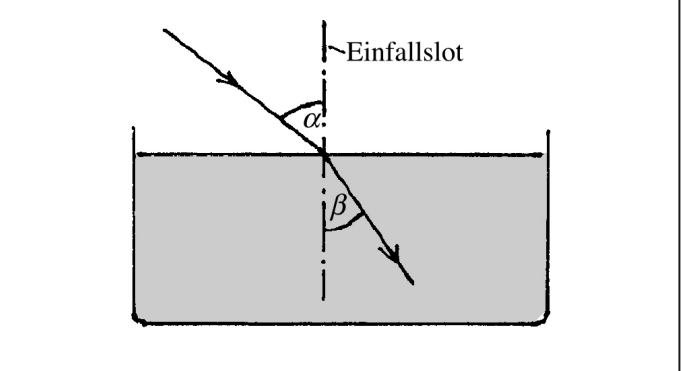


Abb. 21.38
Beim Eintritt in Wasser wird das Licht zum Einfallslot hin gebrochen.

Wir können damit sagen, dass das Licht beim Übergang Luft → Wasser zum Einfallslot hin gebrochen wird. Wir stellen auch fest, dass einfallender und gebrochener Strahl in einer Ebene liegen, die senkrecht auf der brechenden Fläche steht. In anderen Worten: Einfallender Strahl, gebrochener Strahl und Einfallslot liegen in einer Ebene.

Auch wenn der Lichtstrahl aus der Luft in einen anderen durchsichtigen Körper eintritt, wird er gebrochen. Wie stark er gebrochen wird, hängt vom Material ab. Beim Übergang in Glas wird das Licht stärker gebrochen als beim Übergang in Wasser. Und beim Übergang in Diamant stärker als beim Übergang in Glas.

In Tabelle 21.1 ist der Zusammenhang zwischen α und β für Wasser, Glas und Diamant wiedergegeben.

α	β		
	Wasser	Glas	Diamant
0°	0°	0°	0°
10°	7,5°	6,6°	4,1°
20°	14,9°	13,2°	8,1°
30°	22,1°	19,5°	11,9°
40°	28,9°	25,4°	15,4°
50°	35,2°	30,7°	18,5°
60°	40,6°	35,3°	21,0°
70°	45,0°	38,8°	22,8°
80°	47,8°	41,0°	24,0°
90°	48,8°	41,8°	24,4°

Tabelle 21.1
Zusammenhang zwischen den Winkeln α und β für Wasser, Glas und Diamant

Es bleiben noch einige Fragen zu klären.

Was passiert mit Licht, das vom Wasser in die Luft übertritt? Statt die Lichtquelle in das Wasserbecken hineinzustellen – das würde ihr sicher nicht gut tun – wenden wir einen Trick an. Wir schicken den Lichtstrahl von draußen ins Wasser hinein und stellen im Wasser einen Spiegel so auf, dass er vom Lichtstrahl senkrecht getroffen wird. Der Lichtstrahl wird also im Wasser in sich selbst zurückgeworfen. Was passiert nun mit dem zurücklaufenden Strahl an der Wasseroberfläche? Der Versuch zeigt es eindeutig: Er wird wieder zurückgebrochen – in genau die Richtung, aus der er gekommen war, Abb. 21.39.

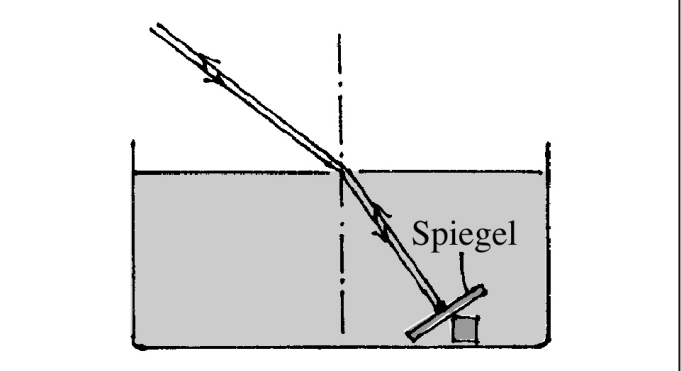


Abb. 21.39
Beim Austritt aus dem Wasser wird der Lichtstrahl wieder zurückgeknickt.

Also: Beim Eintritt ins Wasser wird das Licht zum Einfallslot hin, beim Austritt aus dem Wasser vom Einfallslot weg gebrochen.

Das Entsprechende gilt für andere durchsichtige Stoffe. Wir können daraus auch schließen, was mit einem Lichtstrahl passiert, der durch eine Glasplatte schräg hindurchläuft, Abb. 21.40. Beim Eintritt wird er zum Lot hin, beim Austritt vom Lot weg gebrochen. Insgesamt wird er also einfach parallel versetzt.

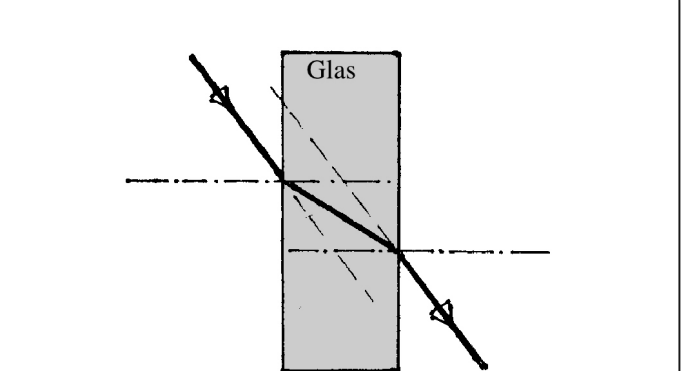


Abb. 21.40
Beim Durchqueren einer Glasplatte wird der Lichtstrahl parallel versetzt.

Was geschieht aber mit Licht, das nicht aus der Luft, sondern aus einem anderen Medium in Glas eintritt? In einem speziellen Fall ist die Frage leicht zu beantworten: für Licht, das von Glas kommt und in Glas eintritt, Abb. 21.41. Beim Austritt aus dem linken Glasklotz wird es vom Lot weg geknickt. Sofort darauf, beim Eintritt in den rechten Klotz wird es wieder in die alte Richtung zurück geknickt. Insgesamt passiert ihm also gar nichts.

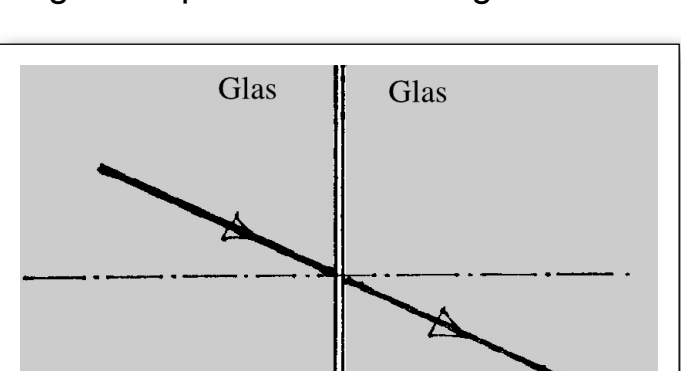


Abb. 21.41
Beim Übergang von Glas in Glas ändert sich die Richtung des Lichts nicht.

Wir wissen also inzwischen:

Übergang Luft → Glas: starke Brechung;

Übergang Glas → Glas: keine Brechung.

Der Übergang Wasser → Glas liegt gerade zwischen diesen beiden Fällen: Das Licht wird nicht so stark gebrochen, wie wenn es aus der Luft kommt, aber stärker als wenn es aus Glas kommt. Wir haben also:

Übergang Wasser → Glas: schwache Brechung.

Wir sagen von den verschiedenen durchsichtigen Stoffen, sie haben eine unterschiedliche *optische Dichte*. Von den drei Stoffen in Tabelle 21.1 ist Diamant der optisch dichteste. Es folgt Glas und dann Wasser. Eine noch geringere optische Dichte hat Luft. Und eine noch etwas geringere hat der luftleere Raum, das Vakuum. Der Unterschied der optischen Dichten von Luft und Vakuum ist aber sehr gering.

Wir haben also die Regel:

Beim Übergang von einem Material A in ein Material B wird das Licht zum Lot hin gebrochen, wenn die optische Dichte von B größer ist als die von A. Es wird vom Lot weg gebrochen, wenn die optische Dichte von B kleiner ist als die von A.

Die optische Dichte von Luft (und aller anderen Gase) hängt übrigens von ihrer gewöhnlichen Dichte (Masse pro Volumen) ab. Die gewöhnliche Dichte kann man leicht ändern, indem man die Luft erwärmt. Darauf beruht der in Abb. 21.42 dargestellte Versuch.

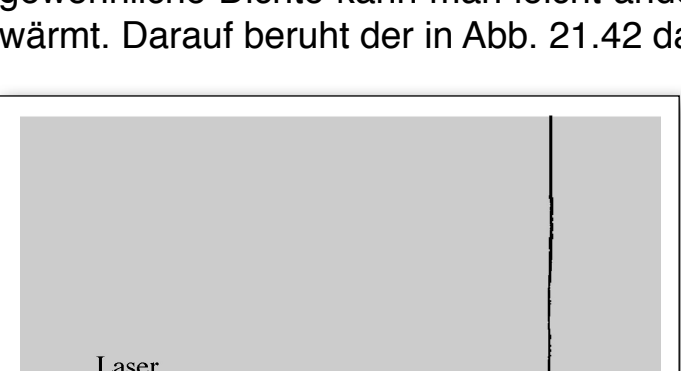


Abb. 21.42
Die heiße Luft über der Kochplatte hat eine geringere Dichte als die Luft der Umgebung. Damit ist auch ihre optische Dichte geringer.

Ein Laserstrahl läuft sehr dicht über einer heißen Kochplatte entlang und trifft irgendwo auf die Wand. Pustet man nun etwas über die Kochplatte hinweg (Achtung! Nicht in den Strahl schauen!), so bewegt sich der Lichtfleck an der Wand. Es sieht so aus, als blase man den Laserstrahl weg. Tatsächlich bläst man nur die heiße Luft weg. Damit verschwinden die Übergänge zwischen heißer und kalter Luft, die eine geringe Brechung des Laserstrahls verursacht hatten.

Die unterschiedliche optische Dichte und die damit verbundene Lichtbrechung ist auch die Ursache dafür, dass Gegenstände zu flimmern scheinen, wenn man sie dicht über einen Heizkörper hinweg betrachtet.

Aufgaben

1. Stelle den Zusammenhang zwischen α und β für Wasser, Glas und Diamant in einem α - β -Koordinatensystem dar.

2. Abb. 21.43a zeigt einen Lichtstrahl, der aus Luft in Glas eintritt. Zeichne den gebrochenen Strahl ein.

In Abb. 21.43b tritt wieder ein Lichtstrahl von Luft in Glas über. Hier ist aber nur der gebrochene Strahl dargestellt. Zeichne den einfallenden Strahl ein.

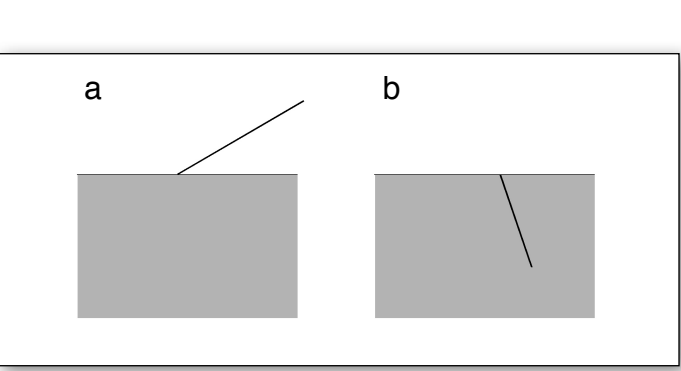


Abb. 21.43
Zu Aufgabe 2

21.9 Das Prisma

Wir hatten im vorigen Abschnitt gesehen: Ein Lichtstrahl, der auf eine Glasplatte (mit parallelen Oberflächen) trifft, wird parallel zur Seite versetzt, Abb. 21.40. Wir ändern nun die Situation etwas ab. Der Lichtstrahl soll einen Glaskörper durchqueren, der durch ebene Flächen begrenzt wird, die nicht mehr parallel zueinander liegen. Der einfachste Körper dieser Art ist ein Prisma mit dreieckiger Grundfläche, Abb. 21.44.

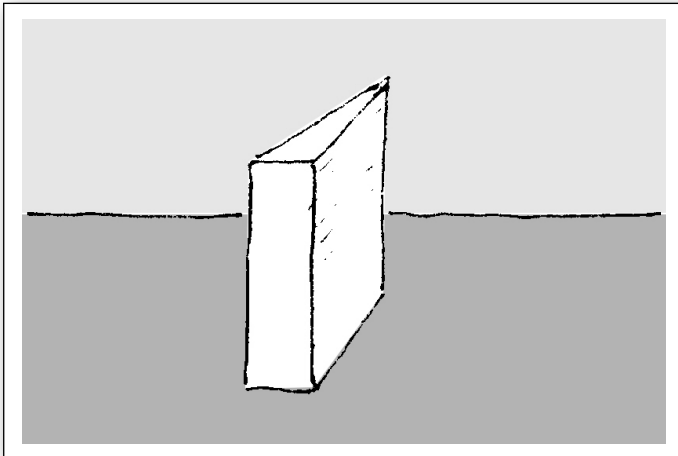


Abb. 21.44

Prisma mit dreieckiger Grundfläche

Der Strahl wird zweimal gebrochen: beim Eintritt ins Prisma und beim Austritt aus dem Prisma. Alle Strahlen und Einfallslote liegen in einer Ebene, die parallel ist zur Grundfläche des Prismas. Diese Ebene ist in Abb. 21.45 dargestellt.

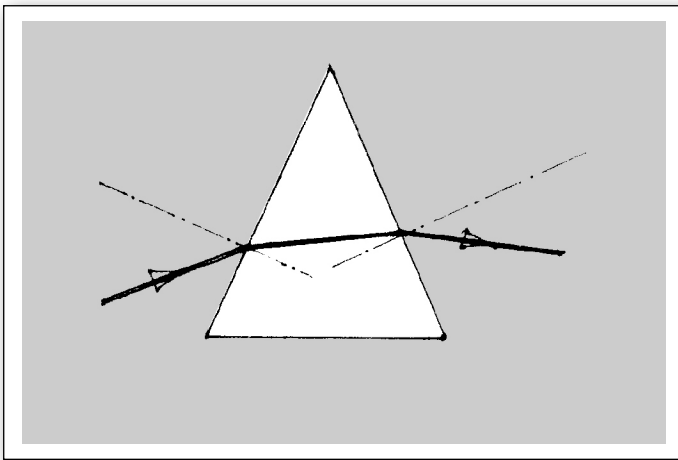


Abb. 21.45

Nach zweimaliger Brechung des Lichtstrahls bleibt eine Nettoablenkung übrig.

Man sieht, dass das Licht, welches das Prisma verlässt, nicht dieselbe Richtung hat wie das eintretende Licht (anders als bei der Glasplatte). Es erfährt vielmehr eine Nettoablenkung.

Wie stark diese Gesamtablenkung ist, hängt davon ab, unter welchem Winkel das Licht auf das Prisma trifft.

Wir hatten früher schon davon Gebrauch gemacht, dass ein Prisma Licht unterschiedlicher Wellenlänge (verschiedene Lichtsorten) verschieden stark ablenkt.

Aufgaben

1. Ein Glasprisma hat als Grundfläche ein gleichseitiges Dreieck, Abb. 21.46. Von links fällt Licht einer einheitlichen Richtung auf das Prisma. Bestimme die Richtung des auslaufenden Lichts.
2. Zwei gleich gebaute Prismen werden hintereinander aufgestellt, Abb. 21.47. In welche Richtung läuft das Licht, nachdem es beide Prismen durchquert hat?

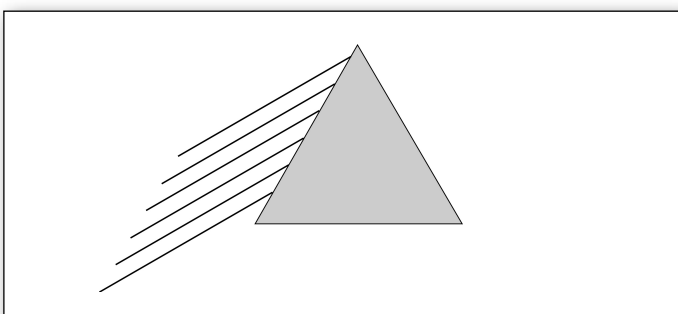


Abb. 21.46

Zu Aufgabe 1

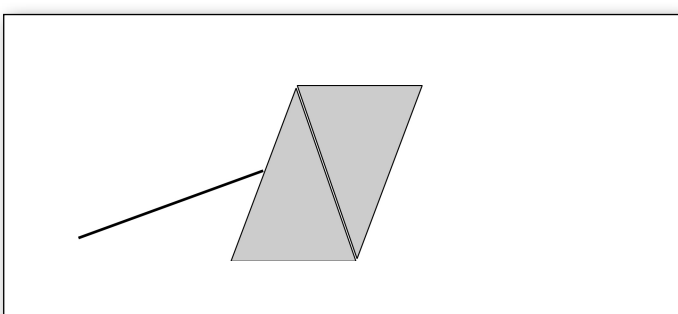


Abb. 21.47

Zu Aufgabe 2

21.10 Totalreflexion

Tabelle 21.1 zeigt, dass ein Lichtstrahl, der unter einem Winkel α von fast 90° in Wasser eintritt, im Wasser unter dem Winkel $48,8^\circ$ gegen das Lot weiterläuft. Diese Zahlen bedeuten auch, dass ein Lichtstrahl, der unter dem Winkel $48,8^\circ$ vom Innern des Wassers auf die Wasseroberfläche trifft, außerhalb des Wassers praktisch parallel zur Wasseroberfläche läuft. Was passiert aber mit einem Lichtstrahl, der aus dem Innern des Wassers noch flacher gegen die Oberfläche läuft? Er kann gar nicht mehr austreten. Er wird ins Innere zurückreflektiert, und zwar so, wie es das Reflexionsgesetz verlangt, Abb. 21.48. Man nennt diese Erscheinung *Totalreflexion*.

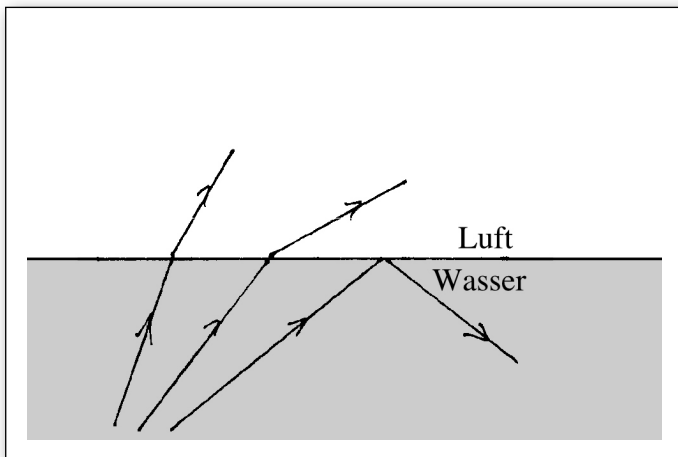


Abb. 21.48

Licht, das von innen auf die Wasseroberfläche trifft, wird totalreflektiert wenn der Einfallswinkel größer als $48,8^\circ$ ist.

Diese Reflexion setzt aber nicht plötzlich ein, wenn der Winkel β den Wert $48,8^\circ$ erreicht. Es wird ja stets nur ein Teil des Lichts an der Grenzfläche gebrochen; der Rest wird reflektiert. Und je steiler das Licht einfällt, je kleiner der Winkel gegen das Lot ist, desto weniger wird reflektiert.

Eine wichtige Anwendung der Totalreflexion stellen die Lichtleiter dar. Ein Lichtleiter ist eine lange flexible Glasfaser. Licht, das am einen Ende unter kleinem Winkel gegen das Lot eintritt, Abb. 21.49, kann den Lichtleiter seitlich nicht verlassen, es wird totalreflektiert. Es läuft also im Zickzack durch den Lichtleiter und folgt dabei seinen Krümmungen. Am anderen Ende tritt es wieder aus.

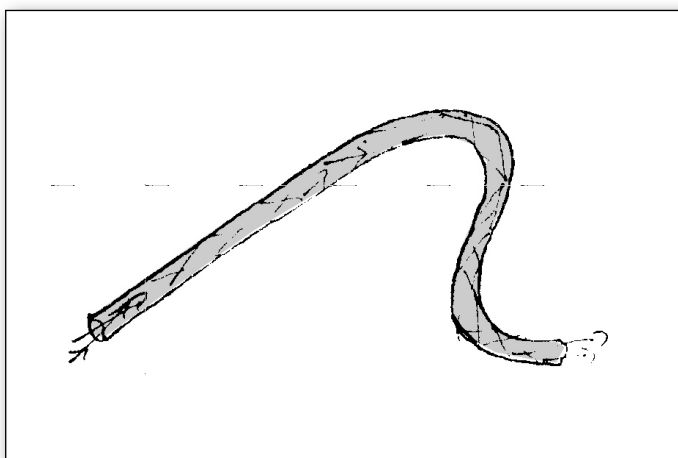


Abb. 21.49

Lichtleiter

Das Bemerkenswerte an der technischen Realisierung von Lichtleitern ist, dass man es geschafft hat, Glassorten herzustellen, in denen das Licht mehrere hundert Meter ohne große Verluste durch Absorption laufen kann. Bedenke, dass von dem Licht, das auf die Meeresoberfläche fällt, in etwa 300 m Tiefe praktisch nichts mehr übrig ist. In dieser Tiefe ist es stockfinster – auch wenn das Meer sehr sauber ist.

Aufgaben

1. Wie ist der weitere Verlauf des Lichts in Abb. 21.50? Berücksichtige, dass manchmal ein Teil des Lichts gebrochen, ein anderer Teil reflektiert wird.
2. Ein Lichtstrahl trifft auf einen zylindrischen Glasstab, Abb. 21.51. Zeichne den weiteren Verlauf des Strahls.

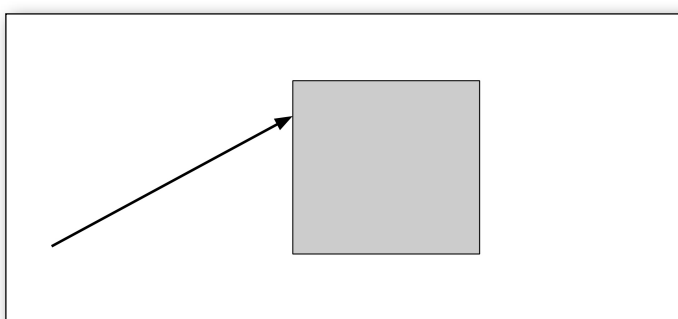


Abb. 21.50

Zu Aufgabe 1

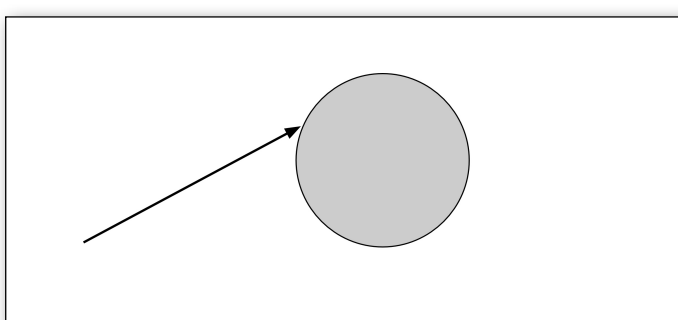


Abb. 21.51

Zu Aufgabe 2

22

Die optische Abbildung

22.1 Was ist ein Bild?

Das Licht war uns begegnet als Energieträger. Mit dem Licht kommt Energie von der Sonne zur Erde. Ohne Sonnenlicht wäre es auf der Erde so kalt, dass kein Leben möglich wäre.

Das Licht war uns auch begegnet als Datenträger. Sowohl in der Natur als auch in der Technik wird es als Datenträger genutzt. Menschen und Tiere bekommen über ihre Augen mit dem Licht große Datenmengen. Sie brauchen diese Daten, um sich in der Welt zu rechtzufinden. Technisch wird das Licht als Datenträger benutzt:

- in Lichtleitern, um große Datenmengen von einer Stelle zu einer anderen zu transportieren;
- um die Musik von einer CD herunterzulesen.

Es gibt aber noch einen weiteren technischen Bereich, der es mit dem Licht als Datenträger zu tun hat, und der so groß und wichtig ist, dass er sich zu einem eigenen Fachgebiet entwickelt hat: die *Optik*. Wichtigstes Ziel der Optik ist es, so genannte *optische Abbildungen* zu machen. Bevor wir beginnen, optische Abbildungen zu untersuchen, wollen wir die Frage beantworten, was ein Bild ist. Die Antwort darauf ist nicht so einfach, wie du vielleicht denkst.

Ist ein Bild ein Gegenstand, ein Ding? Es scheint so. Ein Gemälde, ein Foto, eine Zeichnung zum Beispiel sind Bilder. Diese Bilder bleiben Bilder, auch wenn man sie ins Dunkle bringt, so dass man sie nicht mehr sehen kann. Das Passbild bleibt Passbild, auch wenn der Pass in der Tasche steckt.

Wir betrachten nun das Bild, das an der Wand entsteht, wenn man ein Dia oder ein Video projiziert. Wenn man jetzt alles Licht ausschaltet – auch das des Projektors –, so verschwindet das Bild von der Wand. Niemand käme auf die Idee zu sagen, das Bild sei an der Wand geblieben.

Trotz dieses Unterschiedes hat das flüchtige Projektionsbild etwas Wesentliches gemeinsam mit dem gegenständlichen Bild, etwa mit einem fotografierten Papierbild – vorausgesetzt allerdings, das Papierbild wird beleuchtet. Und es hat auch etwas Wesentliches gemeinsam mit dem ebenso flüchtigen Bild auf dem Bildschirm des Fernsehers.

Wir wollen drei Bildsorten miteinander vergleichen: das Papierbild, das projizierte Bild und das Fernsehbild.

Damit das Problem übersichtlicher wird, nehmen wir an, der abgebildete „Gegenstand“ bestehe nur aus einigen leuchtenden Punkten in einer dunklen Umgebung. Die leuchtenden Punkte sollen sich in einer einzigen Ebene befinden. Diese Ebene ist in Abb. 22.1 von der Seite dargestellt.

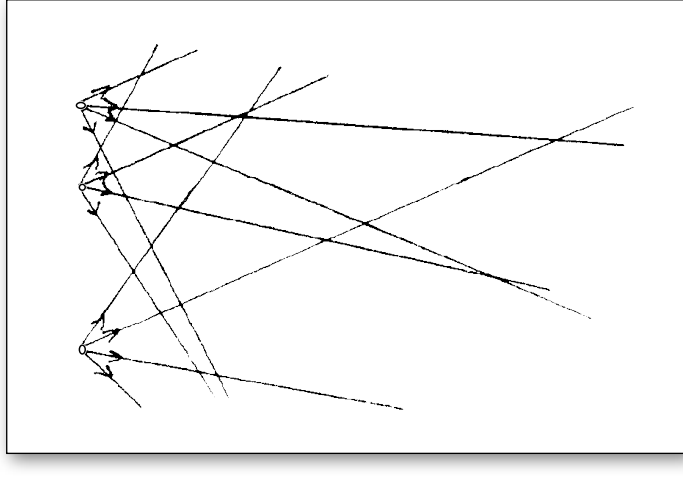


Abb. 22.1
Lichtverteilung vor einem Gegenstand, der nur aus drei leuchtenden Punkten besteht

Als Erstes betrachten wir das Licht, das von diesem „Gegenstand“ selbst ausgeht: Von jedem der Punkte gehen Lichtstrahlen in die verschiedensten Richtungen weg. Von den anderen Stellen kommt kein Licht.

Wir betrachten nun ein Papierbild, das diese leuchtenden Punkte zeigt, Abb. 22.2. Das Bild wird von vorn her beleuchtet. Das einfallende Licht wird an allen Stellen des Papiers absorbiert, außer an den Stellen, wo sich die Bilder der hellen Punkte befinden: Von dort wird es zurückgeworfen und dabei gestreut. Die Verteilung des vom Papierbild weglaufenden Lichts ist dieselbe wie die des Lichts, das von den echten leuchtenden Punkten in Abb. 22.1 wegläuft.

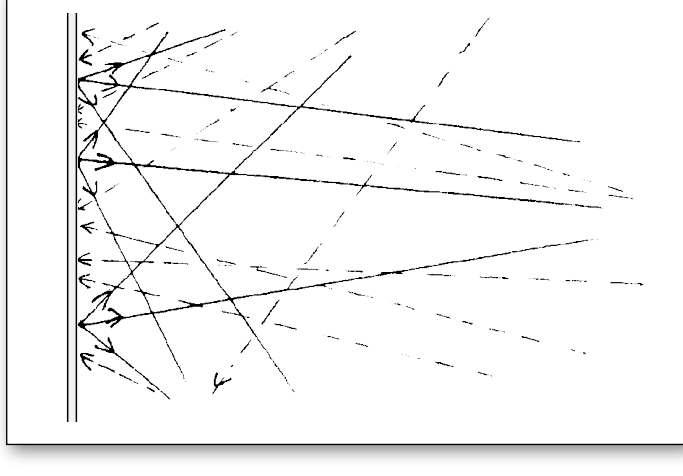


Abb. 22.2
Lichtverteilung vor einem Papierbild des „Gegenstandes“ von Abb. 22.1. Das einfallende Licht ist gestrichelt dargestellt.

Du siehst, dass es wichtig ist, dass das Licht, das zurückgeworfen wird, gleichzeitig gestreut wird. Würde es reflektiert, so sähe man die hellen Punkte auf dem Bild nur aus einer einzigen Richtung.

Nun zum Projektionsbild, Abb. 22.3. Der Schirm selbst absorbiert nirgends. Er wirft alles Licht, das auf ihn trifft, zurück und streut es dabei. Es trifft aber nur an wenigen Stellen Licht auf den Schirm. Also wird auch nur von dort aus Licht zurückgeworfen. Die Verteilung des vom Schirm weglaufenden Lichts ist wieder dieselbe wie die des Originalgegenstandes in Abb. 22.1.

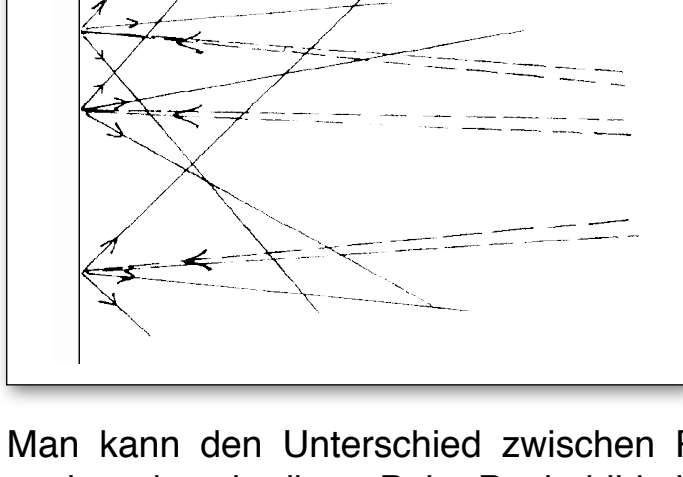


Abb. 22.3
Lichtverteilung vor einem Projektionsbild des „Gegenstandes“ von Abb. 22.1. Das einfallende Licht ist gestrichelt dargestellt.

Man kann den Unterschied zwischen Papier- und Projektionsbild auch so beschreiben: Beim Papierbild sind die Daten im Papier gespeichert. Sie bleiben dort, auch wenn sich das Bild im Dunkeln befindet. Bei der Projektion ist der Datenspeicher der Computer, von dem das Bild kommt. Während der Projektion werden diese Daten herausgelesen. (Bei einem unbewegten Bild, werden immer und immer wieder dieselben Daten herausgelesen.)

Wir betrachten schließlich noch das Fernsehbild. Im Gegensatz zum Papierbild und zum Projektionsbild wird der Bildschirm nicht beleuchtet. Er leuchtet selbst. Wieder nehmen wir an, dass das Bild des „Gegenstandes“ von Abb. 22.1 dargestellt ist. Diesmal gehen einfach von einigen Stellen des Bildschirms Lichtstrahlen in alle Richtungen weg, Abb. 22.4. Wieder ist also die Lichtverteilung dieselbe wie die des Originalbildes, Abb. 22.1.

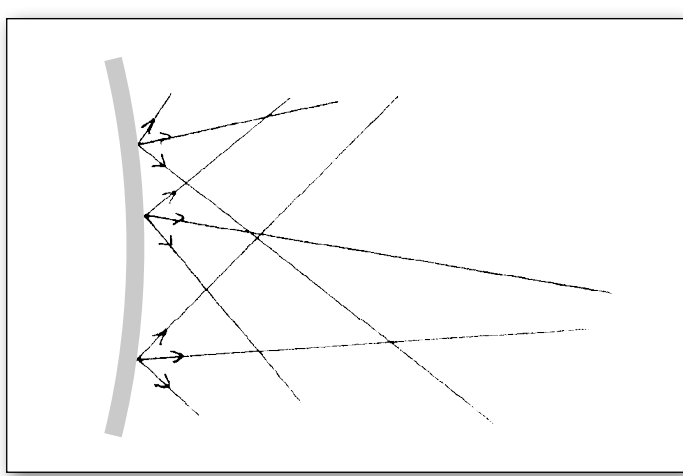


Abb. 22.4
Lichtverteilung vor einem Fernsehbild des „Gegenstandes“ von Abb. 22.1

Bilder haben die Eigenschaft, dass sie flach sind oder „zweidimensional“. Sie haben keine Tiefe.

Unser primitiver Gegenstand, die nebeneinander liegenden Punkte, stellen auch ein zweidimensionales Gebilde dar, es hat auch keine Tiefe. Wie sieht nun die Lichtverteilung bei einem Gegenstand aus, der in der dritten Dimension ausgedehnt ist, der eine Tiefe hat? Das ist dir sicher bekannt, denn du weißt, wie man ein dreidimensionales Haus auf ein zweidimensionales Blatt Papier zeichnet. Man schiebt es in der dritten Dimension sozusagen zusammen. Man drückt es in Gedanken platt.

Wieder betrachten wir ein vereinfachtes Modell. Abb. 22.5 zeigt die Lichtverteilung des Originals, von der Seite gesehen. Die leuchtenden Punkte liegen hier nicht mehr in einer einzigen Ebene. Die Punkte A, B und C liegen in der Ebene 1, Punkt D liegt in der Ebene 2.

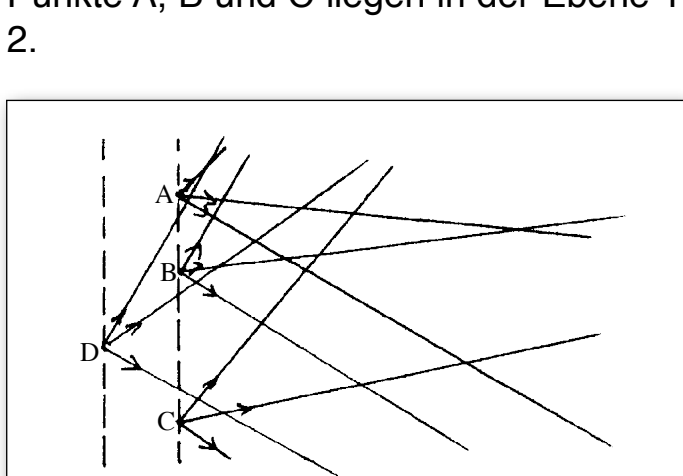


Abb. 22.5
Die Gegenstandspunkte liegen nicht mehr in einer einzigen Ebene.

Wir untersuchen wieder ein Bild dieser Punkte, zum Beispiel ein Foto, Abb. 22.6. Die Punkte sind beim Fotografieren in eine einzige Ebene zusammengeschoben worden. Man sieht, dass die Verteilung des Lichts, das vom Bild kommt, nicht mehr dieselbe ist wie die des Lichts, das vom Original kommt. Sie ist bei der dreidimensionalen Wirklichkeit anders als beim zweidimensionalen Bild.

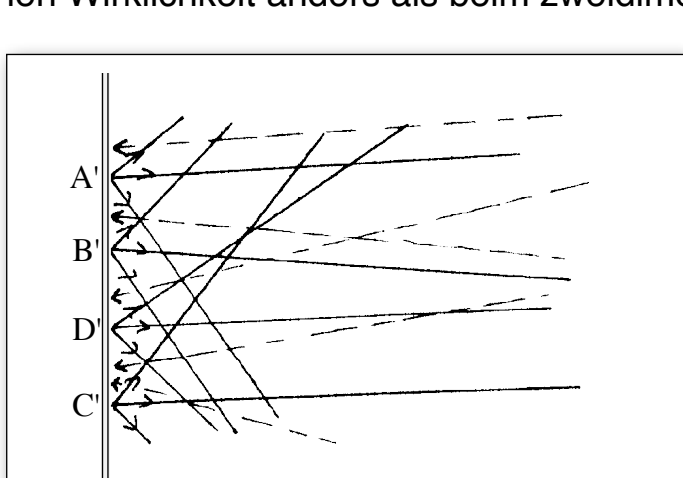


Abb. 22.6
Bild des „Gegenstandes“ von Abb. 22.5. Die leuchtenden Punkte sind in eine einzige Ebene zusammengeschoben worden.

Obwohl die Lichtverteilung beim Bild anders ist als beim echten Gegenstand, erkennen wir den Gegenstand auf dem Bild noch sehr gut. Andererseits sehen wir aber dem Bild deutlich an, dass es ein Bild ist. Wir werden es mit dem echten Gegenstand sicher nicht verwechseln.

Es gibt Bilder, die die Lichtverteilung auch eines dreidimensionalen Gegenstandes ganz korrekt wiederherstellen, Abb. 22.7. Man nennt sie Hologramme. Damit sie die richtige Lichtverteilung liefern, muss man sie allerdings mit Licht einer einzigen Richtung beleuchten. Am besten eignet sich hierzu das Licht eines Lasers.

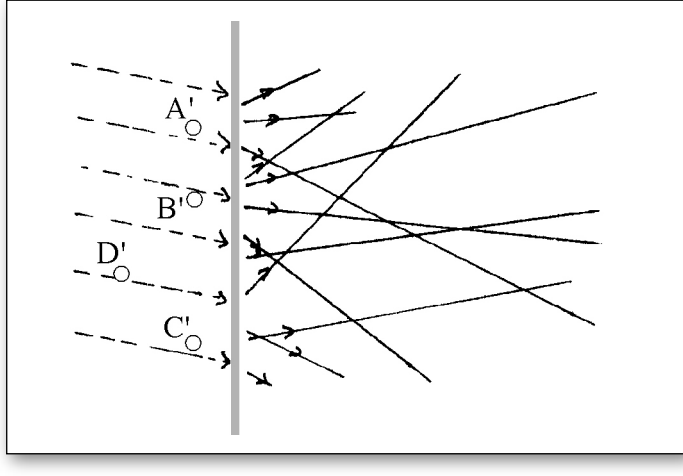


Abb. 22.7
Bei einem Hologramm ist die Lichtverteilung dieselbe wie beim Originalgegenstand.

Aufgaben

1. Vielleicht ist dir aufgefallen, dass es schwer ist, das Bild auf einem Dia zu erkennen, wenn man das Dia einfach in die Hand nimmt und betrachtet. Woran liegt das? Wie muss man das Dia halten, damit man das Bild gut sieht?
2. Wäre es nicht besser, ein Video mit dem Beamer auf einen Spiegel zu projizieren, statt auf eine Leinwand? Was würde man sehen?

22.2 Die Lochkamera

Sie ist das einfachste Gerät, mit dem man eine optische Abbildung machen kann: Ein Kasten mit einem kleinen Loch in der Mitte der einen Seite. Die dem Loch gegenüberliegende Seite ist eine Mattscheibe oder Pergamentpapier, d. h. ein Material, das Licht durchlässt und dabei streut. Auf der Mattscheibe erkennt man ein Bild der Gegenstände, die sich außerhalb des Kastens, auf der Seite des Loches befinden. Wie kommt das Bild zustande?

Der Übersichtlichkeit halber stellen wir uns wieder vor, die „Landschaft“, die wir abbilden wollen, bestehe nur aus drei leuchtenden Punkten, die in einer Ebene liegen. Abb. 22.8a zeigt diese Ebene von der Seite gesehen und Licht, das von den Punkten ausgeht.

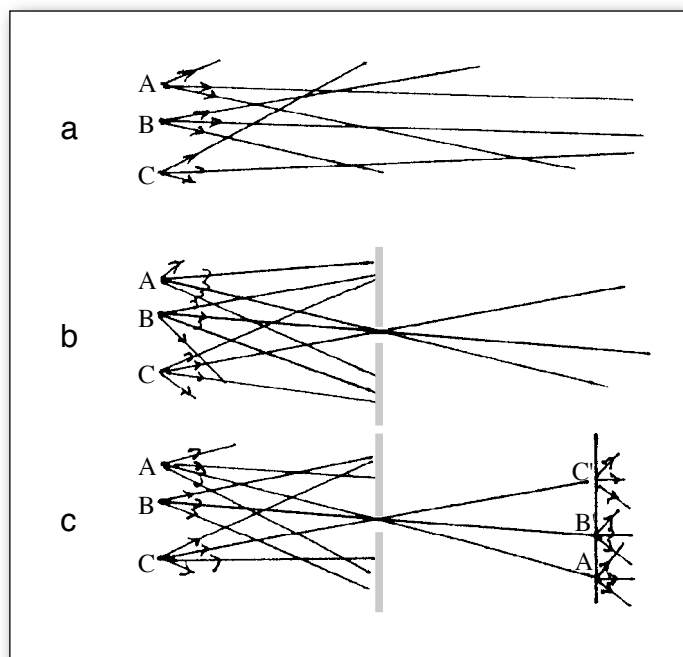


Abb. 22.8

Dem Licht, das vom Gegenstand kommt, wird zuerst eine Lochblende und dann eine Mattscheibe in den Weg gestellt.

Wir stellen diesem Licht als Erstes eine Lochblende in den Weg, Abb. 22.8b. Von dem nach rechts laufenden Licht lässt die Blende nur drei dünne Lichtbündel durch.

Diesen Lichtbündeln stellen wir nun noch eine Mattscheibe in den Weg, Abb. 22.8c. Die Mattscheibe wird von dem Licht, das durch die Lochblende gekommen ist, an drei Stellen getroffen. Dieses Licht wird von der Mattscheibe gestreut. Wir haben jetzt auf der Mattscheibe drei leuchtende Punkte A', B' und C'. A' ist das Bild von A, B' ist das Bild von B und C' ist das Bild von C. Die Lichtverteilung ist dieselbe wie die der drei leuchtenden Punkte A, B und C, nur liegen die Bildpunkte in umgekehrter Reihenfolge. Wir können auch sagen, das Bild stehe auf dem Kopf.

In unserem Beispiel lagen die leuchtenden Gegenstandspunkte in einer einzigen Ebene, und die Mattscheibe der Lochkamera lag parallel zu dieser Ebene. Der Gegenstand war flach, genauso flach wie die Mattscheibe. Wir nehmen nun an, der Gegenstand habe „Tiefe“: Einer der Gegenstandspunkte liege weiter hinten, Abb. 22.9. Da die Mattscheibe flach ist, bekommen wir natürlich wieder ein flaches Bild. Unsere „Landschaft“ wurde wieder „plattgedrückt“.

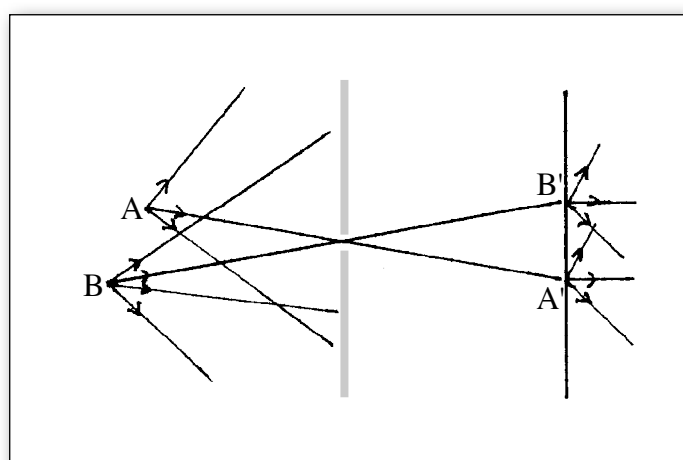


Abb. 22.9

Die Gegenstandspunkte liegen nicht mehr in einer Ebene.

Eine besonders eindrucksvolle Variante der Lochkamera ist die *Camera obscura*: Man verdunkelt das Zimmer, lässt aber in der Fensterverdunklung ein kleines Loch. Man sieht nun auf der dem Loch gegenüberliegenden weißen Wand ein Bild der Landschaft außerhalb des Zimmers, Abb. 22.10.

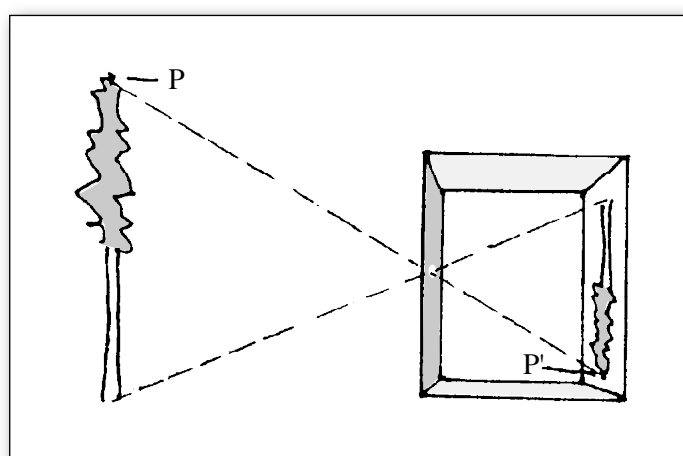


Abb. 22.10

Camera obscura. Das Bild wird vom Innern der „Lochkamera“ her betrachtet.

Wieder sorgt das Loch dafür, dass auf jede Stelle der Wand nur Licht aus einer bestimmten Richtung fällt. So trifft das Licht der Baumspitze P nur an die Stelle P' der Wand. Die weiße Wand selbst ist nötig, um das Licht zu streuen.

Aufgaben

1. Warum sieht man kein Bild, wenn man bei einer Lochkamera statt der Mattscheibe eine gewöhnliche Glasscheibe benutzt?
2. Was sieht man an der Rückwand einer Camera obscura, wenn diese Wand ein Spiegel ist? Der abgebildete Gegenstand sei ein einziger leuchtender Punkt. Wie ist die Lichtverteilung?

22.3 Der Zusammenhang zwischen Gegenstandsgröße und Bildgröße

Abb. 22.11 zeigt schematisch die Abbildung eines Gegenstandes mit einer Lochkamera.

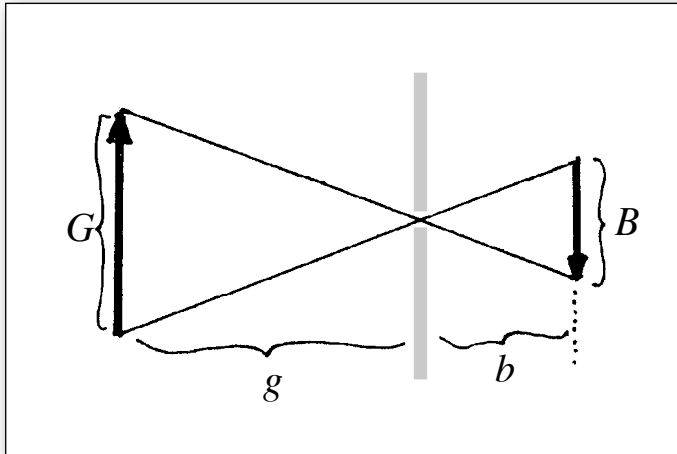


Abb. 22.11

G ist die Gegenstandsgröße, B die Bildgröße, g die Gegenstandsweite und b die Bildweite.

Wir nennen G die Gegenstandsgröße und B die Bildgröße. Der Abstand g des Gegenstandes von der Lochblende heißt Gegenstandsweite, der Abstand b des Bildes von der Blende Bildweite. Für den Zusammenhang zwischen den vier Größen G , B , g und b gilt eine einfache Beziehung:

$$\frac{G}{B} = \frac{g}{b}$$

Falls du aus dem Mathematikunterricht die Strahlensätze kennst, kannst du diese Gleichung aus Abb. 22.11 direkt ablesen. Kennst du die Strahlensätze nicht, so kannst du dich durch Ausprobieren von der Gültigkeit der Gleichung überzeugen.

In Abb. 22.11 zum Beispiel ist

$$G = 30 \text{ mm}$$

$$B = 15 \text{ mm.}$$

Daraus folgt $G/B = 2$.

Außerdem liest man ab

$$g = 40 \text{ mm}$$

$$b = 20 \text{ mm.}$$

Daraus ergibt sich $g/b = 2$. Die Gleichung $G/B = g/b$ ist also erfüllt.

Aufgaben

1. Ein Kirchturm wird mit einer Lochkamera abgebildet. Der Kirchturm befindet sich in 100 m Abstand von der Kamera. Der Abstand zwischen Lochblende und Schirm beträgt 16 cm. Das Bild des Kirchturms ist 8 cm hoch. Wie hoch ist der Kirchturm?
2. Der Kölner Dom ist 157 m hoch. Mit einer 20 cm langen Lochkamera erzeugst du ein Bild, auf dem die Türme 2 cm hoch sind. Wie weit ist der Dom entfernt?
3. Ein acht Meter hoher Baum liefert in einer Camera obscura ein ein Meter hohes Bild. Wie hoch ist ein zweiter Baum, der dicht neben dem ersten steht, und dessen Bild einen halben Meter groß ist?

22.4 Verbesserung der Lochkamera

Wir bauen eine Camera obscura. Auf der Wand ist das Bild des gegenüberliegenden Hauses zu sehen. Aber das Bild ist sehr dunkel. „Das lässt sich leicht ändern“, denkst du vielleicht, „wir machen das Loch einfach größer.“ Wir probieren es aus. Tatsächlich – das Bild wird heller. Allerdings passiert gleichzeitig etwas Unerwünschtes: Das Bild wird unscharf. Warum es das wird, erkennst du an Hand von Abb. 22.12.

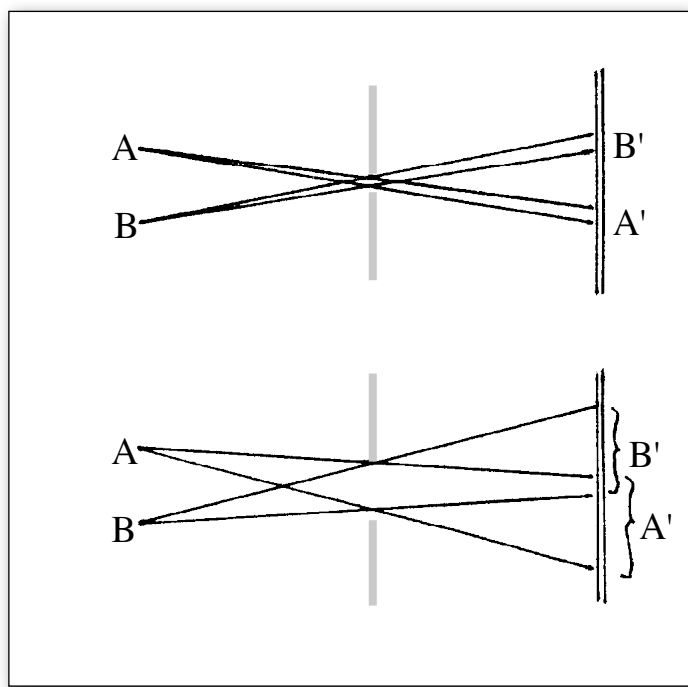


Abb. 22.12
Kleines Loch: Die Bilder sind voneinander getrennt. Großes Loch: Die Bilder überlappen sich.

Im oberen Teilbild ist das Loch klein. Das Bild der beiden Gegenstandspunkte A und B sind zwei kleine leuchtende Flecke A' und B'. Im unteren Teilbild ist das Loch groß. Die „Bilder“ von A und B sind jetzt zwei Flecke, die so groß sind, dass sie sich etwas überlappen. Man kann A' und B' nicht mehr deutlich voneinander trennen. Das Bild der Punkte A und B ist *unscharf*.

Wir können allgemein schließen:

Je größer das Loch der Lochkamera ist, desto heller ist das Bild, desto unschärfer ist es aber auch.

Nur durch Vergrößern des Loches können wir also unser Problem nicht lösen. Wir brauchen eine bessere Idee.

Wir beginnen zunächst wieder mit einem kleinen Loch, und erhalten ein scharfes, aber dunkles Bild. Wir machen nun in einiger Entfernung von dem kleinen Loch ein zweites kleines Loch. Was sieht man auf der Wand? Ein zweites Bild, Abb. 22.13a. Oder besser: dasselbe Bild zweimal. Die beiden Bilder sind gegeneinander versetzt.

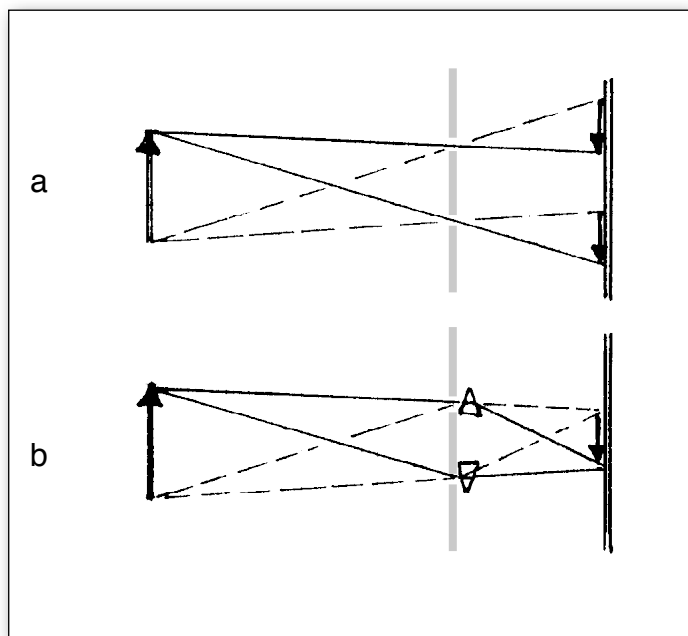


Abb. 22.13
(a) Die Lochkamera mit zwei Löchern erzeugt zwei Bilder.
(b) Die beiden Bilder werden mit Hilfe von Prismen zur Deckung gebracht.

Wir sind der Lösung unseres Problems schon näher. Wir brauchen die beiden Bilder nur noch zu verschieben, so dass sie zur Deckung kommen. Wir müssen die Lichtstrahlen, die die beiden Bilder erzeugen, zur Mitte hin knicken. Wie man das anstellen kann, weißt du: mit Prismen, Abb. 22.13b. Das Ergebnis ist ein Bild, das doppelt so hell ist wie das Bild eines einzigen Loches. Und das Bild ist scharf!

Mit diesem Vorteil haben wir uns aber auch einen Nachteil eingehandelt. Bei unserer ersten Lochkamera – der mit dem einen Loch – haben wir immer ein scharfes Bild, egal in welchem Abstand von der Blende der Schirm steht. Dieser Abstand wirkte sich nur auf die Bildgröße aus, Abb. 22.14a.

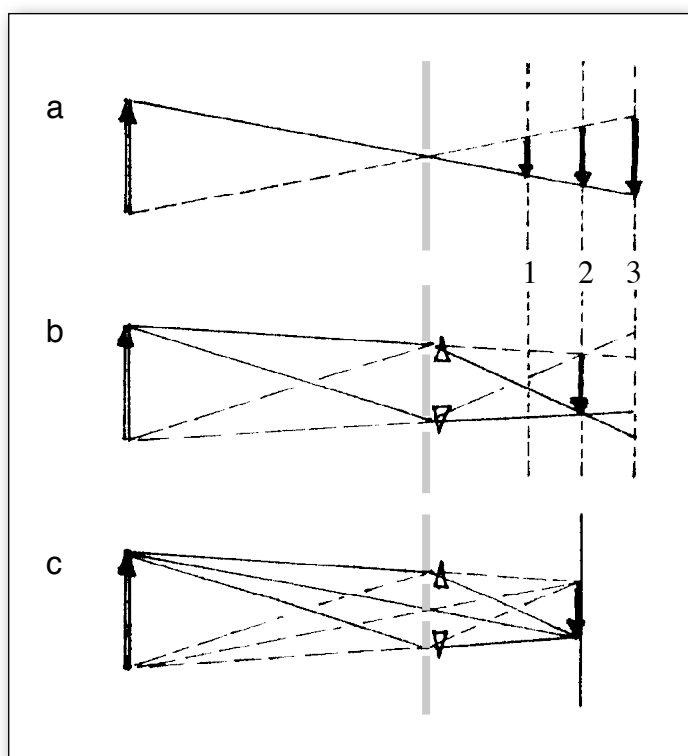


Abb. 22.14
(a) Bei der Ein-Loch-Kamera wirkt sich der Abstand des Schirms nur auf die Bildgröße aus.
(b) Bei der Zwei-Loch-Kamera muss der Schirm in einer bestimmten Entfernung von der Blende stehen, damit ein scharfes Bild entsteht.
(c) Vor dem Loch in der Mitte braucht kein Prisma zu stehen.

Das ist bei der Doppel-Lochkamera anders. Die beiden Bilder in Abb. 22.13b fallen nur dann zusammen, wenn sich der Schirm in einem bestimmten Abstand von der Blende befindet. In Abb. 22.14b sind drei verschiedene Schirmpositionen eingezeichnet. Nur wenn der Schirm in Position 2 steht, fallen die beiden Bilder zusammen. Steht er weiter vorn, in Position 1, oder weiter hinten, in Position 3, so fallen die beiden Bilder nicht zusammen.

In Abb. 22.14c wurde in der Mitte zwischen den beiden Löchern noch ein drittes Loch gemacht. Vor dieses brauchen wir kein Prisma zu stellen. Das entsprechende Bild fällt von selbst mit den beiden anderen Bildern zusammen. Wir erkennen an den Lichtstrahlen, die durch das mittlere Loch laufen, dass nach wie vor die Gleichung

$$\frac{G}{B} = \frac{g}{b}$$

gelten muss.

Aufgabe

Statt mit Prismen kann man Licht auch mit Spiegeln ablenken. Wie könnte eine „Zwei-Loch-Kamera“ aussehen, die statt Prismen Spiegel verwendet? Wie würde das Gegenstück zu einer Lochkamera mit vielen Prismen aussehen? Was für ein Spiegel entsteht, wenn man alle Einzelspiegel zu einem zusammenhängenden Spiegel zusammensetzt?

22.5 Die Linse

Wir wollen das Bild noch heller haben. Es ist klar, wie das zu erreichen ist. Wir machen noch mehr Löcher in unsere Blende und setzen vor jedes Loch ein geeignetes Prisma.

Schließlich können wir aber auch ein ganz großes Loch machen, wie wir es schon einmal versucht hatten. Wir müssen nur die ganze Fläche des Lochs mit Prismen bedecken, Abb. 22.15.

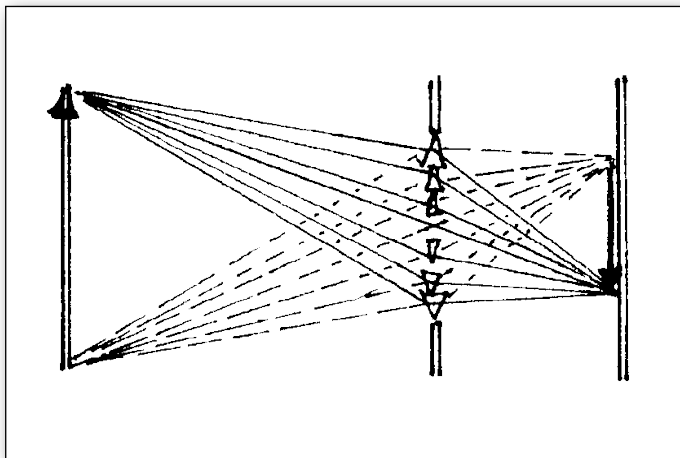


Abb. 22.15

Die ganze Fläche der großen Öffnung ist mit Prismen überdeckt.

Das Licht, das in die Mitte des großen Lochs fällt, braucht gar nicht abgelenkt zu werden. Je weiter außen aber das Licht ankommt, desto stärker muss es zur Mitte hin geknickt werden. Die Prismen werden also von außen zur Mitte hin immer flacher. Abb. 22.16a zeigt, wie die Prismen von der Seite aussehen. Das Loch erstreckt sich aber nicht nur in senkrechter Richtung, sondern auch nach der Seite. Die Prismen werden also, wenn man vom Lochrand zur Mitte geht, immer flacher.

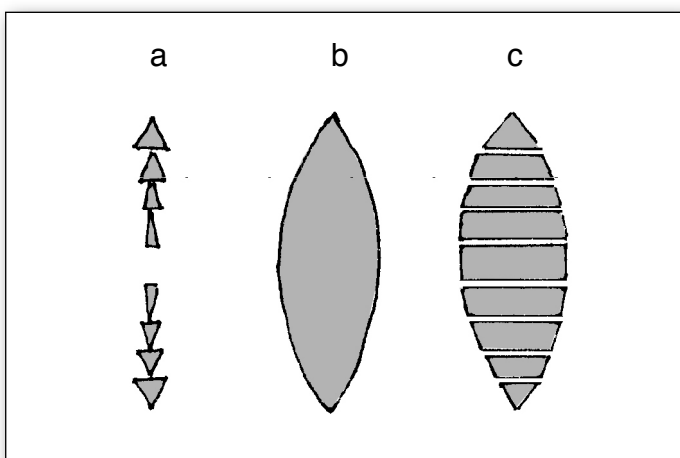


Abb. 22.16

Statt vieler Einzelprismen (a) kann man einen zusammenhängenden Glaskörper (b) verwenden. Diesen kann man sich aus vielen Prismen zusammengesetzt denken (c).

Statt vieler Einzelprismen kann man auch einfach einen zusammenhängenden Glaskörper verwenden, eine *Linse*, Abb. 22.16b. Man kann sich die Linse vorstellen als aus vielen einzelnen kleinen Prismen zusammengesetzt, Abb. 22.16c. Die Prismen von Abb. 22.16c sind zwar dicker als die von Abb. 22.16a. Aber da es für die Ablenkung nur auf den Winkel zwischen den gegenüberliegenden Prismenflächen ankommt, funktioniert die optische Abbildung auch mit den dicken Prismen.

Eine Linse kann auch eine andere Form als die in Abb. 22.16b und trotzdem denselben Effekt haben, Abb. 22.17. Wichtig ist nur, dass der Winkel zwischen den gegenüberliegenden Oberflächenteilen von der Mitte nach außen hin zunimmt.

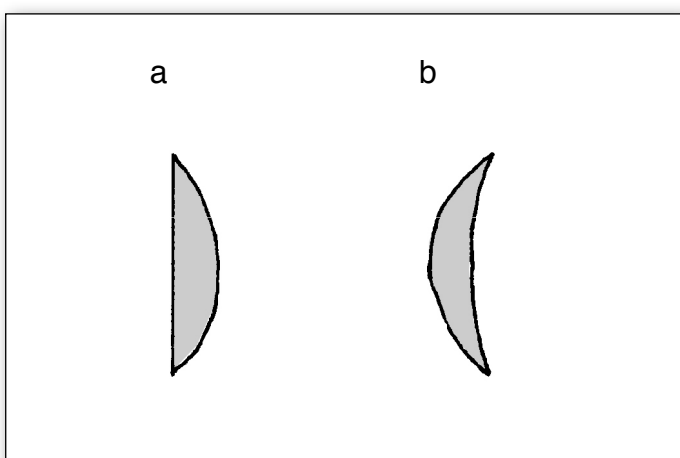


Abb. 22.17

Verschiedene Linsenformen

Die Oberflächen der meisten Linsen sind Kugelflächen. Manchmal ist eine der beiden Oberflächen auch eine Ebene, Abb. 22.17a.

Abb. 22.18 zeigt, wie die Strahlen verlaufen, wenn ein Gegenstand durch eine Linse abgebildet wird.

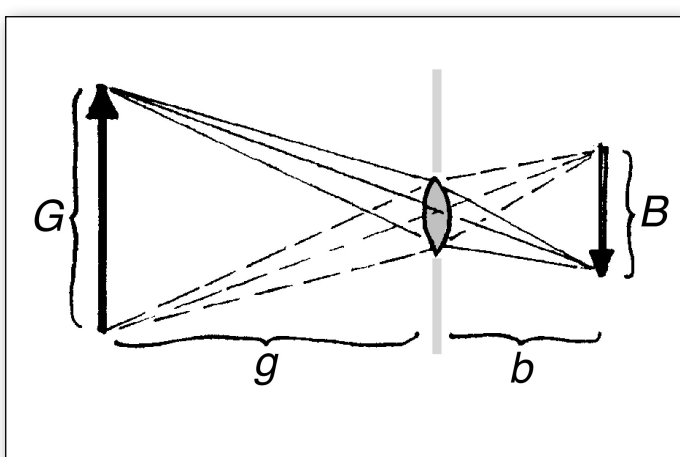


Abb. 22.18

Ein Gegenstand wird durch eine Linse abgebildet.

Da die optische Abbildung mit einer Linse im Prinzip nichts anderes ist, als die mit unserer verbesserten Lochkamera, die wir im vorigen Abschnitt untersucht haben, gilt auch für sie:

$$\frac{G}{B} = \frac{g}{b}$$

22.6 Die optische Abbildung mit Linsen

Wir hatten bei unserer verbesserten Lochkamera gesehen, dass das Bild nur dann scharf ist, wenn der Schirm in der richtigen Entfernung von der Lochblende steht. Das Entsprechende muss auch gelten, wenn wir eine Linse zur Abbildung verwenden: Das Bild ist nur dann scharf, wenn der Schirm in der richtigen Entfernung steht. Wir probieren es aus, Abb. 22.19.

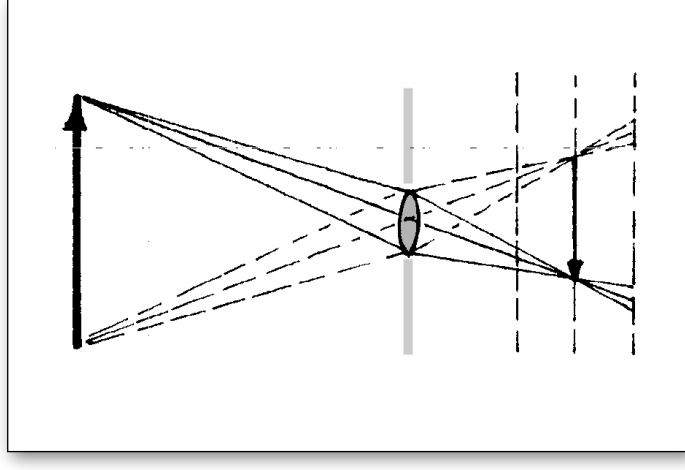


Abb. 22.19

Das Bild ist nur dann scharf, wenn der Schirm an einer bestimmten Stelle steht (bei fester Gegenstandsweite).

Die Gerade, die senkrecht durch die Mitte der Linse geht, nennt man *optische Achse*. Wir stellen den Schirm senkrecht zur optischen Achse auf und schieben ihn parallel zur optischen Achse hin und her. Wir stellen fest: Das Bild ist nur scharf, wenn sich der Schirm in einer bestimmten Entfernung b von der Linse befindet. In anderen Worten: wenn die Bildweite b einen bestimmten Wert hat.

Man sagt auch, in der Entfernung b von der Linse befinde sich das Bild.

Wir lassen nun den Schirm an der Stelle stehen, an der wir das (scharfe) Bild erhalten hatten und schieben den Gegenstand hin und her, wieder parallel zur optischen Achse, Abb. 22.20. Das heißt, wir verändern die Gegenstandsweite g . Das Bild wird unscharf, wenn wir den Gegenstand zur Linse hinschieben, Abb. 22.20b, und es wird unscharf, wenn wir den Gegenstand von der Linse wegschieben, Abb. 22.20c. Das Bild ist also (bei festgehaltenem Schirm) nur dann scharf, wenn sich der Gegenstand in einer bestimmten Entfernung von der Linse befindet.

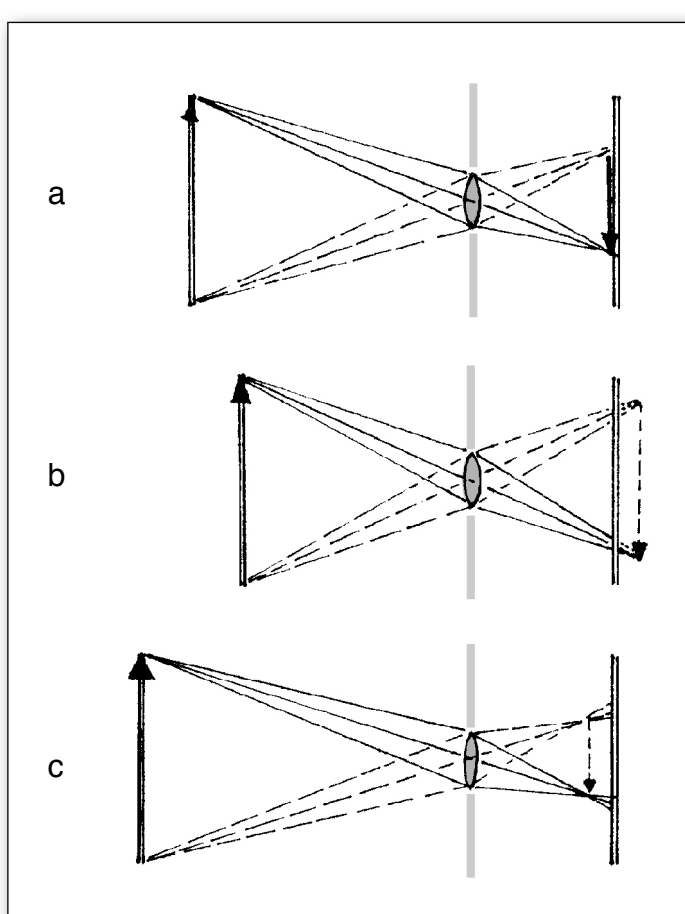


Abb. 22.20

(a) Ausgangslage
(b) Die Gegenstandsweite wurde vermindert.
(c) Die Gegenstandsweite wurde vergrößert.

Ein dritter Versuch: Wir gehen wieder von derjenigen Stellung von Schirm und Gegenstand aus, bei der auf dem Schirm ein scharfes Bild entsteht. Wir verschieben den Gegenstand ein Stück in Richtung Linse. Das Bild wird unscharf. Wir können es nun aber nicht nur dadurch wieder scharfmachen, dass wir den Gegenstand an seine alte Stelle zurückbringen, sondern auch durch Verschieben des Schirms – und zwar von der Linse weg.

Wir verschieben nun den Gegenstand noch einmal – diesmal aber von der Linse weg. Und machen das Bild durch Verschieben des Schirms in Richtung Linse wieder scharf.

Unsere Beobachtungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Zu einer bestimmten Gegenstandsweite g gehört eine bestimmte Bildweite b . Je größer g , desto kleiner b .

Gegenstands- und Bildweite werden auf der optischen Achse gemessen.

Bei der gewöhnlichen Lochkamera (der mit einem einzigen Loch) gab es einen solchen Zusammenhang nicht. Man konnte Gegenstandsweite und Bildweite unabhängig voneinander wählen.

Wir wollen den Zusammenhang zwischen g und b genauer untersuchen.

Wir stellen den Gegenstand in sehr großer Entfernung von der Linse auf und suchen die entsprechende Bildweite. Wir schieben dann den Gegenstand noch weiter von der Linse weg. Das Bild wird kleiner, bleibt aber scharf. Die Bildweite wird also nicht mehr geringer, Abb. 22.21. Sie hat den kleinsten Wert erreicht, den sie überhaupt haben kann. Diesen Wert der Bildweite nennt man *Brennweite f* der Linse. Die Ebene, in der das Bild entsteht, ist die *Brennebene*.

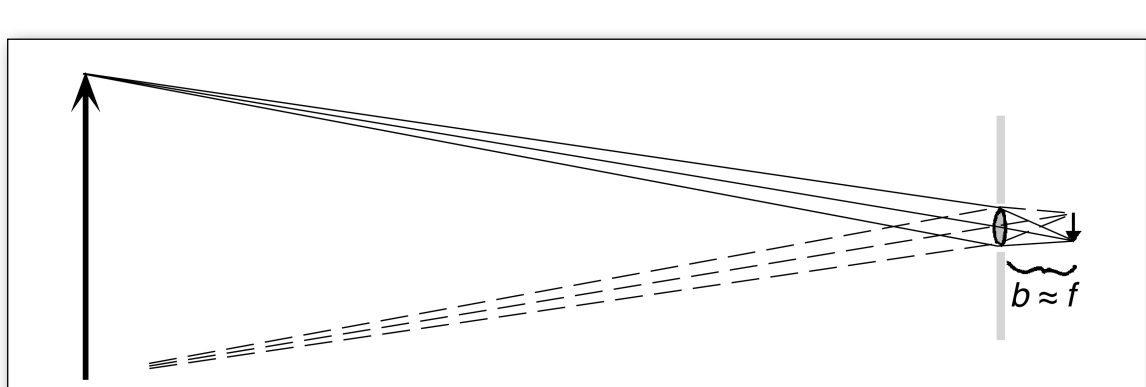


Abb. 22.21

Die Bildweite wird von der Gegenstandsweite unabhängig, wenn g sehr groß wird. Sie wird gleich der Brennweite.

Für Gegenstände, die sehr weit von der Linse entfernt sind, gilt: Bildweite b = Brennweite f .

Was passiert, wenn wir den Gegenstand in die andere Richtung verschieben, d. h. zur Linse hin? Das Bild wandert von der Linse weg. Wir dürfen aber den Gegenstand nicht zu nahe an die Linse heranrücken. Wenn sich nämlich die Gegenstandsweite der Brennweite nähert, wandert das Bild sehr schnell und immer schneller, immer weiter weg. Wird g kleiner als f , so gibt es kein scharfes Bild mehr.

Man sagt auch:

Für $g = f$ befindet sich das Bild in „unendlich großer Entfernung“.

Oder in Symbolen:

Für $g = f$ ist $b = \infty$.

Abb. 22.22 zeigt noch zwei Spezialfälle.

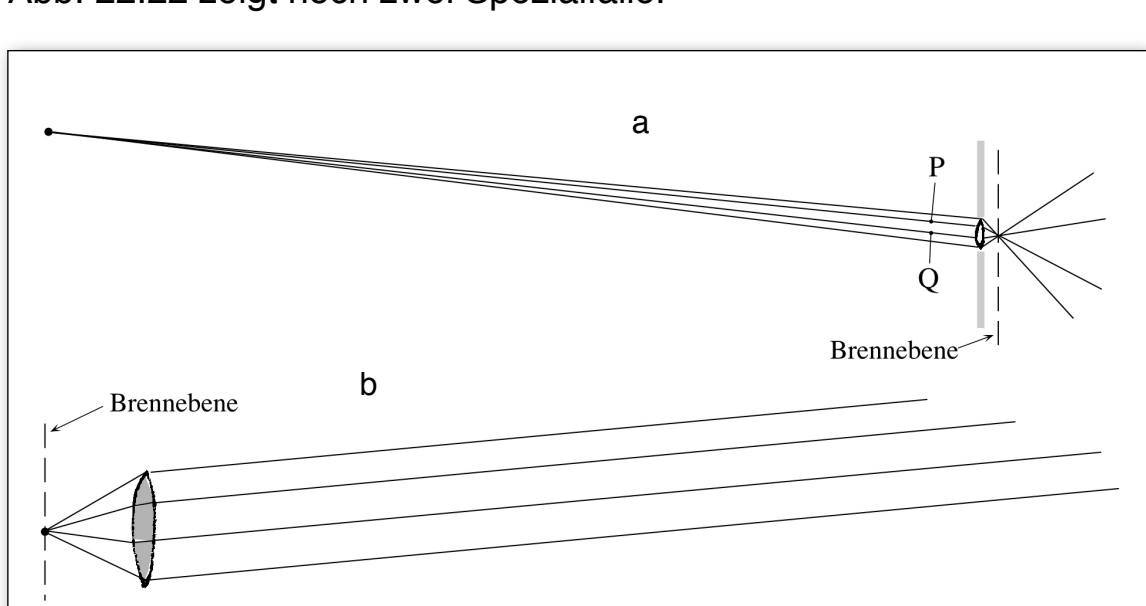


Abb. 22.22

(a) Der Gegenstand ist ein einziger leuchtender Punkt in sehr großer Entfernung von der Linse. Das Licht hinter der Linse läuft durch einen Punkt in der rechten Brennebene.
(b) Der Gegenstand ist ein einziger leuchtender Punkt in der linken Brennebene. Das Licht auf der rechten Seite der Linse ist parallel.

a) Der Gegenstand ist ein einziger leuchtender Punkt, der sich in sehr großer Entfernung von der Linse befindet. Das Licht, das auf die Linse trifft, hat vor der Linse an jeder Stelle nur eine einzige Richtung. Und die Lichtrichtungen an verschiedenen Stellen, z. B. in den Punkten P und Q, sind auch gleich. Es ist also *paralleles Licht*. Das Bild unseres Gegenstandes ist ein Punkt in der rechten Brennebene. In anderen Worten:

Paralleles Licht, das auf eine Linse trifft, läuft hinter der Linse durch einen Punkt in der Brennebene.

b) Der Gegenstand ist ein leuchtender Punkt, der in der linken Brennebene liegt. Das Bild ist ein Punkt in „unendlich großer Entfernung“. Das Licht rechts von der Linse muss daher parallel sein.

Das Licht, das von einer punktförmigen Quelle in der Brennebene vor der Linse kommt, ist hinter der Linse parallel.

Man kann also, wie mit einem Parabolspiegel, paralleles Licht in einen Punkt konzentrieren und Licht einer Punktquelle parallel machen.

Aufgabe

Du hast eine Linse unbekannter Brennweite vor dir, außerdem eine Kerze und Streichhölzer. Wie kannst du die Brennweite der Linse bestimmen? Beschreibe zwei Verfahren.

22.7 Brennweite und Brechkraft

Die Brennweite ist eine für die Linse charakteristische Größe. Es gibt Linsen der verschiedensten Brennweiten. Wie kann man die Brennweite einer Linse feststellen? Man macht eine optische Abbildung, bei der der Gegenstand sehr weit von der Linse entfernt ist, so wie in Abb. 22.21. Man misst die Entfernung des Bildes von der Linse und hat damit, weil jetzt $f = b$ ist, gleichzeitig die Brennweite. Wir bestimmen auf diese Art die Brennweite verschiedener Linsen und stellen fest:

Je stärker die Oberflächen einer Linse nach außen gekrümmt sind, desto kleiner ist die Brennweite.

Die Brennweite wird durch die Krümmung beider Oberflächen beeinflusst. So haben die drei Linsen von Abb. 22.23 dieselbe Brennweite. Wie man sieht, darf sogar die eine Oberfläche nach innen gekrümmt sein, wenn dafür die andere umso mehr nach außen gekrümmt ist.

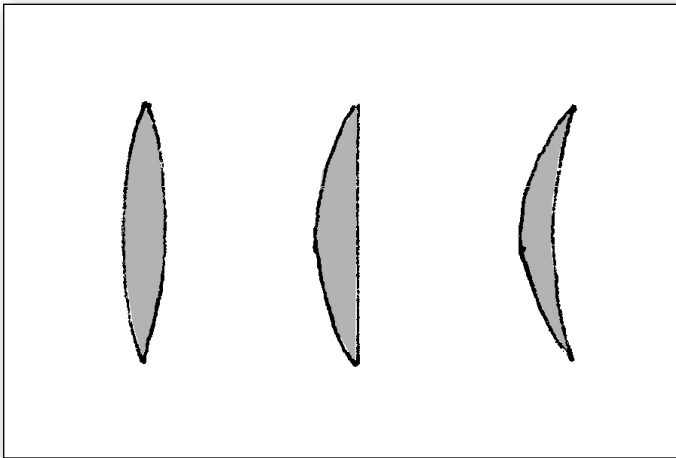


Abb. 22.23

Alle drei Linsen haben dieselbe Brennweite.

Statt durch die Brennweite beschreibt man eine Linse oft durch den Kehrwert der Brennweite, die *Brechkraft* D :

$$D = \frac{1}{f}$$

Je größer die Brechkraft einer Linse ist, desto stärker werden die Lichtstrahlen am Linsenrand zur Mitte geknickt.

Die Maßeinheit der Brechkraft ist 1/m. Diese Einheit nennt man auch Dioptrie, abgekürzt dpt. Es ist also:

$$1 \text{ dpt} = 1/\text{m}$$

Eine planparallele Platte, die dem Licht (fast) nichts tut, hat die Brechkraft 0 dpt.

22.8 Das Zusammensetzen von Linsen

Wir stellen eine Linse L_1 der Brennweite f_1 und einen Schirm so auf, dass ein weit entfernter Gegenstand (links im Bild) auf den Schirm abgebildet wird, Abb. 22.24a. Weil der Gegenstand so weit weg ist, ist die Bildweite gleich der Brennweite der Linse.

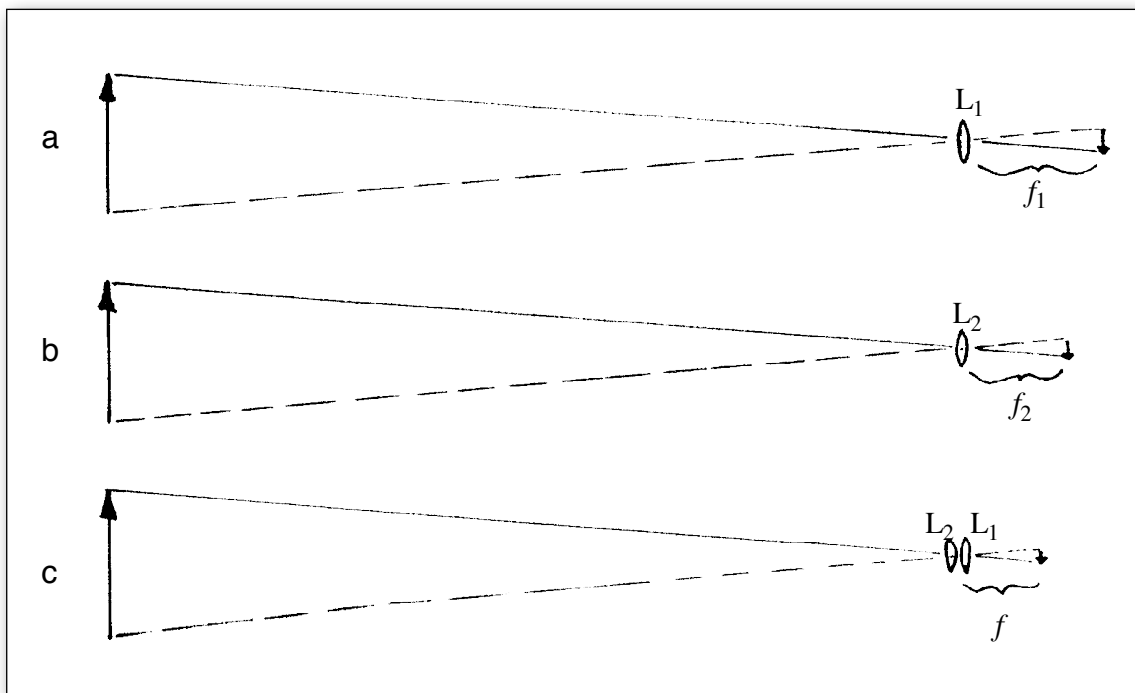


Abb. 22.24

Die Brennweite des Linsensystems (c) ist kleiner als die von Linse L_1 (a) und kleiner als die von Linse L_2 (b).

Wir ersetzen die Linse durch eine andere Linse L_2 der Brennweite f_2 . Das neue Bild befindet sich im Abstand f_2 von der Linse, Abb. 22.24b.

Wir stellen nun beide Linsen gleichzeitig auf, und zwar die eine so nah wie es geht bei der anderen. Und wieder suchen wir die Stelle, an der das (scharfe) Bild entsteht. Wir stellen fest, dass die Bildweite kleiner ist als f_1 und kleiner als f_2 , Abb. 22.24c. (Wir messen die Bildweite von der Mitte des Linsenpaares aus.)

Die neue Bildweite ist die Brennweite f des aus L_1 und L_2 bestehenden *Linsensystems*. Es ist also

$$f < f_1 \text{ und } f < f_2.$$

Oder durch die Brechkraft ausgedrückt: Die Brechkraft D des Linsensystems ist größer als die Brechkraft D_1 von Linse L_1 und größer als die Brechkraft D_2 von Linse L_2 . Misst man die drei Brennweiten f , f_1 und f_2 und rechnet um auf die Brechkräfte, so stellt man fest:

$$D = D_1 + D_2.$$

Die Brechkraft eines Linsensystems ist gleich der Summe der Brechkräfte der Einzellinsen.

Abb. 22.25 zeigt links eine Linse L_1 , die eigentlich keine ist: Sie ist außen dicker als innen. Eine ihrer Oberflächen ist nach innen gewölbt, die andere ist eben. Wir setzen diese Linse vor eine andere „richtige“ Linse L_2 . Die nach außen gewölbte Oberfläche der zweiten Linse passt gerade zu der nach innen gekrümmten der ersten.

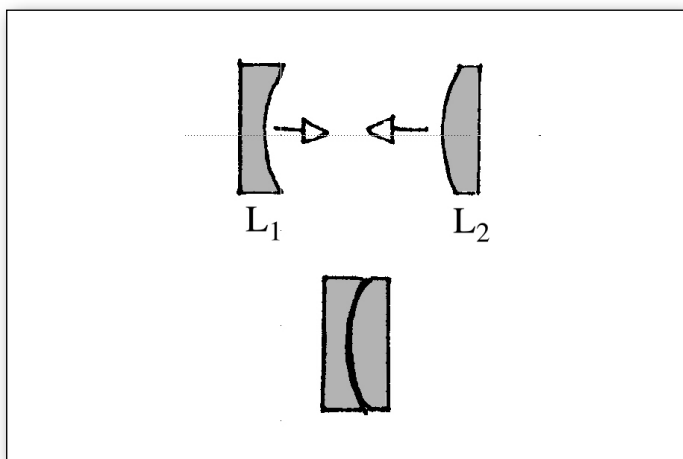


Abb. 22.25

Die linke Linse hat eine negative, die rechte eine positive Brechkraft.

Insgesamt entsteht eine planparallele Platte, d.h. ein Linsensystem mit der Brechkraft 0 dpt. Wir wollen nun, dass die Gleichung

$$D = D_1 + D_2$$

auch hier gültig bleibt. Damit sich für die Summe der Brechkräfte 0 dpt ergibt, muss D_1 negativ sein. Wenn die rechte Linse vier Dioptrien hat, so muss die linke minus vier Dioptrien haben:

$$D_2 = 4 \text{ dpt} \quad D_1 = -4 \text{ dpt}.$$

Linsen, die außen dicker sind als innen, haben also eine negative Brechkraft.

Setzt man vor eine Linse mit

$$D_1 = 5 \text{ dpt}$$

eine andere mit

$$D_2 = -1,5 \text{ dpt},$$

so erhält man ein Linsensystem mit

$$D = 3,5 \text{ dpt}.$$

Aufgaben

1. Eine Linse mit einer Brechkraft von 3 dpt und eine mit einer Brechkraft von -4 dpt werden zu einem Linsensystem vereinigt. Welche Brechkraft hat das Linsensystem?
2. Zwei Linsen mit einer Brennweite von je 40 cm werden hintereinander aufgestellt. Welche Brechkraft hat das Linsensystem? Welche Brennweite hat es?
3. Drei Linsen werden hintereinander gesetzt. Die erste hat eine Brennweite von 20 cm und die zweite hat eine Brennweite von 50 cm. Die dritte hat eine Brechkraft von minus zwei Dioptrien. Welche Brechkraft hat das Linsensystem?
4. Du hast eine Linse mit nach innen gewölbten Oberflächen vor dir und möchtest ihre Brechkraft bestimmen. Du weißt, dass du es nicht nach demselben Verfahren machen kannst, wie bei einer normalen Linse. Wie gehst du vor? Was für Geräte brauchst du dazu?

22.9 Die Schärfentiefe

Wir haben bisher nur die optische Abbildung flacher Gegenstände untersucht, d.h. von Gegenständen, die sich durch eine einzige Gegenstandsebene beschreiben lassen. Problematisch wird es nun, wenn der Gegenstand in der Richtung der optischen Achse ausgeht, wenn er eine Tiefenausdehnung hat.

Wir betrachten als einfachstes Beispiel die optische Abbildung von zwei leuchtenden Punkten A und B, die sich in unterschiedlicher Entfernung g_A bzw. g_B von der Linse befinden. Da g_A und g_B verschieden sind, sind auch die Bildweiten b_A und b_B nicht gleich.

Stellt man den Schirm so auf, dass seine Entfernung von der Linse b_A ist, Abb. 22.26a, so ist das Bild von A scharf. Das Licht, das von B kommt, erzeugt keinen scharfen Punkt, sondern einen größeren Fleck. Das Bild von B ist unscharf.

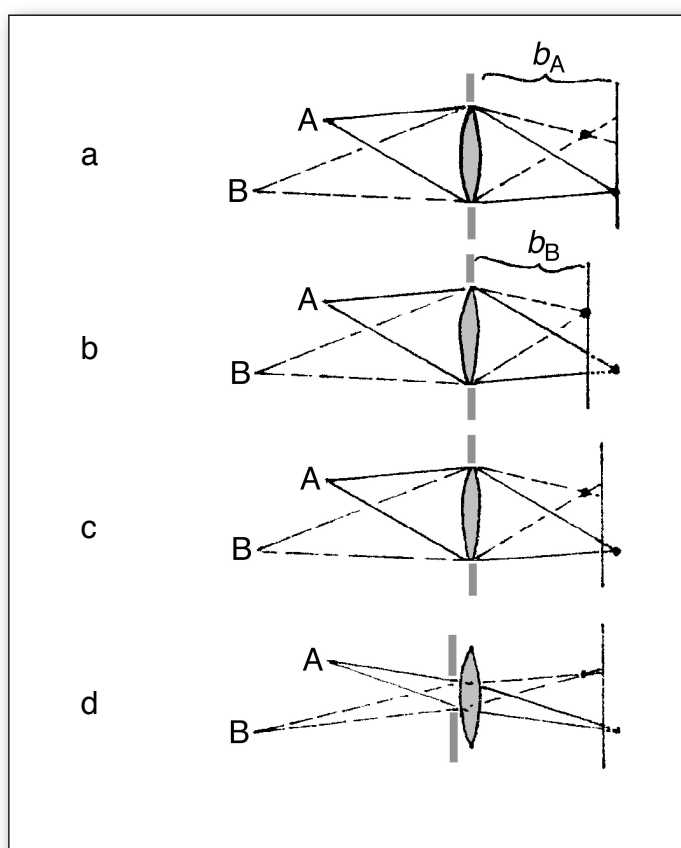


Abb. 22.26

- (a) Das Bild von A ist scharf, das von B unscharf.
- (b) Das Bild von B ist scharf, das von A unscharf.
- (c) Ein Kompromiss: Beide Bilder sind noch etwas unscharf.
- (d) Der Linsendurchmesser wurde verkleinert. Beide Bilder sind scharf.

Stellt man den Schirm dagegen im Abstand b_B von der Linse auf, Abb. 22.26b, so ist das Bild von B scharf und das von A unscharf.

Also: Wenn das eine Bild scharf ist, ist das andere unscharf.

Wir machen nun einen Kompromiss und stellen den Schirm in die Mitte zwischen die beiden Abstände b_A und b_B , Abb. 22.26c. Jetzt sind beide Bilder unscharf, aber das Bild von A ist nicht so unscharf wie in Abb. 22.26b und das von B nicht so unscharf wie in Abb. 22.26a.

Schließlich noch ein Eingriff in unsere optische Abbildung: Wir setzen vor die Linse eine Lochblende, so dass nur durch den inneren Teil der Linse Licht hindurchlaufen kann, Abb. 22.26d. Das ist dasselbe, als hätten wir die Linse durch eine Linse kleineren Durchmessers (aber derselben Brennweite) ersetzt.

Was passiert? Das Bild wird nicht nur dunkler, es wird auch schärfer. Warum, erkennt man an Hand von Abb. 22.26d: Die Flecke, die man als „Bilder“ von A und B erhält, sind kleiner geworden. Macht man die Blende immer kleiner, so wird man sich schließlich mit der erreichten Schärfe zufrieden geben.

Es wird immer ein gewisser Tiefenbereich auf der Gegenstandsseite hinreichend scharf abgebildet. Je kleiner der Linsendurchmesser ist, desto größer ist dieser Bereich. Man nennt diesen Tiefenbereich die *Schärfentiefe*.

Wir haben damit:

Je kleiner der Linsendurchmesser, desto größer die Schärfentiefe.

Eine kleine Linse bedeutet aber auch weniger Licht, ein dunkleres Bild. Also:

Große Schärfentiefe und große Bildhelligkeit schließen sich gegenseitig aus.

22.10 Objektive

Du hast nun das Wesentliche über die Abbildung mit Linsen erfahren. Mit dem, was du gelernt hast, ist allerdings längst noch nicht alles gesagt. Vielleicht ist es dir schon aufgefallen, dass eine Digitalkamera, eine Videokamera oder ein Beamer zur Abbildung nicht einfach eine einzige Linse benutzt, sondern mehrere: ein *Objektiv*.

Nach unseren bisherigen Vorstellungen sollten aber 2, 3 oder noch mehr Linsen einer einzigen gleichwertig sein. Man sollte das Objektiv durch eine einzige Linse ersetzen können. Wir wissen ja sogar schon, wie man die Brechkraft dieser einen Ersatzlinse berechnet, wenn man die Brechkräfte der verschiedenen, das Objektiv bildenden Einzellinsen kennt.

Trotzdem ist es nicht dasselbe, wenn man statt eines Objektivs eine einzige Linse verwendet. Denn was wir über die optische Abbildung mit einer Linse gelernt haben, ist nur näherungsweise richtig. Bei genauerem Hinsehen stellt man fest, dass eine Linse einen leuchtenden Punkt nie genau, sondern nur näherungsweise in einen anderen leuchtenden Punkt abbildet. Außerdem ist das Bild einer Ebene, die senkrecht zur optischen Achse steht, nicht eben, sondern etwas gekrümmt. Eine Gerade in der Wirklichkeit ergibt als Bild eine etwas gekrümmte Linie. Ein weißer Punkt wird in eine Folge kleiner farbiger Ringe abgebildet. Und es gibt noch weitere solcher *Abbildungsfehler*.

Man kann nun diese Unvollkommenheiten der Abbildung dadurch vermindern, dass man statt einer einzigen Linse mehrere Linsen verwendet. Das Berechnen solcher Objektive ist allerdings ein kompliziertes Geschäft.

Abbildung 22.27 zeigt ein Fotoapparat-Objektiv im Querschnitt. Mikroskop-Objektive haben oft mehr als 10 Linsen.

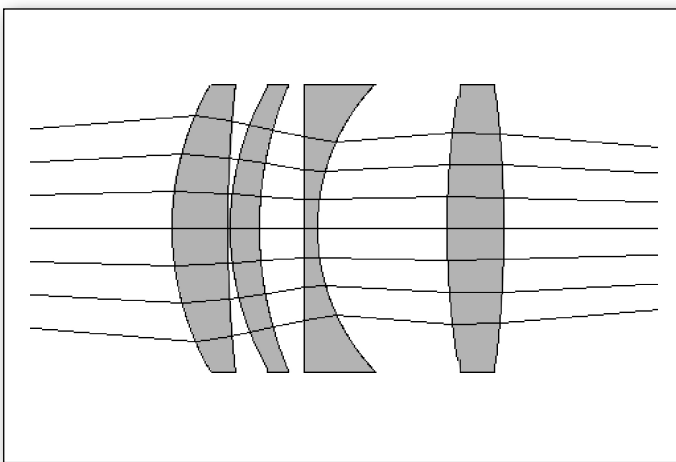


Abb. 22.27

Vierlinsiges Objektiv eines Fotoapparats

Man verwendet mehrere Linsen noch aus einem anderen Grund. Wenn man die Linsen des Objektivs in einem größeren Abstand voneinander aufstellt, kann man durch Verschieben einzelner Linsen die Brennweite des Objektivs verändern. Man nennt ein solches Objektiv ein *Zoom-Objektiv* oder kurz ein Zoom. Dieses Verhalten steht im Widerspruch zu unserer Regel: „Die Brechkraft eines Linsensystems ist gleich der Summe der Brechkräfte der Einzellinsen.“ Nach dieser Regel müsste die Brennweite des Objektivs allein durch die Brennweiten der Einzellinsen bestimmt sein, und nicht durch deren Abstand. Wir sehen jetzt, dass diese Regel nur näherungsweise gelten kann. Tatsächlich gilt sie nur wenn die Linsen des Objektivs dicht beieinander stehen.

22.11 Die Fotokamera

Im Wesentlichen kennen wir die Fotokamera schon. Abb. 22.28 zeigt ihren Aufbau schematisch. Das Objektiv bildet die Dinge, die sich vor der Kamera befinden, auf den *Sensor* ab.

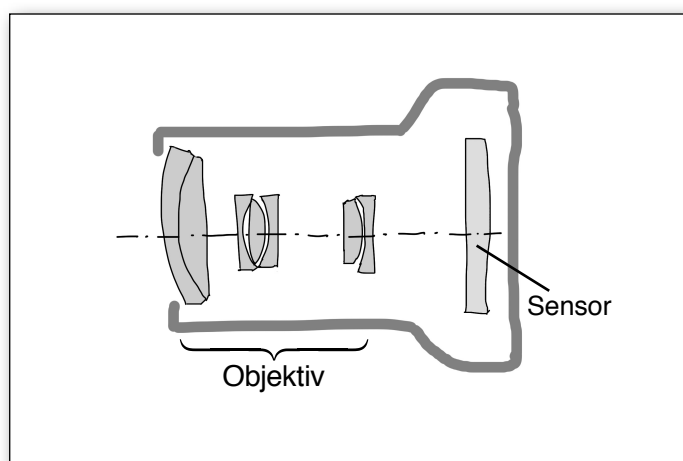


Abb. 22.28
Fotokamera

Damit das Bild des Gegenstandes, den man fotografieren möchte, scharf wird, muss die Bildweite den richtigen Wert haben.

Im Normalzustand ist der Lichtweg durch den *Verschluss* versperrt. Um eine Aufnahme zu machen, betätigt man den *Auslöser*. Dabei wird der Verschluss für eine sehr kurze Zeit geöffnet. Je kürzer die Belichtungszeit, desto geringer ist die Gefahr, das Bild zu verwackeln. Für nicht zu schnell bewegte Gegenstände ist 1/60 Sekunde ausreichend.

Außer Belichtungszeit und Entfernung muss noch eine dritte Einstellung vorgenommen werden. Im Objektiv befindet sich eine kreisförmige *Blende*, deren Durchmesser verstellt werden kann. Je größer die Blendenöffnung, desto mehr Licht geht durch das Objektiv, desto geringer ist aber die Schärfentiefe.

Die drei Einstellungen – Entfernung, Belichtungszeit und Blendenöffnung – werden meist automatisch vorgenommen. Damit das möglich ist, hat die Kamera einen Belichtungsmesser zur Messung der Helligkeit und einen Entfernungsmesser.

Die meisten Kameras haben ein Zoom-Objektiv. Man kann daher noch die Brennweite des Objektivs einstellen.

Da die Gegenstände, die man fotografiert, immer weit vom Objektiv entfernt sind, ist die Bildweite nicht sehr verschieden von der Brennweite:

$$b \approx f.$$

Abbildung 22.29 zeigt, wie ein und derselbe Gegenstand aus derselben Entfernung mit drei verschiedenen eingestellten Brennweiten aufgenommen wird. Im oberen Teilbild hat das Objektiv die größte Brennweite, im unteren die kleinste. Man sieht, dass das Bild des Gegenstandes umso größer ist, je größer die Brennweite (je kleiner die Brechkraft) des Objektivs ist.

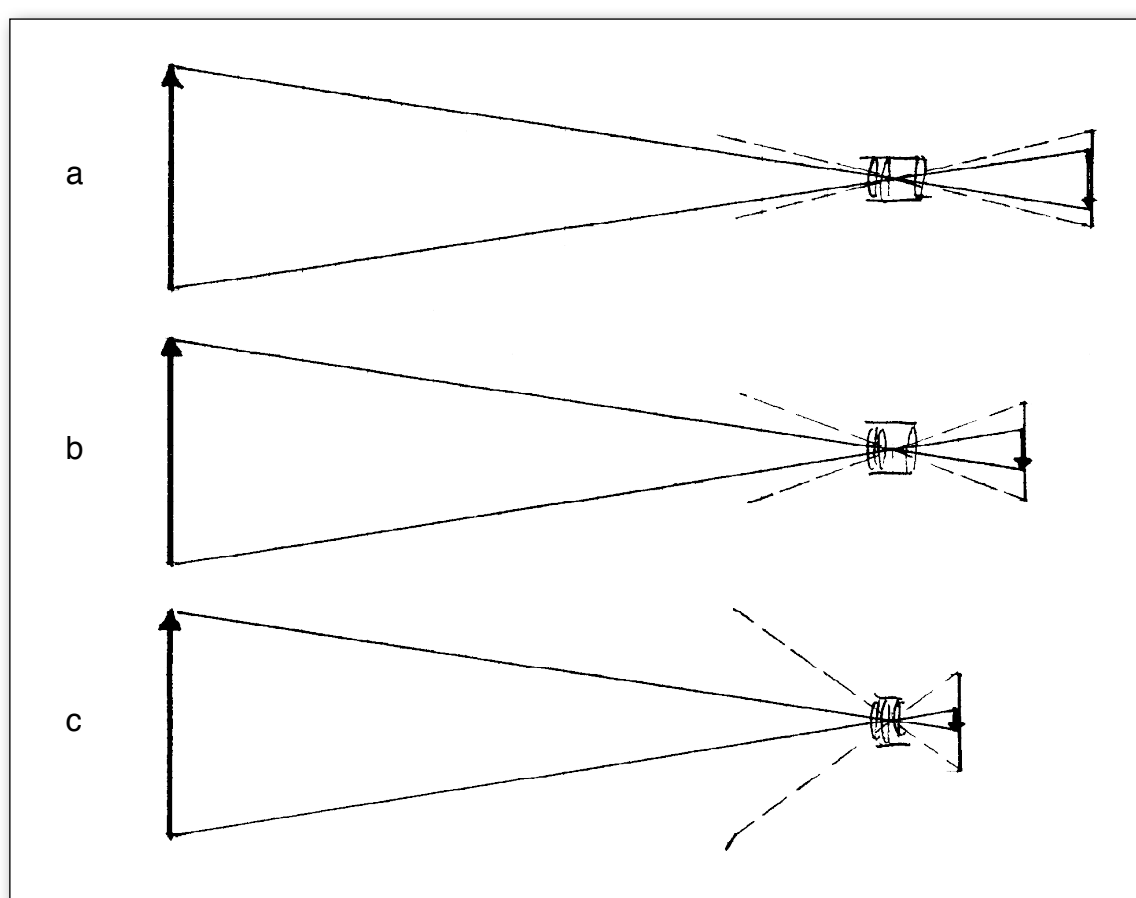


Abb. 22.29

Ein und derselbe Gegenstand wird mit Objektiven drei verschiedener Brennweiten aufgenommen. (a) Teleobjektiv; (b) Normalobjektiv; (c) Weitwinkelobjektiv

Dass ein Gegenstand auf dem Sensor ein großes Bild erzeugt, bedeutet aber auch, dass der Winkelbereich, den der Fotoapparat „sieht“, klein ist. Mit einer groß eingestellten Brennweite nimmt man also einen kleinen Winkelbereich auf, bei kleiner Brennweite einen großen.

Bei einer so genannten Systemkamera kann man das Objektiv austauschen. Man kann also das normale Objektiv ersetzen, etwa durch ein Objektiv mit besonders großer, oder mit besonders kleiner Brennweite.

Objektive großer Brennweite „holen die Gegenstände nah heran“. Man nennt sie *Teleobjektive*. Objektive kleiner Brennweite nehmen einen großen Winkelbereich auf. Man nennt sie *Weitwinkelobjektive*. Wir fassen zusammen:

Je größer die Brennweite, desto größer das Bild eines Gegenstandes.

22.12 Das Auge

Das Auge ist der Fotokamera ähnlich, Abb. 22.30. Das Licht tritt durch die Pupille in den Augapfel ein. Das Bild entsteht auf der Netzhaut. Hinter der Iris (der Blende, durch die die Pupillenöffnung kleiner und größer gemacht werden kann) befindet sich die Linse. Das Material, das sich in den Räumen zwischen Hornhaut und Linse und zwischen Linse und Netzhaut befindet, ist im Wesentlichen Wasser. Die optische Dichte des Linsenmaterials ist etwas größer als die des Wassers. Die Brechung geschieht zum größten Teil beim Eintritt in die Hornhaut (Breckkraft etwa 43 dpt). Die Linse trägt nur zum kleineren Teil zur optischen Abbildung bei. Ihre wichtigste Funktion ist das „Scharfstellen“. Durch Anspannen des Ringmuskels kann die Brechkraft der Linse vergrößert werden (von 15 auf 27 dpt).

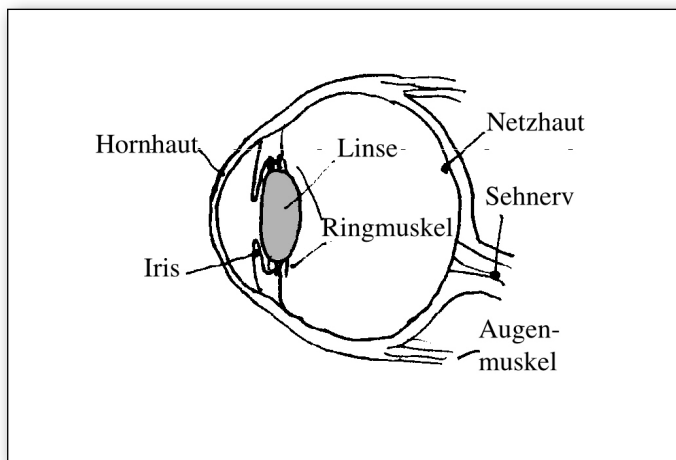


Abb. 22.30

Auge des Menschen

Ist der Ringmuskel entspannt, so werden sehr weit entfernte Gegenstände scharf auf der Netzhaut abgebildet. Bei angespanntem Muskel werden näher liegende Gegenstände scharf abgebildet. Die kleinste Entfernung, in der man einen Gegenstand noch scharf erkennt, beträgt etwa 10 cm. Probiere es selbst aus.

Die Netzhaut ist der eigentliche Datenempfänger: der Empfänger für die Daten, die mit dem Träger Licht ins Auge kommen. Die Netzhaut enthält eine sehr große Zahl von Einzelempfängern. Von diesen laufen die Daten über den Sehnerv zum Gehirn.

22.13 Brille und Lupe

Die Brille

Ist der Ringmuskel des Auges entspannt, so soll ein weit entfernter Gegenstand ein scharfes Bild auf der Netzhaut liefern.

Bei Kurzsichtigen ist der Augapfel zu lang, das Bild eines weit entfernten Objekts entsteht daher vor der Netzhaut. In anderen Worten: Das Netzhautbild ist unscharf, Abb. 22.31a. Um ein scharfes Bild zu erhalten, müsste die Brechkraft der Linse vermindert werden. Durch Spannen des Ringmuskels ist das aber nicht zu erreichen – das würde ja die Brechkraft vergrößern, das Bild würde noch unschärfer. Was man braucht, ist eine Brille, die Linsen mit negativer Brechkraft hat, Abb. 22.31b.

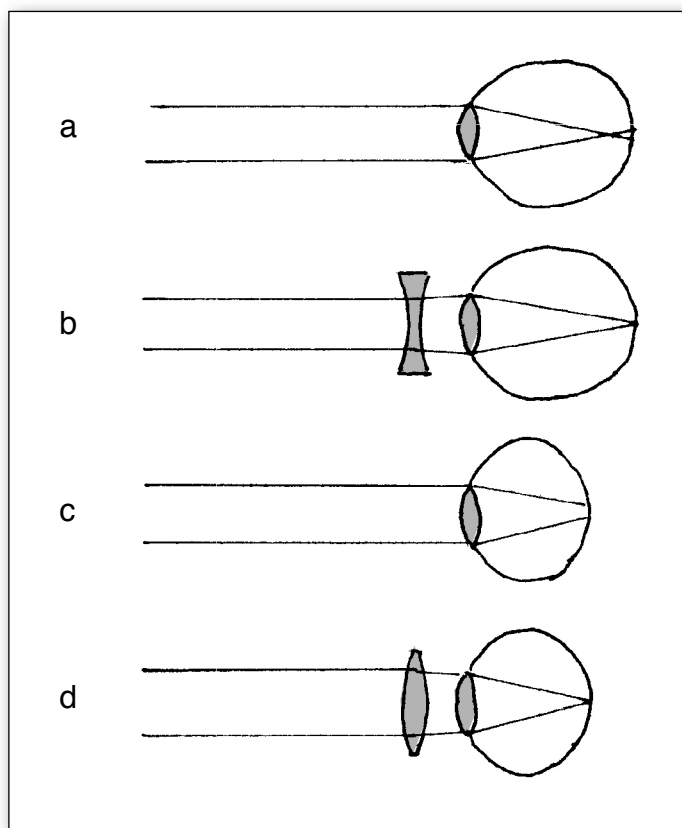


Abb. 22.31

(a) Bei Kurzsichtigen ist der Augapfel zu lang;
(b) Korrektur mit einer Linse negativer Brechkraft;
(c) bei Weitsichtigen ist der Augapfel zu kurz;
(d) Korrektur mit einer Linse positiver Brechkraft

Bei Weitsichtigen ist der Augapfel zu kurz, Abb. 22.31c. Die Folge: Erstens muss der Ringmuskel gespannt werden, damit ein weit entferntes Objekt ein scharfes Bild liefert, und zweitens ist die kleinste Entfernung, in der man noch scharf sieht, größer als bei Normalsichtigen. Weitsichtigkeit lässt sich dadurch korrigieren, dass man eine Brille mit positiver Brechkraft trägt, Abb. 22.31d.

Mit zunehmendem Alter verliert die Augenlinse ihre Elastizität, ihre Brechkraft kann durch Anspannen des Ringmuskels nicht mehr so stark vergrößert werden wie bei einem jungen Menschen. Der Mensch kann daher nahe Gegenstände nicht mehr scharf sehen. Auch hier hilft eine Brille mit positiver Brechkraft. Diese wird aber nur gebraucht, solange die Person nahe Gegenstände anschaut, beim Lesen zum Beispiel. Beim Betrachten weiter entfernter Gegenstände muss die Brille abgesetzt werden, oder ... siehe Abb. 22.32.



Abb. 22.32

An welchem Augenfehler leidet der Mann?

Die Lupe

Um einen Gegenstand möglichst groß zu sehen, holt man ihn so nah wie möglich an die Augen heran – so nah, dass man es gerade noch schafft, ihn scharf zu sehen. Um ihn noch größer zu sehen, müsste man ihn noch näher heranholen. Dann würde das Bild aber unscharf, denn die Brechkraft der Augenlinse ist nicht groß genug. Man kann sich aber leicht helfen, indem man durch eine Lupe schaut. Eine Lupe ist nichts anderes als eine Linse positiver Brechkraft. Die Brechkraft von Auge und Lupe zusammen ist dann größer als die des Auges allein. Eine Lupe hat also dieselbe Funktion wie eine Brille für Weitsichtige.

Aufgaben

1. Wie siehst du einer Brille an, ob sie einer kurzsichtigen oder einer weitsichtigen Person gehört?
2. Versuche mit deiner eigenen oder mit einer geliehenen Brille eine leuchtende Glühlampe auf eine weiße Wand abzubilden. Es kann sein, dass es dir nicht gelingt. Woran könnte das liegen?
3. Man kann eine Lupe als Brennglas benutzen. Die Lupe konzentriert das Sonnenlicht auf einen kleinen Fleck. Welche Form hat dieser Fleck? Warum hat er diese Form?

22.14 Videoprojektoren

Wir stellen uns vor, es gebe noch keine Projektoren, und wir wollten selbst einen erfinden. Die einfachste Idee wäre wohl die: Wir nehmen ein kleines Papierbild, beleuchten es möglichst gut und bilden es mit Hilfe eines Objektivs auf eine Leinwand ab, Abb. 22.33a.

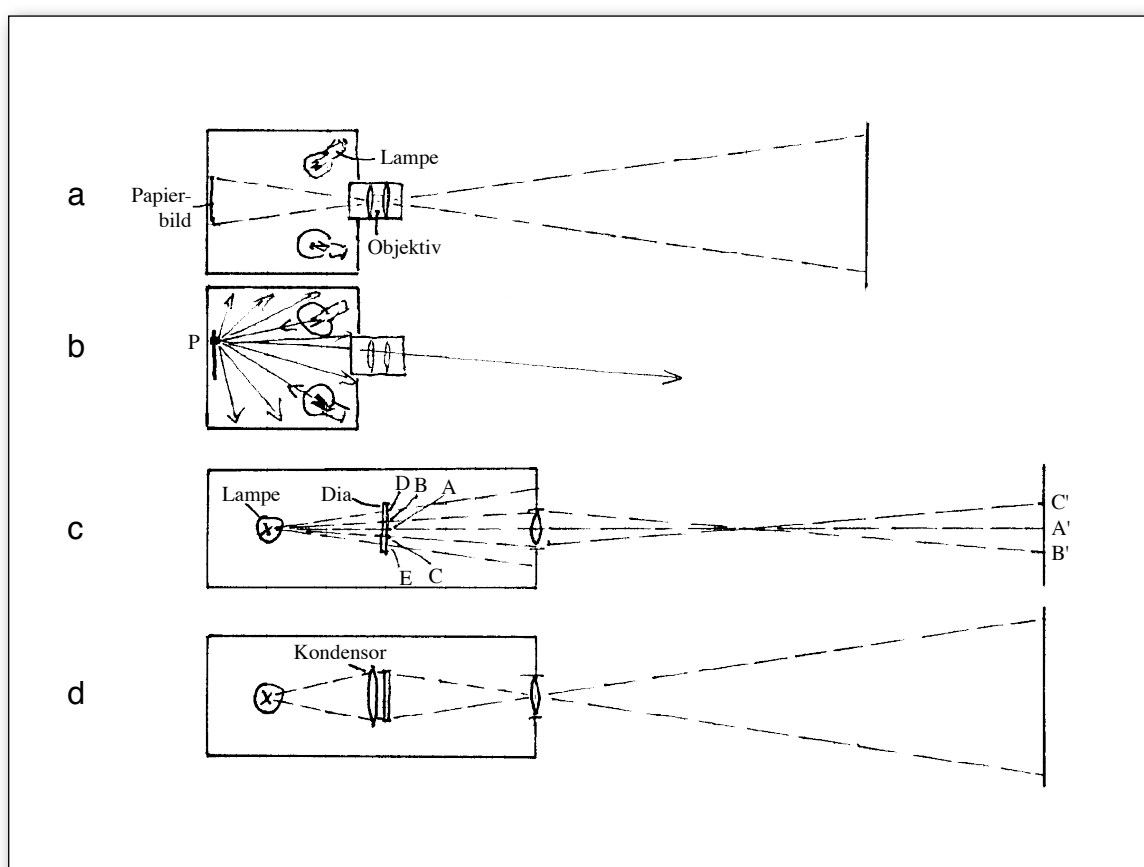


Abb. 22.33

- (a) Episkop
- (b) Beim Episkop geht das meiste Licht verloren.
- (c) Im Dia wird das Licht nicht gestreut. Nur das Zentrum des Dias wird abgebildet.
- (d) Der Kondensor lenkt alles Licht, das das Dia durchquert, zum Objektiv.

Solche Geräte, mit denen man Papierbilder projizieren kann, gab es früher tatsächlich. Sie heißen *Episkope*. Du wirst gleich sehen, warum sie nicht mehr in Gebrauch sind. In Abb. 22.33b ist dargestellt, wohin das Licht geht, das von den Lampen auf einen bestimmten Punkt P der Bildvorlage fällt. Nur ein sehr geringer Anteil dieses Lichts gelangt durch das Objektiv auf die Leinwand. Der größte Teil geht daneben, er wird an den Innenwänden des Projektors absorbiert. Die Ursache hierfür ist, dass das Papier das Licht streut. Es wird in alle Richtungen zurückgeworfen, statt dahin wo wir es haben möchten, nämlich zum Objektiv.

Daher unsere nächste Idee: Wir verwenden als Vorlage nicht ein Papierbild, sondern ein Bild, das das Licht nicht streut: Wir erfinden das *Diapositiv* oder kurz Dia. Am Diapositiv wird das Licht entweder absorbiert oder geradeaus durchgelassen – aber nicht gestreut.

Unseren ersten Versuch, einen Diaprojektor zu bauen, zeigt Abb. 22.33c. Auf den ersten Blick scheint der Projektor nicht schlecht zu sein. Das ganze Licht, das von Punkt A des Dias ausgeht, gelangt durch das Objektiv auf die Leinwand. Genauso wie auch das Licht, das von den Punkten B und C ausgeht. Aber dann hört es auch schon auf. Das Licht, das von den Punkten außerhalb von B und C kommt, also von D und E zum Beispiel, fällt nicht mehr auf das Objektiv, es trifft daneben. Was wir auf der Leinwand sehen, ist ein schönes helles Bild – allerdings nur von einem kreisförmigen Bereich in der Mitte des Dias.

Wir erfinden daher als Nächstes den *Kondensor*, eine große Linse, die dicht vor dem Dia steht, Abb. 22.33d. Sie knickt die von der Lampe kommenden Lichtstrahlen so ab, dass sie alle durch das Objektiv gehen. Wie du an Hand von Abb. 22.33d siehst, bedeutet das auch, dass die Lichtquelle auf das Objektiv abgebildet wird.

Noch ein letzter Schritt auf dem Weg zu einem modernen Projektor: Man stellt hinter die Lampe einen gekrümmten Spiegel, so dass auch das Licht, das die Lampe nach hinten schickt, durch das Dia zum Objektiv gelangt.

Der Videoprojektor oder *Beamer* ist, was die Optik betrifft, im Wesentlichen so aufgebaut wie der alte Diaprojektor, nur wird statt des Dias eine LCD-Matrix projiziert.

Aufgaben

1. Ein Beamer soll möglichst viel Licht auf die Leinwand bringen. Also, so könnte man vermuten, muss das Objektiv einen möglichst großen Durchmesser haben. Tatsächlich braucht es das nicht. Warum nicht?
2. Episkope hatten Objektive mit sehr großem Durchmesser. Warum?
3. Ein Beamer soll auf einer Leinwand, die sich in 5 m Abstand vom Projektor befindet, ein 2,40 m hohes Bild erzeugen. Welche Brennweite muss sein Objektiv haben? (Die Höhe der LCD-Matrix Dias ist 24 mm.)

22.15 Das Mikroskop

Um ein großes Bild von einem kleinen Gegenstand zu erhalten, muss man den Gegenstand dicht vor die Brennebene der abbildenden Linse bringen, Abb. 22.34a. Das „Gerät“ von Abb. 22.34a ist fast schon ein Mikroskop. Tatsächlich fängt man bei einem Mikroskop aber das Bild nicht mit einem Schirm auf, sondern man sieht es sich direkt mit dem Auge an. Man schaut dazu von oben in das Mikroskop hinein.

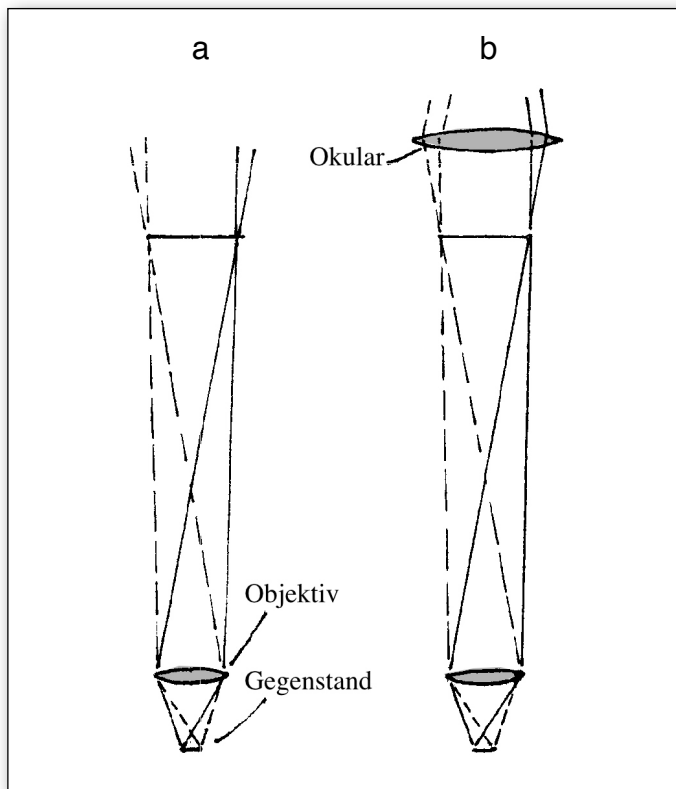


Abb. 22.34

Mikroskop.

(a) Der Gegenstand befindet sich nahe der Brennebene.

(b) Das Bild wird durch eine Lupe (das Okular) betrachtet.

Damit man das Bild möglichst groß sieht, d. h. damit man mit dem Auge möglichst nah an das Bild herangehen kann, betrachtet man es durch eine Lupe, Abb. 22.34b. Diese Lupe ist fester Bestandteil des Mikroskops. Man nennt sie *Okular*.

22.16 Das Fernrohr

Ein Fernrohr dient dazu, von einem weit entfernten Gegenstand ein großes Bild zu machen.

Wir hatten früher gesehen, dass das Bild umso größer ist, je größer die Brennweite der verwendeten Linse oder des Objektivs ist.

Beim Fernrohr fängt man nun das Bild gewöhnlich nicht auf einem Schirm oder auf einem Film auf, sondern man betrachtet es direkt von hinten. Um das Bild möglichst groß zu sehen, betrachtet man es, genauso wie beim Mikroskop, durch eine Lupe, ein Okular, Abb. 22.35.

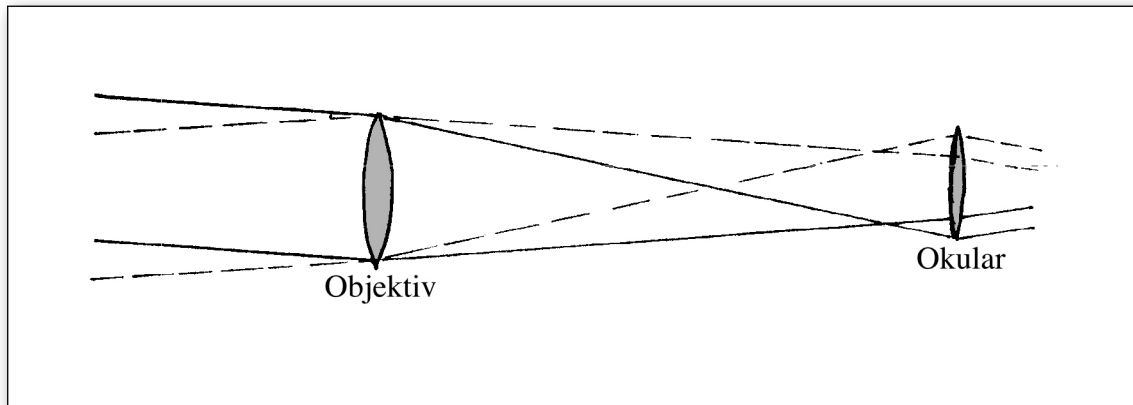


Abb. 22.35

Fernrohr. Eine Linse großer Brennweite erzeugt ein Bild. Dieses wird durch eine Lupe (Okular) betrachtet.

22.17 Teleskope

Im Grunde ist ein Teleskop nichts anderes als ein großes Fernglas, oder auch als eine Fotokamera mit einem Teleobjektiv sehr großer Brennweite. Teleskope werden für die Beobachtung des Himmels gebaut.

Bei der Beobachtung von Sternen gibt es ein besonderes Problem. Betrachtet man den Nachthimmel mit bloßem Auge, so sieht man bestenfalls etwa 3000 Sterne – und das ist nur ein winzig kleiner Bruchteil aller Sterne, die es gibt. Wir sehen die meisten Sterne deshalb nicht, weil sie so weit von uns entfernt sind und daher so wenig Licht von ihnen zu uns kommt. Um weit entfernte Sterne sichtbar zu machen, macht man daher eine Abbildung mit einem Objektiv sehr großer Querschnittsfläche. Je größer die Querschnittsfläche, desto mehr Licht trägt zur Abbildung bei.

Man kann Linsen mit einem Durchmesser von höchstens 1 m herstellen. Für noch größere Teleskope verwendet man statt Linsen Parabolspiegel. Wie eine Linse, so macht auch ein Parabolspiegel eine optische Abbildung.

Die größten existierenden Spiegelteleskope haben einen Durchmesser von etwa 10 m. Noch größere Teleskope mit Spiegeldurchmessern bis zu 40 m befinden sich im Bau.

Aus dem Universum kommt nicht nur sichtbares Licht zur Erde. Es kommen auch viele unsichtbare Lichtsorten. Alle diese Strahlungen bringen uns interessante Informationen über den Aufbau des Universums und über merkwürdige Vorgänge, die in anderen Sternen und Galaxien ablaufen. Man untersucht daher die verschiedensten Strahlungen, die aus dem Kosmos zur Erde gelangen.

Für jede dieser Strahlungen, dieser Lichtsorten, braucht man eine besondere Art von Teleskop: Geräte, die eine optische Abbildung machen und für diese Abbildung möglichst viel von der entsprechenden Strahlung einsammeln.

Den gewöhnlichen optischen Teleskopen sehr ähnlich sind die *Radioteleskope*, Geräte, mit denen Strahlung gesammelt wird, deren Wellenlänge viel größer ist als die des sichtbaren Lichts. Als Spiegel für diese Strahlung eignen sich einfache Drahtnetze. Es ist daher viel leichter, sehr große Parabolspiegel für diese Strahlung zu bauen als für sichtbares Licht. Das größte existierende Radioteleskop hat einen Spiegeldurchmesser von 100 m.

Aufgaben

1. Man kann die Parabolantenne für Satellitenfernsehen als Radioteleskop auffassen. Was kann man mit ihr beobachten und wie?
2. Die Pupille des menschlichen Auges hat einen maximalen Durchmesser von 8 mm. Wie viel mal mehr Licht als das Auge sammelt ein Spiegelteleskop mit einem Durchmesser von 6 m ein?

23

Farben

23.1 Der dreidimensionale Farbraum

Das Wort Farbe bezeichnet zweierlei: einmal einen Farbstoff, z. B. Ölfarbe oder Wasserfarbe, und zum anderen einen Farbeindruck, z. B. Grün oder Blau. Wir benutzen das Wort hier nur im Sinn von Farbeindruck oder Farbempfindung. In anderen Sprachen gibt es diese doppelte Bedeutung nicht. Die Farbe, die man zum Anstreichen benutzt, heißt im Englischen „paint“ und im Französischen „peinture“. Der Farbeindruck heißt „colour“ bzw. „couleur“.

Wir diskutieren im Folgenden die Farbempfindungen, die Licht über unsere Augen hervorruft. Unser Thema ist also nicht das ganze Bild, das auf der Netzhaut entsteht, sondern nur eine einzige Stelle des Bildes.

Die Farbempfindung hängt davon ab, um was für Licht es sich handelt. Im Allgemeinen trifft nun nicht eine einzige, reine Lichtsorte in unsere Augen (auf eine bestimmte Stelle der Netzhaut), sondern ein Lichtgemisch. Man könnte denken, dass unterschiedliche Lichtgemische immer unterschiedliche Farbempfindungen hervorrufen. Das ist aber nicht so. Es gibt viel weniger verschiedene Farbempfindungen als Lichtgemische. In anderen Worten: Viele, sehr verschiedene Lichtgemische rufen dieselbe Farbempfindung hervor.

Wir beschäftigen uns zunächst nur mit den Farbempfindungen und fragen noch nicht danach, welchen Lichtsorten eine bestimmte Empfindung entspricht.

Wir beginnen mit der Diskussion eines häufig auftretenden Problems: Ein bestimmter Farbeindruck soll „übertragen“ werden. Ein Beispiel: Du möchtest deiner Freundin am Telefon beschreiben, welche Farbe dein neues T-Shirt hat. Und noch ein anderes Beispiel: Der Fernsehsender muss dem Fernsehempfänger ständig „mitteilen“, welche Farben die einzelnen Bildpunkte oder *Pixel* auf dem Bildschirm haben sollen.

Wir wollen herausfinden, wie eine solche Mitteilung oder Übertragung geschehen kann. Um das Problem deutlicher zu machen, betrachten wir vorher noch eine andere Situation, bei der aber dieselbe Schwierigkeit auftritt.

Du wohnst in einem kleinen Dorf und möchtest einem Freund in Amerika erklären, wo du wohnst. Dafür gibt es unter anderen die beiden folgenden Möglichkeiten:

- Du nennst ihm den Namen des Dorfes;
- du gibst die geographische Breite und die geographische Länge des Dorfes an.

Wenn du die erste Methode anwendest, muss dein amerikanischer Freund in einem Register nach deinem Dorf suchen. Dort stehen die Koordinaten, die es ihm gestatten, das Dorf auf einer Landkarte zu finden.

Die zweite Methode ist insofern einfacher, als es genügt, zwei Zahlen zu nennen. Wir können das auch so ausdrücken: Es gibt zwei Skalen oder Koordinatenachsen, die geographische Breite und die geographische Länge. Geben wir an, an welcher Stelle der beiden Skalen das Dorf liegt, so haben wir seinen Ort eindeutig beschrieben.

Nun zurück zu den Farben. Du möchtest also deiner Freundin die Farbe deines T-Shirts mitteilen. Die Situation ist ganz ähnlich wie bei der Beschreibung der Lage deines Dorfes. Es gibt eine riesige Liste mit Farbnamen: Gelb, Rot, Blau, Orange, Ocker, Pink, Oliv und viele andere jedem bekannte Namen, aber auch Namen, die weniger gebräuchlich sind und die Farben genauer beschreiben, wie Cadmi-umgelb, Chromoxidgrün oder Sepia.

Statt das Dorf mit seinem Eigennamen zu bezeichnen, kann man seine Koordinaten angeben. Statt eine Farbe mit einem Eigennamen zu bezeichnen, Abb. 23.1, kann man auch jede Farbe durch Koordinaten beschreiben.

Und noch einmal eine kurze Abschweifung von den Farben:

Um jemandem mitzuteilen, wie warm es ist, genügt es, eine einzige Angabe zu machen: die Temperatur. Man braucht eine einzige Skala.



Abb. 23.1
Eine Farbe durch einen Eigennamen zu beschreiben ist umständlich.

Um jemandem mitzuteilen, wo wir wohnen, müssen wir zwei Angaben machen: die geographische Länge und die geographische Breite. Man braucht zwei Skalen.

Wenn der Flugkapitän dem Tower die Position seines Flugzeugs mitteilen will, muss er drei Angaben machen: geographische Länge, geographische Breite und Flughöhe. Man braucht drei Skalen.

Und wieder zurück zu den Farben. Wie viele Angaben muss man machen, um eine Farbe zu beschreiben? Wie viele Skalen braucht man, um einen Farbeindruck eindeutig einzuordnen?

Sicher hast du schon einmal einen Satz Filzstifte gehabt. Und sicher hast du auch versucht, die Stifte in einer einzigen Reihe anzuordnen. Und sicher ist es dir nicht gelungen. Violett – Blau – Türkis – Grün – etc. Viele der Stifte passten gut in die Reihe, aber da war noch ein dunkelblauer, der weder zwischen Violett und Blau, noch zwischen Blau und Türkis gehörte.

Diese Feststellung bedeutet, dass es nicht möglich ist, alle Farben auf einer einzigen Skala anzuordnen. Man braucht mehr als nur eine Koordinatenachse. In anderen Worten: Der Farbraum ist nicht eindimensional.

Du könntest es mit zwei Skalen, mit einer zweidimensionalen Anordnung versuchen. Aber auch das würde dir nicht gelingen. Was man braucht, sind drei Skalen.

Farbeindrücke können sich in drei verschiedenen Eigenschaften voneinander unterscheiden. Diese Eigenschaften sind der *Farbton*, die *Sättigung* und die *Helligkeit*.

Der Farbraum ist dreidimensional.

Stell dir vor, wir haben eine sehr große Zahl verschiedenfarbiger Würfel vor uns. Alles, was es an deutlich unterscheidbaren Farben gibt, soll vertreten sein.

Wir nehmen nun zuerst alle Würfel mit einer kräftigen, leuchtenden Farbe heraus. Diese allein lassen sich in einer Reihe anordnen. Das Interessante an dieser Reihe ist, dass man sie zu einem Kreis schließen kann, Abb. 23.2. Man nennt diesen Kreis den *Farbenkreis*.



Abb. 23.2
Alle kräftigen Farben lassen sich auf einer geschlossenen Skala, dem Farbenkreis, anordnen.

Die verschiedenen Würfel auf dem Farbenkreis unterscheiden sich im Farbton. Die Farben auf dem Farbenkreis gehen stetig, kontinuierlich ineinander über. Wir versehen zwölf der Farben des Kreises mit eigenen Namen, Abb. 23.3:

Rot - Orangerot - Orange - Gelb - Gelbgrün - Grün - Türkis - Cyan - Blau - Blauviolett - Purpur - Magenta

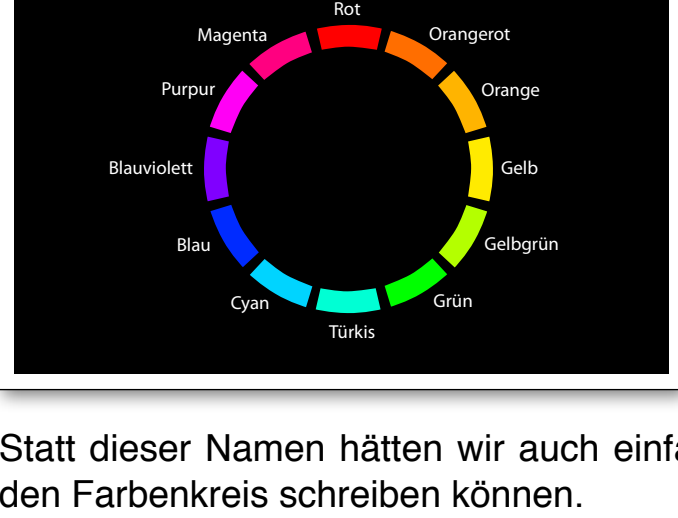


Abb. 23.3
Der Farbenkreis

Statt dieser Namen hätten wir auch einfach die Zahlen 1 bis 12 an den Farbenkreis schreiben können.

Wir finden nun in unserem Würfelhaufen zu jedem Farbton noch andere Würfel. Zum Beispiel zu unserem kräftig leuchtenden blauen Würfel finden wir noch andere, die auch blau sind, aber blasser, und wieder andere, die dunkler sind. Aber auch solche, die sowohl blasser als auch dunkler sind. „Blass“ und „dunkel“ sind zwei Eigenschaften, die sich nicht gegenseitig ausschließen.

Allein die hellen unter diesen blauen Würfeln lassen sich wieder in einer Reihe anordnen. An einem Ende steht der kräftig blaue, dazwischen die pastellblauen und am anderen Ende steht Weiß. So gibt es von jeder kräftigen Farbe aus einen stetigen Übergang zu Weiß. Man sagt, beim Übergang von der kräftigen Farbe zu Weiß ändere sich die *Sättigung*. Die kräftige Farbe ist die gesättigte, Weiß ist die völlig ungesättigte. Wir stellen die Würfel mit den blassen Farben in den Kreis der kräftigen Farben hinein, so dass die Sättigung zur Mitte hin abnimmt. Ganz in der Mitte befindet sich der weiße Würfel. Wir haben eine *Farbscheibe* erhalten, Abb. 23.4.

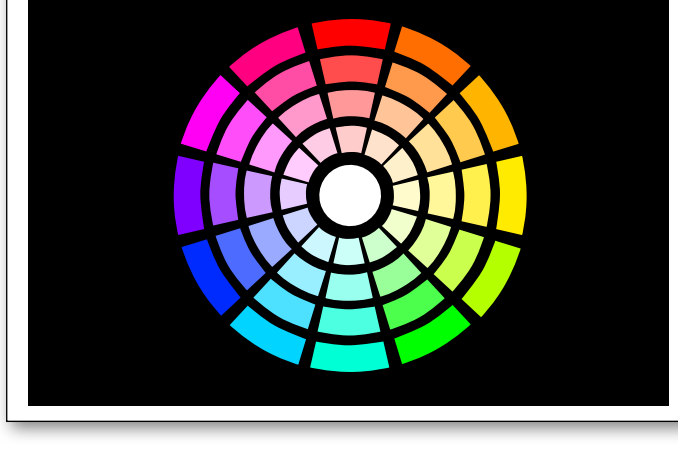


Abb. 23.4
Farbscheibe. Die Farben sind außen kräftig und werden zur Mitte hin blasser.

Schließlich finden wir zu jedem der blauen Würfel unterschiedlicher Sättigung noch verschiedene andere, die zwar dieselbe Sättigung haben, sich aber in der Helligkeit unterscheiden. Je geringer die Helligkeit, desto „schwärzer“ ist der Würfel.

Wir benutzen hier das Wort „hell“ in einem etwas anderen Sinn als es sonst im Zusammenhang mit Farben üblich ist: Was man umgangssprachlich Hellblau nennt, ist ein blasses, d. h. ein ungesättigtes Blau. Wir wollen aber hier von einem hellen Blau sprechen, wenn von der entsprechenden Stelle viel blaues Licht kommt.

Ein Farbeindruck lässt sich damit durch die drei Angaben „Farbton“, „Sättigung“ und „Helligkeit“ charakterisieren. Das bedeutet, dass wir aus unseren Würfeln ein dreidimensionales Gebilde bauen können, das ungefähr einen Zylinder darstellt, Abb. 23.5. Am oberen, äußeren Rand liegen die gesättigten, hellen Farben. Nach der Mitte zu nimmt die Sättigung ab, genau in der Mitte oben befindet sich Weiß. Nach unten hin nimmt die Helligkeit ab. Auf der Zylinderachse liegt oben Weiß, und nach unten schließen sich immer dunkler werdende Grautöne an. Die ganze untere Fläche des Zylinders ist schwarz. Dieser Zylinder stellt ein Modell für den dreidimensionalen *Farbraum* dar.

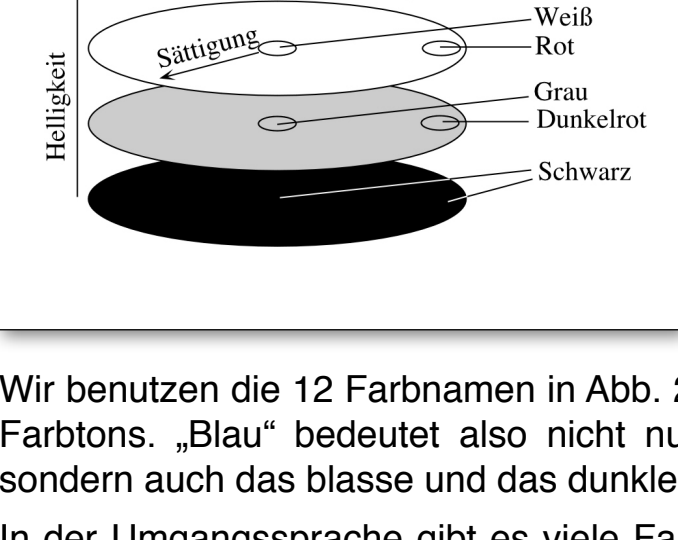


Abb. 23.5
Der Farbzylinder ist ein Modell des dreidimensionalen Farbraums.

Wir benutzen die 12 Farbnamen in Abb. 23.3 als Bezeichnung eines Farbtons. „Blau“ bedeutet also nicht nur das kräftige, helle Blau, sondern auch das blasser und das dunkle.

In der Umgangssprache gibt es viele Farbnamen, die nicht nur den Farbton, sondern auch die Sättigung, die Helligkeit oder beides festlegen. In Tabelle 23.1 sind einige Beispiele aufgeführt.

Name	Farbton	Sättigung	Helligkeit
Oliv	Grüngelb	stark	mittel
Beige	Gelb	schwach	mittel
Rosa	Rot	schwach	stark
Braun	Orange	stark	schwach

Tabelle 23.1
Farbton, Sättigung und Helligkeit einiger bekannter Farben

Du solltest nun in der Lage sein, jeden beliebigen Farbeindruck durch die Angabe von Farbton, Sättigung und Helligkeit zu beschreiben, und zwar auch „schmutzige“ oder „undefinierbare“ Farben.

Farbeindrücke können sich in drei Eigenschaften unterscheiden: im Farbton, in der Sättigung und in der Helligkeit.

Aufgaben

1. Statt als Zylinder könnte man den Farbraum noch auf verschiedene andere Arten darstellen. Wie?
2. Diskutiere die Frage nach Anfang und Ende der Skalen für Farbton, Sättigung und Helligkeit.
3. Die Farbtonskala ist eine in sich geschlossene Skala. Nenne eine andere Größe, deren Werte auf einer geschlossenen Skala liegen.
4. Beschreibe die Farben der folgenden Dinge durch die qualitative Angabe von Farbton, Sättigung und Helligkeit:
Brötchen, Kakaopulver, Trinkschokolade, Cola, Artischocke, deine Haut, Zinkdachrinne, Rost, Fußboden, Wände und Decke des Klassenzimmers, Eisenbahnwagen.

23.2 Das Mischen von Licht

Wir experimentieren mit zwei Diaprojektoren. Aber dort, wo man normalerweise das Dia hineinschiebt, setzen wir ein Farbfilter ein. Jeder der beiden Projektoren erzeugt an der Wand ein farbiges Quadrat. Wir orientieren die Projektoren so, dass sich die Quadrate etwas überlappen, Abb. 23.6.

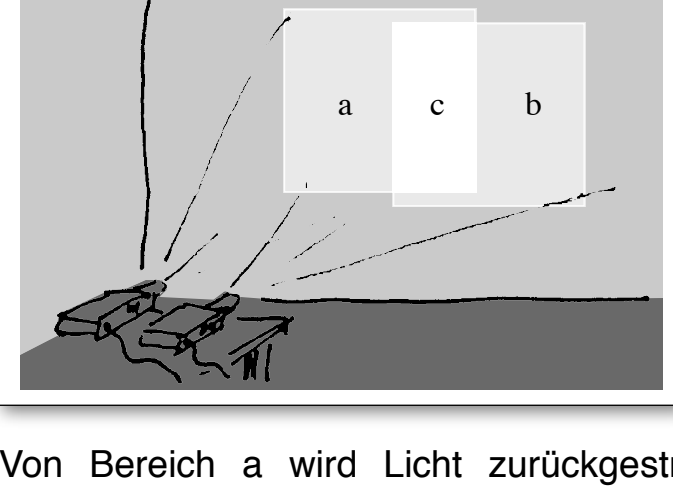


Abb. 23.6
Die hellen Quadrate, die die beiden Projektoren an der Wand erzeugen, überlappen sich im Bereich c.

Von Bereich a wird Licht zurückgestreut, das von dem einen Projektor kommt, von Bereich b Licht, das vom anderen kommt. Vom Überlappungsbereich c werden beide Lichtsorten gleichzeitig zurückgestreut. Wir nennen die Farben der drei Lichtsorten A, B und C. Das Licht, das von c kommt, ist ein Gemisch der Lichter, die von a und b kommen.

Wir benutzen die Projektoren zunächst, um noch einmal die Bedeutung der Begriffe Helligkeit und Sättigung zu zeigen.

In beide Projektoren wird ein grünes Filter eingeschoben. Die Farben A und B sind ein gesättigtes Grün. Welche Farbe C hat das Licht, das vom Bereich c kommt? Farbton und Sättigung von C müssen dieselben sein wie die von A und B. Allerdings kommt von jedem Quadratzentimeter von c doppelt so viel Licht wie von einem Quadratzentimeter von a oder von b. C unterscheidet sich also von A und B in der Helligkeit, Abb. 23.7.

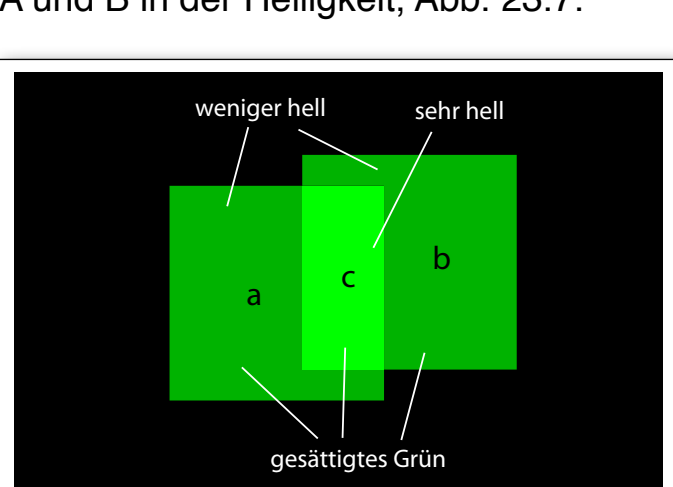


Abb. 23.7
Im Überlappungsbereich c ist die Helligkeit größer als in a und in b.

Wir nehmen nun eines der Filter heraus. Von dem entsprechenden Projektor kommt jetzt weißes Licht zur Wand. Das Licht von Bereich a ist gesättigt grün, und das von b ist weiß. Der Überlappungsbereich c sieht blassgrün aus. Die Farbe C ist also ein schwach gesättigtes Grün. C hat außerdem eine größere Helligkeit als A und auch als B, Abb. 23.8. Man verringert also die Sättigung der Farbe von Licht, wenn man weißes Licht hinzumischt.

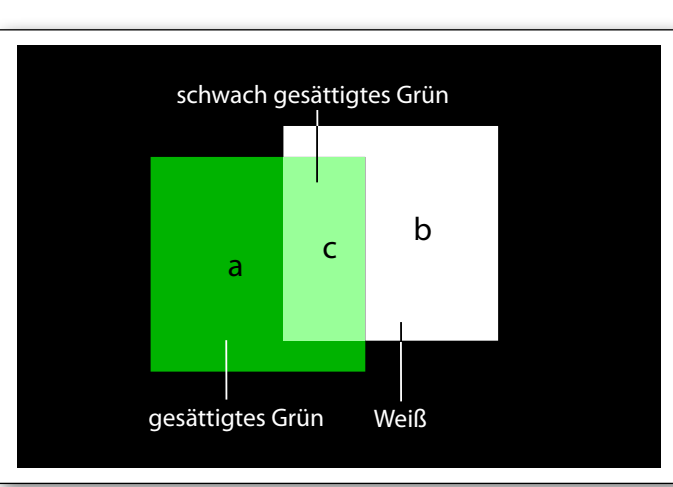


Abb. 23.8
Das Grün in a ist gesättigt. Das Grün im Überlappungsbereich c hat eine schwache Sättigung.

Wir machen nun etwas kompliziertere Mischungen. In die Projektoren werden verschiedene Farbfilter eingeschoben. Wir beginnen mit einem Rotfilter in dem einen Projektor und einem Gelbfilter im anderen. Die Farbe A ist Rot, die Farbe B Gelb und die Farbe C Orange, Abb. 23.9.

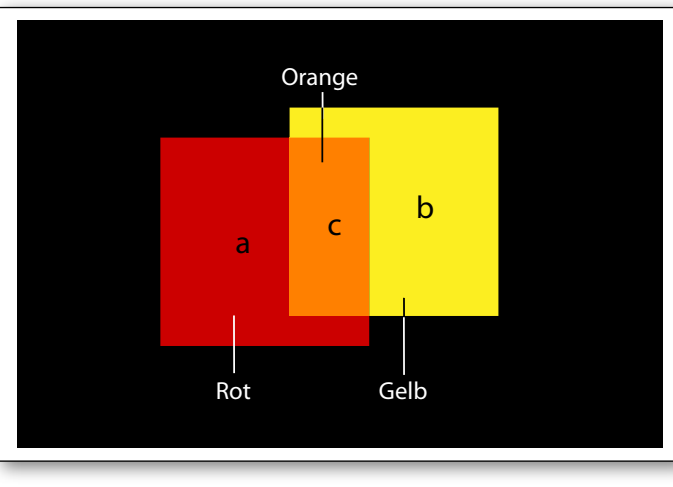


Abb. 23.9
Obwohl aus dem Überlappungsbereich zwei Lichtsorten kommen, erzeugt das Licht nur einen einzigen Farbeindruck.

Du wirst dich über die Beobachtung nicht wundern. Trotzdem ist es Wert, eine kleine Überlegung dazu anzustellen. Der Bereich c erscheint in einer einzigen Farbe, nämlich Orange. Wir sehen nicht die Farben Rot und Gelb einzeln. Unsere Augen „arbeiten“ also anders als unser Gehör. Wenn aus dem Lautsprecher gleichzeitig Töne kommen, die auf verschiedenen Instrumenten gespielt werden, so hören wir die einzelnen Instrumente heraus.

Wir benutzen für die folgenden Experimente nur solche Filter, die an der Wand eine gesättigte Farbe hervorrufen, solange ihr Licht nicht mit anderen Lichtsorten gemischt wird.

Es stellt sich heraus, dass man die Mischfarbe von zwei Lichtsorten leicht mit Hilfe der Farbscheibe voraussagen kann.

Zwei beliebige Farbeindrücke A und B sind auf dem Farbenkreis durch zwei Kreisbogen miteinander verbunden, Abb. 23.10. Wenn sich A und B nicht gegenüberliegen, ist der eine Bogen kürzer als der andere. Der Farbton der Mischfarbe von A und B ist immer ein Farbton des kürzeren Bogens. Die Mischfarbe ist gesättigt, wenn A und B sehr nah beieinander liegen, wenn also der kürzere Bogen sehr kurz ist.

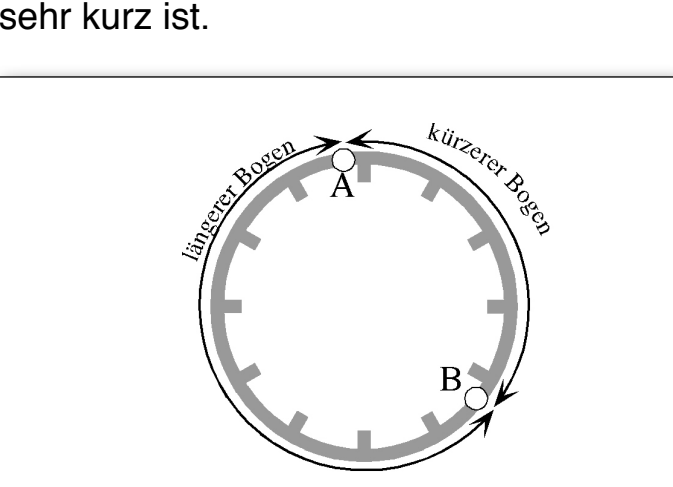


Abb. 23.10
Die beiden Farben A und B stehen auf dem Farbenkreis über zwei Kreisbogen miteinander in Verbindung.

Je länger der kürzere Bogen ist, desto ungesättigter ist die Mischfarbe C. Liegen sich A und B gegenüber, so ist die Mischfarbe völlig ungesättigt: Sie ist Weiß.

Beispiele: Orange und Gelbgrün liegen recht dicht beieinander. Die Mischfarbe ist ein ziemlich gesättigtes Gelb, Abb. 23.11a. Orangerot und Grün sind weiter voneinander entfernt. Die Mischfarbe ist wieder Gelb, aber ein weniger gesättigtes als vorher, Abb. 23.11b. Rot und Türkis schließlich sind noch weiter voneinander entfernt; weiter können zwei Farben auf dem Kreis gar nicht voneinander entfernt sein. Die Mischfarbe ist völlig ungesättigt, d. h. Weiß, Abb. 23.11c.

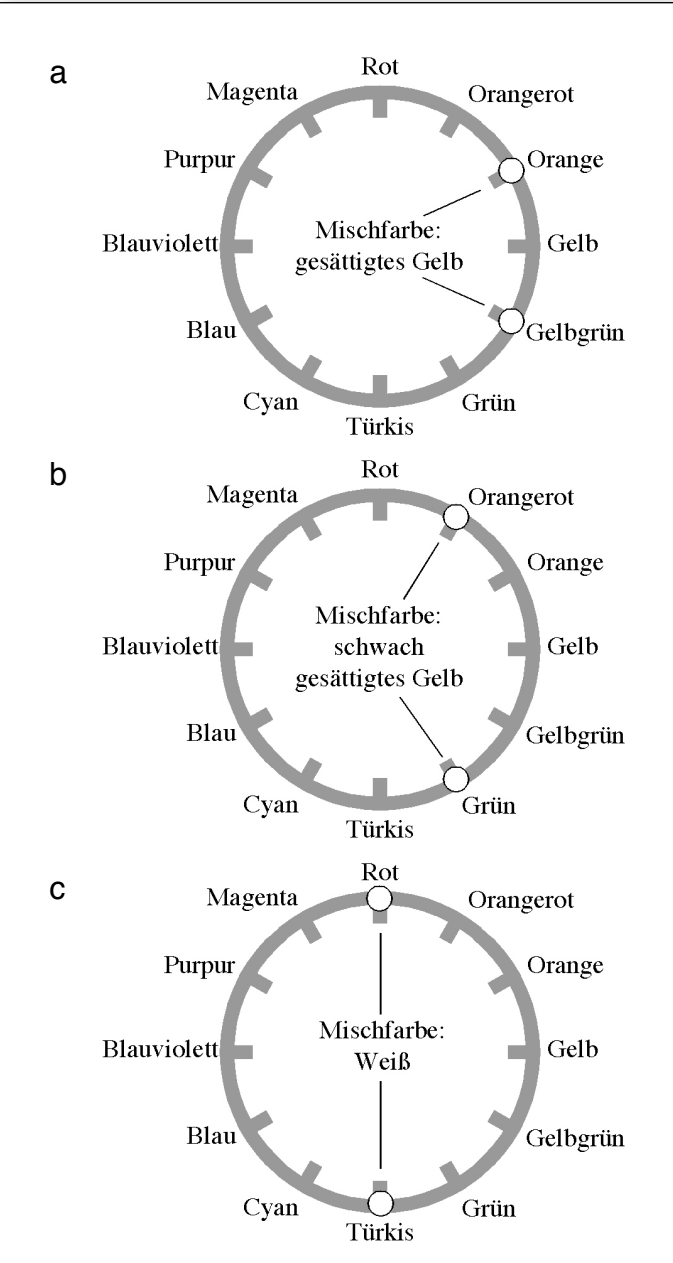


Abb. 23.11
(a) Orange + Gelbgrün = gesättigtes Gelb
(b) Orangerot + Grün = schwach gesättigtes Gelb
(c) Rot + Türkis = völlig ungesättigtes Gelb = Weiß

Die Farbe B, die mit Farbe A gemischt Weiß ergibt, nennt man die *Komplementärfarbe* zu A. So ist Blauviolett die Komplementärfarbe zu Gelb, Magenta die zu Grün, und Rot ist die Komplementärfarbe zu Türkis.

Dass die auf dem Farbenkreis gegenüberliegenden Farben gerade Weiß ergeben ist kein Zufall: Die genaue Lage der Farben auf dem Kreis ist gerade so festgelegt worden, dass Komplementärfarben einander gegenüberliegen.

Wir machen nun noch kompliziertere Lichtmischungen: Wir verwenden drei Projektoren und orientieren sie so, dass es drei Überlappungsgebiete zwischen je zwei Farben gibt, und ein Gebiet, in dem sich alle drei Quadrate überlappen, Abb. 23.12.

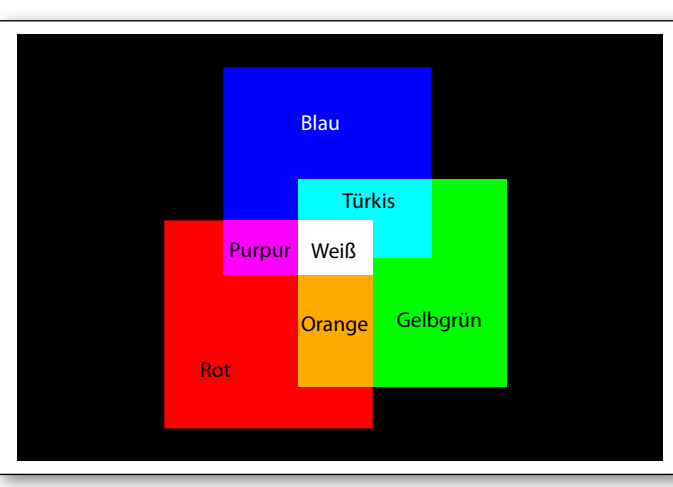


Abb. 23.12
Hier gibt es drei Überlappungsgebiete von je zwei Farben und ein Überlappungsgebiet von drei Farben.

Wir versuchen, durch Mischen von drei Farben Weiß zu erhalten. Vielleicht ahnst du schon, wie man es anstellen muss. Die drei Einzelfarben müssen auf dem Farbenkreis die Ecken eines gleichseitigen Dreiecks bilden, Abb. 23.13. So ergibt sich zum Beispiel:

Rot + Gelbgrün + Blau = Weiß

Purpur + Türkis + Orange = Weiß.

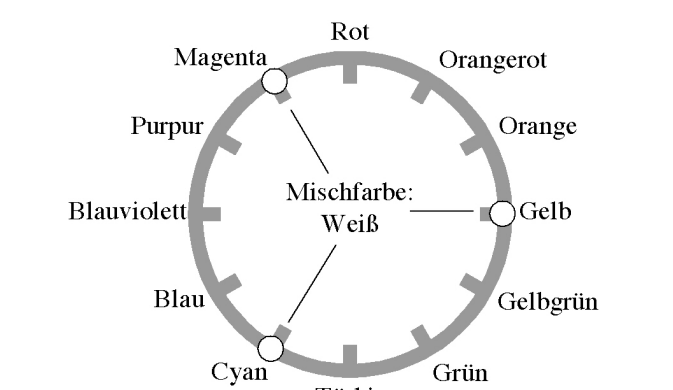


Abb. 23.13
Drei Farben, die auf dem Farbenkreis ein gleichseitiges Dreieck bilden, ergeben als Mischfarbe Weiß.

Entsprechend kann man mit 4 Projektoren aus 4 Farben Weiß erzeugen, wenn die 4 Farben die Ecken eines Quadrats bilden (ein Rechteck tut es übrigens auch). Und man könnte noch mehr Projektoren einsetzen. Immer wenn die Einzelfarben auf dem Farbenkreis ein gleichseitiges Vieleck bilden, entsteht als Mischfarbe Weiß. Im Prinzip entsteht so auch das Weiß des Lichts der Sonne, einer Glühlampe oder einer Leuchtstoffröhre. Alle diese Lichtquellen senden ein Gemisch aus vielen Lichtsorten aus, deren Farben außen auf dem Farbenkreis liegen.

23.3 Wie man das Auge täuschen kann – das Fernsehbild

Wir haben Licht gemischt, z.B. zwei Lichtsorten, die einzeln die Farbeindrücke Grün und Blau hervorrufen – und das ging so: von ein und demselben *Ort* des Schirms ging zur gleichen *Zeit* grünes und blaues Licht aus. Der resultierende Farbeindruck war Türkis.

Man kann nun das Mischen des grünen und blauen Lichts auch weniger sorgfältig machen, und trotzdem noch den Farbeindruck Türkis erhalten. Man kann das Auge sozusagen täuschen. Und das auf zweierlei Art.

Die Lichtbestandteile kommen nicht zur gleichen Zeit.

Auf einer kreisförmigen Scheibe befinden sich farbige Sektoren. Die Scheibe wird in einem dunklen Raum mit einem kräftigen weißen Lichtbündel beleuchtet und in schnelle Drehung versetzt, Abb. 23.14. Was man sieht, sind nicht mehr die Einzelfarben. Die ganze Scheibe erscheint in einer einheitlichen Farbe, nämlich der Mischfarbe. Also: Wenn wir einen roten und einen gelben Sektor haben, sieht man Orange; wenn wir drei Sektoren haben, und zwar einen roten, einen gelbgrünen und einen blauen, so sieht man Weiß. Genauer: ein dunkles Weiß, d. h. Grau.

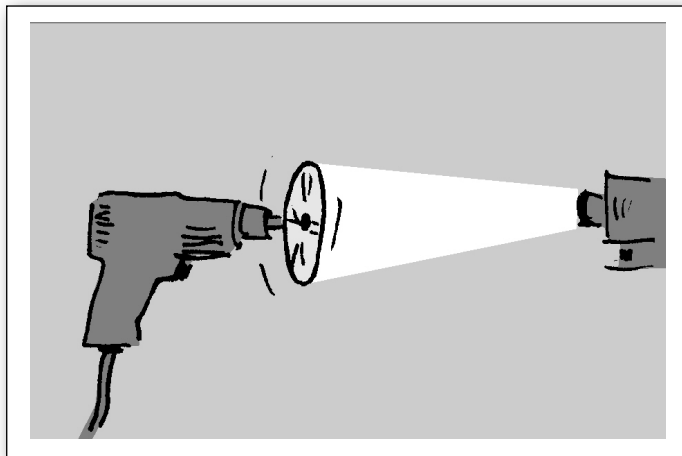


Abb. 23.14

Wenn sich die Scheibe sehr schnell dreht, sieht man die Mischfarbe aus den Farben der Sektoren.

Die Lichtbestandteile kommen nicht vom selben Ort.

Das grüne und das blaue Licht müssen auch nicht von genau derselben Stelle kommen. Das heißt auch, die beiden Lichtsorten müssen nicht genau auf dieselbe Stelle der Netzhaut fallen. Es reicht, dass die Stellen, von denen das grüne Licht kommt, so nah bei denen liegen, von denen das blaue kommt, dass sie das Auge nicht mehr „auflösen“ kann.

Man macht sich diese Möglichkeit oft zu Nutze. Der Fernseh- und der Computerbildschirm bestehen aus einem Raster von kleinen Flecken, den *Pixeln*. Von diesen gibt es drei Sorten. Die einen können rot, die zweiten gelbgrün und die dritten blau leuchten, Abb. 23.15. Schau dir einen Fernsehbildschirm ganz aus der Nähe mit einer Lupe an.

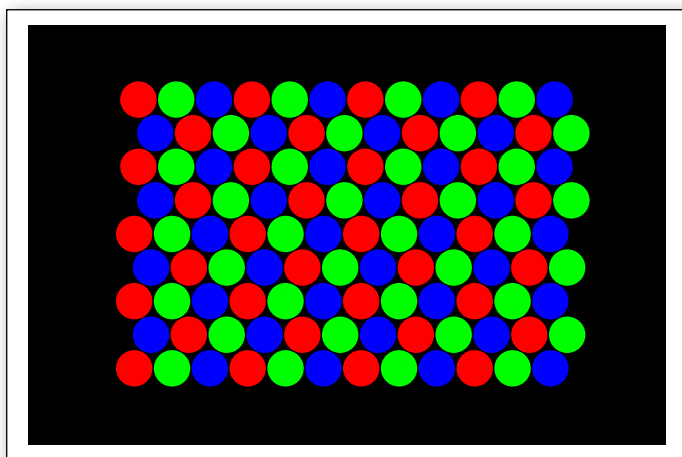


Abb. 23.15

Ausschnitt aus einem Fernsehbildschirm. Es gibt drei Sorten von Pixeln.

Wenn alle drei Pixelsorten leuchten, sieht man in größerer Entfernung nicht mehr die roten, gelbgrünen und blauen Pixel einzeln, sondern einheitlich Weiß. Leuchten nur die roten und die gelbgrünen, so sieht man gelb etc.

Man kann mit Hilfe der drei Pixelsorten jeden Farbeindruck erzeugen. Die Pixel werden dazu nicht nur ein- oder ausgeschaltet: Jedes Pixel kann einzeln hell oder dunkel gestellt werden. Wir betrachten einige Beispiele.

Die roten und die blauen Pixel seien völlig dunkel. Der Bildschirm ist dann einfach gelbgrün. Lässt man nun die Helligkeit der roten Pixel langsam ansteigen, so wird der Bildschirm an der entsprechenden Stelle langsam und stetig gelb, und dann, wenn die roten Pixel mit maximaler Helligkeit leuchten, etwas orange. Dreht man nun die Helligkeit der gelbgrünen Pixel langsam herunter, so ändert sich die Farbe des Bildschirms weiter in Richtung Rot, bis er schließlich, wenn die gelbgrünen Pixel ganz ausgeschaltet sind, ganz rot ist.

Auf entsprechende Art kommt man von Rot über Purpur zu Blau und von Blau über Türkis wieder zurück zu Gelbgrün.

Die blassen Farben erhält man, wenn nicht nur zwei Pixelsorten leuchten, sondern noch Licht von der dritten Sorte hinzugenommen wird. Leuchten alle drei Pixelsorten mit maximaler Helligkeit, so erhält man Weiß.

Aufgaben

1. Wie muss die Helligkeit der drei Pixelsorten des Fernsehbildschirms eingestellt werden, damit die folgenden Farben entstehen? Gelb, Violett, Pink, Oliv, Ocker, Dunkelgrau.
2. Wir hatten gesagt, mit Hilfe der drei Pixelsorten des Fernsehbildschirms könne man alle Farbeindrücke erzeugen. Diese Behauptung ist nicht ganz richtig. Warum nicht?

23.4 Noch einmal der Farbraum

Und noch einmal ein Umweg. Wir wollen wieder jemandem die Lage unseres Dorfes mitteilen. Du erinnerst dich: Es genügt dazu, die geographische Länge und die geographische Breite, d. h. zwei Zahlen anzugeben. Wir nehmen nun an, das ganze Land sei mit einem System von Straßen durchzogen, die ein quadratisches Gitter bilden. Die Straßen verlaufen aber nicht in Nord-Süd- und Ost-West-Richtung, sondern diagonal: die einen von Südwest nach Nordost und die anderen von Südost nach Nordwest, Abb. 23.16. Die Straßen bilden also ein rechtwinkliges Koordinatensystem. Der Nullpunkt liegt in der Landeshauptstadt.

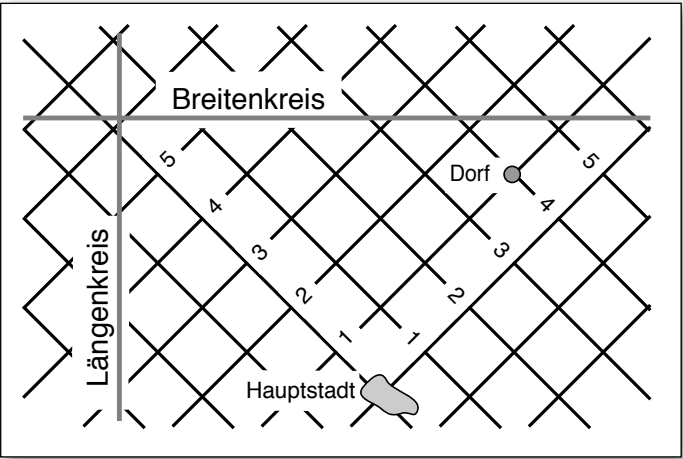


Abb. 23.16
Die Straßen bilden ein Koordinatensystem, das gegen die Längen- und Breitenkreislinien um 45° gedreht ist.

Wir können nun die Lage unseres Dorfes auf eine andere Art angeben als vorher. Wieder müssen wir aber zwei Zahlenangaben machen: Die Nordost-Koordinate und die Nordwest-Koordinate. Wir ziehen daraus einen wichtigen Schluss: Egal, was für ein Koordinatensystem man benutzt, man muss zwei Zahlenangaben machen. Abb. 23.17 zeigt noch eine dritte Möglichkeit. Hier muss man die Entfernung r vom Ursprung und den Winkel α gegen die Gerade g angeben, um die Lage des Dorfes zu beschreiben; also wieder zwei Zahlen.

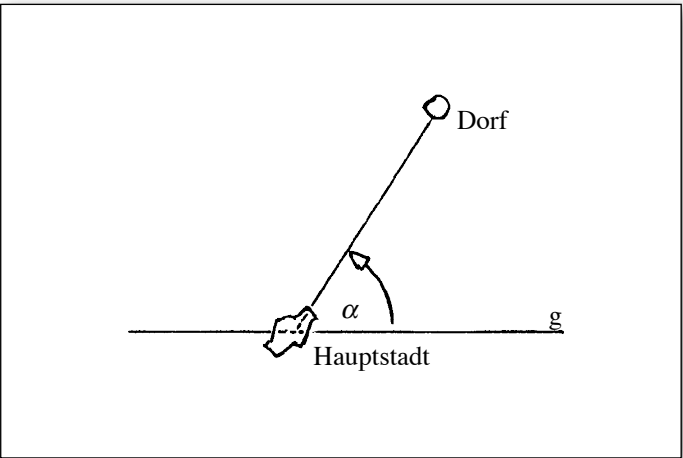


Abb. 23.17
Um den Ort des Dorfes festzulegen, gibt man den Abstand von der Hauptstadt an, sowie den Winkel gegen g .

Bei den Farben sind wir in einer ähnlichen Lage, nur sind es hier drei Angaben, die man machen muss. Genau genommen handelt es sich auch hier um drei *Zahlen*-Angaben. Wir haben uns allerdings um die Eichung der Farbskalen nicht gekümmert und geben daher die Lage eines Farbeindrucks auf den drei Skalen nur näherungsweise an.

Genauso wie bei unserem Dorf kann man auch das Koordinatensystem der Farbeindrücke unterschiedlich wählen. Und wie man es auch wählt, immer muss man drei Angaben machen, um einen Farbeindruck zu beschreiben.

Wir haben schon zwei Beispiele für unterschiedliche Farb-Koordinatensysteme kennen gelernt:

1. Farbton – Sättigung – Helligkeit;
2. Helligkeit von Rot – Helligkeit von Gelbgrün – Helligkeit von Blau.

Im Fall Nr. 2 sagt man auch, man verwende zur Beschreibung eines Farbeindrucks drei *Grundfarben*, nämlich Rot, Gelbgrün und Blau.

Sicher kannst du dir denken, wie weitere Farb-Koordinatensysteme aussehen könnten. Man nimmt als Grundfarben drei andere Farben, die auf dem Farbkreis ein gleichseitiges Dreieck bilden, also zum Beispiel:

Orange – Türkis – Purpur.

Auf den Koordinatenachsen ist also die Helligkeit dieser drei Farben aufgetragen.

Man hätte die Fernsehbildschirme so einrichten können, dass die drei Pixelsorten diese Farben haben. Man müsste dann zum Bildschirm statt der Rot-Gelbgrün-Blau-Koordinaten die Orange-Türkis-Purpur-Koordinaten übertragen.

Aufgabe

Nimm an, ein Fernsehbildschirm arbeite mit den Pixelfarben Orange – Türkis – Purpur (statt mit Rot – Gelbgrün – Blau). Wie muss die Helligkeit der drei Pixelsorten eingestellt sein, damit die folgenden Farbeindrücke entstehen: Rot, Blau, Rosa, Weiß, Braun, Schwarz?

23.5 Spektren

Wir diskutieren in diesem Abschnitt nicht den Farbeindruck, den Licht über unsere Augen erzeugt, sondern wir beschäftigen uns mit der Zusammensetzung des Lichts selbst.

Licht besteht im Allgemeinen aus mehreren oder vielen Lichtsorten, sichtbaren und unsichtbaren.

Und uns geht es jetzt um die Zusammensetzung des Lichts. Dabei spielt es zunächst gar keine Rolle, dass wir mit Hilfe des Lichts sehen und dass wir Farben wahrnehmen können.

Das erste Problem: Wir möchten die Zusammensetzung eines bestimmten Lichtgemischs beschreiben. Vielleicht denkst du: Das können wir doch schon. Wir wissen doch, dass man dazu drei Angaben machen muss. Nicht richtig! Mit drei Angaben kann man den Farbeindruck in unseren Augen beschreiben, aber nicht das Lichtgemisch. Denn viele verschiedene Lichtgemische können denselben Farbeindruck erzeugen.

Um zu sehen, wie man ein Lichtgemisch eindeutig charakterisiert, diskutieren wir zunächst ein anderes, aber verwandtes Problem.

Wir wollen die Altersstruktur der Bevölkerung einer Stadt graphisch darstellen. Abb. 23.18a zeigt eine Möglichkeit. Die Menschen wurden eingeteilt in Altersgruppen: von 0 bis 20 Jahren, von 20 bis 40 Jahren usw. Jeder Mensch fällt in eine dieser Gruppen.

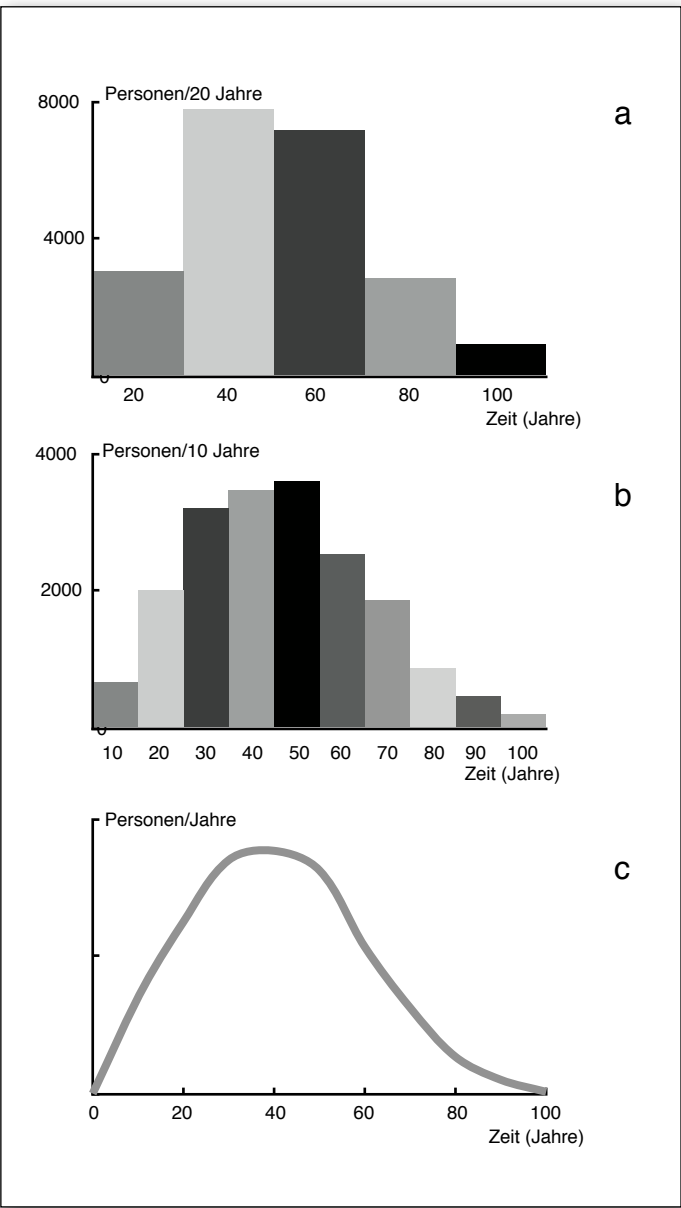


Abb. 23.18 Graphische Darstellungen der Altersstruktur einer Stadt. (a) Zwanzigjahresintervalle; (b) Zehnjahresintervalle; (c) stetige Darstellung

Du siehst aber gleich, dass diese Auftragung nicht sehr genau ist. Man kann ja nicht einmal die Babys von den Abiturienten unterscheiden. Dem kann aber abgeholfen werden: Man wählt eine feinere Einteilung, Abb. 23.18b. Und wem das noch nicht genügt, der kann die Einteilung noch feiner machen. Schließlich werden die Schritte so klein, dass man die Bevölkerungszahl pro Altersgruppe durch eine glatte Linie darstellen kann, Abb. 23.18c. Wir nennen eine solche Kurve ein Altersspektrum.

Unser Problem beim Licht ist ganz ähnlich. Wir erinnern uns zunächst noch einmal daran, dass sich Licht immer bewegt. Wir haben es beim Licht immer mit einem Strom zu tun.

Jedes Licht setzt sich nun zusammen aus Beiträgen von Licht unterschiedlicher Wellenlängen. (Zur Erinnerung: „Sichtbares“ Licht hat Wellenlängen zwischen 400 nm und 800 nm.)

Um die Zusammensetzung eines bestimmten Gemischs darzustellen, teilen wir die Wellenlängenachse in Bereiche ein, z. B. in Bereiche von 20 nm. Der Balken über jedem Bereich gibt an, wie viel Licht das Gemisch aus diesem Bereich enthält, Abb. 23.19a. Als Maß für den Lichtstrom nehmen wir die Energiestromstärke, die Zahl der Joules, die das Licht des betrachteten Wellenlängenbereichs pro Sekunde transportiert.

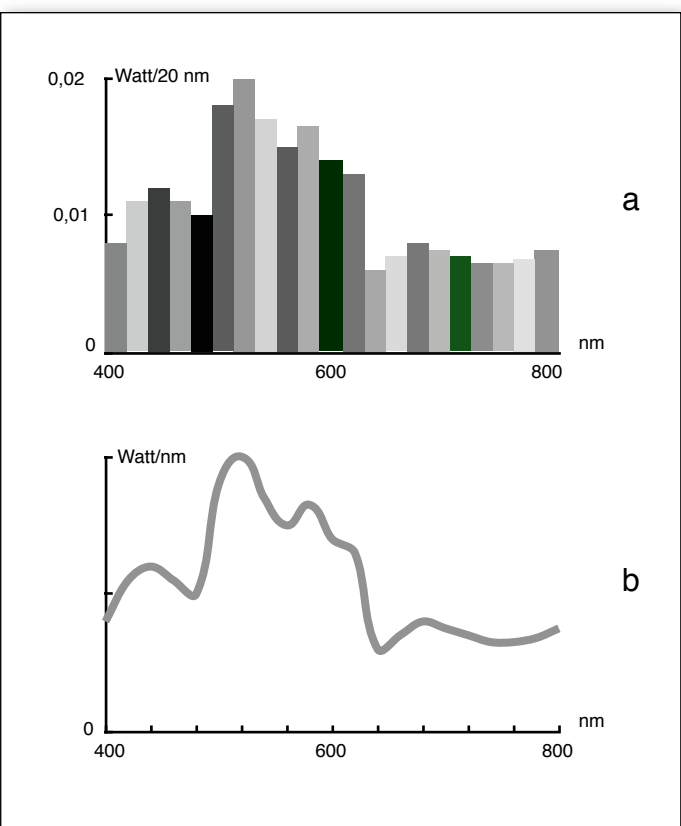


Abb. 23.19 Graphische Darstellungen der Zusammensetzung eines Lichtgemischs. (a) 20-nm-Intervalle; (b) stetige Darstellung

Wieder könnte es sein, dass uns die Auftragung zu grob ist. Wir verfeinern sie so weit, bis wir eine kontinuierliche Kurve erhalten: ein *Spektrum*, Abb. 23.19b.

Geräte, mit denen man Spektren aufnehmen kann, heißen *Spektrometer*. In vielen Spektrometern wird die Lichtzerlegung mit Hilfe eines Prismas erreicht.

Wie das Spektrum eines bestimmten Lichtgemischs aussieht, erkennt man grob, wenn man das Licht mit einem Prisma zerlegt und die in verschiedene Richtungen abgelenkten Lichtstrahlen auf einem Schirm auffängt. Wir schauen uns die Spektren verschiedener Lichtquellen an. Abb. 23.20a zeigt das Spektrum des Sonnenlichts, Abb. 23.20b das einer Glühlampe und das von Abb. 23.20c gehört zu einer so genannten Natriumdampflampe.

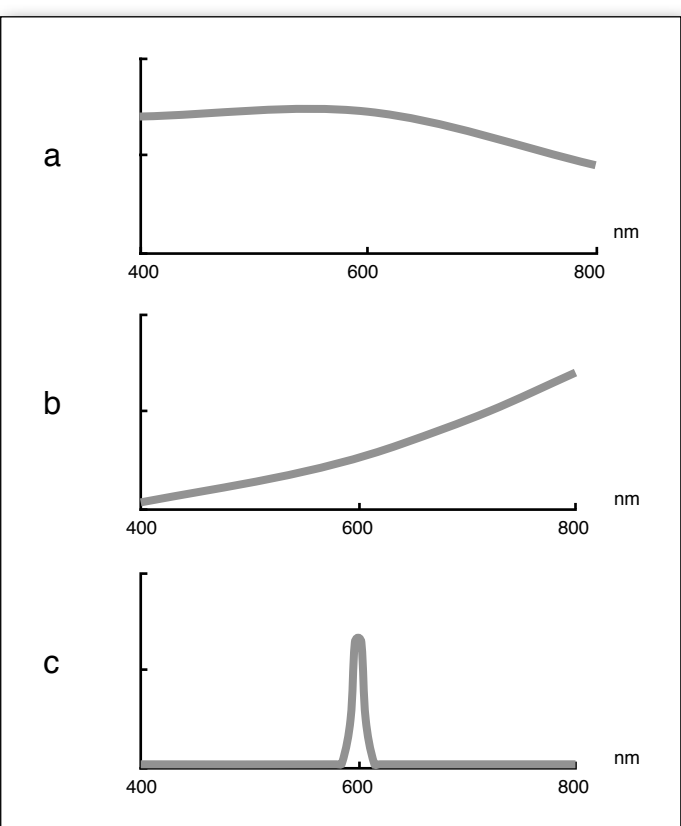


Abb. 23.20 Spektren. (a) Sonnenlicht; (b) Glühlampenlicht; (c) Natriumdampflampe

Sonnen- und Glühlampenspektrum enthalten Licht aller Wellenlängen. Die Natriumdampflampe enthält praktisch nur Licht einer einzigen Wellenlänge: *monochromatisches Licht*. Lampen, die nur Licht einer einzigen Wellenlänge oder einiger weniger Wellenlängen abgeben, gibt es noch viele andere. Man nennt sie *Spektrallampen*.

23.6 Der Zusammenhang zwischen Spektrum und Farbeindruck

Wir betrachten noch einmal die Farbscheibe, d. h. die Oberseite des Farbzyinders: Alle Farben haben eine große Helligkeit. Am äußeren Rand liegen die gesättigten Farben. Zur Mitte hin werden sie immer weniger gesättigt. Ganz in der Mitte liegt das Weiß. Welche Spektren gehören nun zu den verschiedenen Farbeindrücken der Farbscheibe?

Monochromatisches Licht erzeugt immer einen Farbeindruck maximaler Sättigung.

Die Umkehrung, nämlich, dass die gesättigten Farbeindrücke durch monochromatisches Licht hervorgerufen werden, gilt allerdings nicht immer. Sie gilt nur für die Farben, die in Abb. 23.21 durch eine gestrichelte Linie markiert sind.

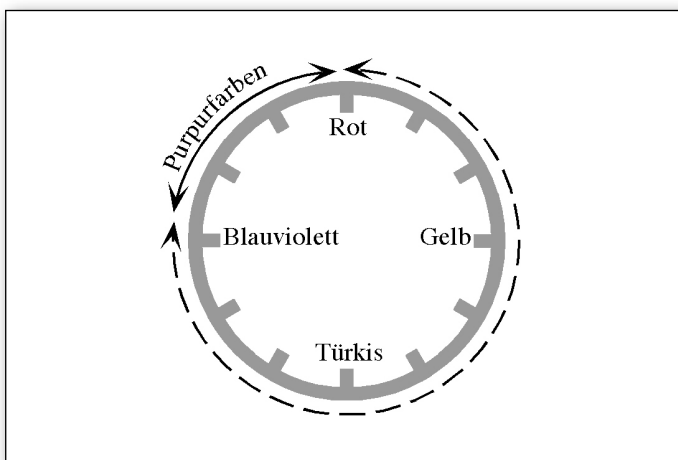


Abb. 23.21

Nur zu den Farben im gestrichelt markierten Bereich des Farbkreises gehört eine einzige Lichtsorte.

Jede Farbe, die nicht auf dem Rand der Farbscheibe liegt, lässt sich durch mehr als nur ein Spektrum erzeugen. Je ungesättigter die Farbe ist, desto mehr Möglichkeiten gibt es. Für Weiß hattest du das schon gesehen. Weiß erhält man zum Beispiel durch Mischen der zwei Lichtsorten, die zu gegenüber liegenden Punkten des Farbkreises gehören.

Wir sehen also: Mit Ausnahme der Farben auf dem Rand der Farbscheibe gehören zu jeder Farbe viele verschiedene Spektren.

Unsere Augen nehmen also von der ganzen Kompliziertheit eines Spektrums nur sehr wenig wahr. Dies ist ein Beispiel für *Datenreduktion*. Mit dem Spektrum kommen sehr viele Daten in unsere Augen. Weitergeleitet zum Gehirn werden aber viel weniger. Statt des ganzen Spektrums werden sozusagen nur drei Zahlen weitergegeben. (Vergiss nicht, dass wir hier nur von einem einzigen Bildpunkt, d. h. einer einzigen Stelle der Netzhaut sprechen.)

Wir sind bisher einem Problem ausgewichen. Den gesättigten Farben, die zwischen Rot und Violett liegen – Purpur, Magenta ... – entspricht kein monochromatisches Licht. Man nennt diese Farben die *Purpurfarben*. Oberhalb von Rot auf der Wellenlängenskala wird ja das Licht nicht purpur, sondern infrarot, also unsichtbar. Und unterhalb von violett wird es auch nicht purpur, sondern ultraviolett, also auch unsichtbar.

Um Farbeindrücke der gesättigten Purpurfarben zu erzeugen, muss man *zwei* reine Lichtsorten miteinander mischen: rotes und violettes Licht. Je nach dem Anteil der beiden Lichtsorten liegt der Farbeindruck näher beim Violett oder näher beim Rot.

Aufgaben

1. Skizziere zwei verschiedene Spektren, die zum Farbeindruck Blassgelb gehören.
2. Skizziere drei verschiedene Spektren, die zum Farbeindruck Weiß gehören.