

# ELEKTROMAGNETISMUS

- Das ist ein wichtiges Kapitel.

# Strom und Magnetismus



1 HANS CHRISTIAN OERSTED

## Die „verrückte“ Kompassnadel

Im Jahre 1820 experimentierte der dänische Physiker HANS CHRISTIAN OERSTED (1777–1851) mit einem Strom führenden Draht und einer Kompassnadel. OERSTED wollte herausfinden, ob es einen Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus gibt. Dazu untersuchte er die Auswirkung eines Strom führenden Drahtes auf eine Kompassnadel.

OERSTEDS Experiment kannst du in Versuch 1 selbst durchführen. Dabei beobachtest du Folgendes: Sobald Strom durch den Draht fließt, wird die Kompassnadel aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt (▷ B 3).

Fließt der Strom in umgekehrter Richtung durch den Draht, dreht sich die Nadel in die andere Richtung (▷ B 3).

▶ Eine Kompassnadel wird aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt, wenn sie sich in der Nähe eines Strom führenden Leiters befindet.

Die Ablenkung einer Kompassnadel erfordert ein Magnetfeld. Was ist die Ursache für dieses Feld in Versuch 1?

Du hast im Versuch beobachtet, dass sich die Nadel nur bei Stromfluss bewegt. Also muss der Strom die Ursache dafür sein, dass im Raum um den Draht eine Magnetkraft wirkt.

Sobald Strom durch den Kupferdraht fließt, baut sich um ihn herum ein Magnetfeld auf. Nach dem Ausschalten des Stromes verschwindet dieses Magnetfeld wieder. Die Kompassnadel pendelt in ihre Ausgangsposition zurück.

▶ Im Raum um einen stromdurchflossenen Leiter existiert ein Magnetfeld.

## Stärkere Magnetfelder

Das Magnetfeld um einen stromdurchflossenen Leiter ist schwach. Wenn man aber den Draht verlängert und zu einer Spule aufwickelt, wird das entstehende Magnetfeld deutlich stärker.

Je mehr Windungen die Spule hat, desto stärker ist bei gleicher Stromstärke das Magnetfeld (▷ V 3).

Wenn du die Stromstärke durch eine Spule erhöhst, vergrößert sich ebenfalls die magnetische Kraft auf die Kompassnadel (▷ V 2c).

Befindet sich im Inneren einer Spule noch ein Eisenkern, verstärkt dieser bei gleicher Windungszahl und Stromstärke ebenfalls das entstehende Magnetfeld (▷ V 2b).

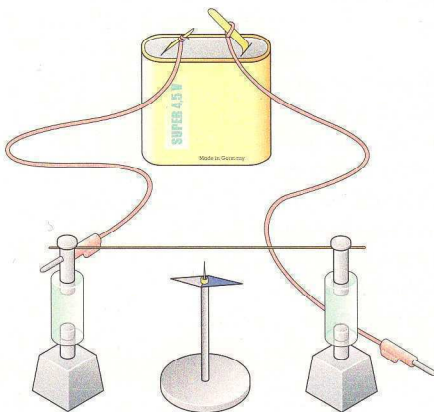
▶ Das Magnetfeld um eine stromdurchflossene Spule lässt sich verstärken durch

- eine größere Windungszahl der Spule,
- die Verwendung eines Eisenkerns und
- eine höhere Stromstärke durch die Spule.

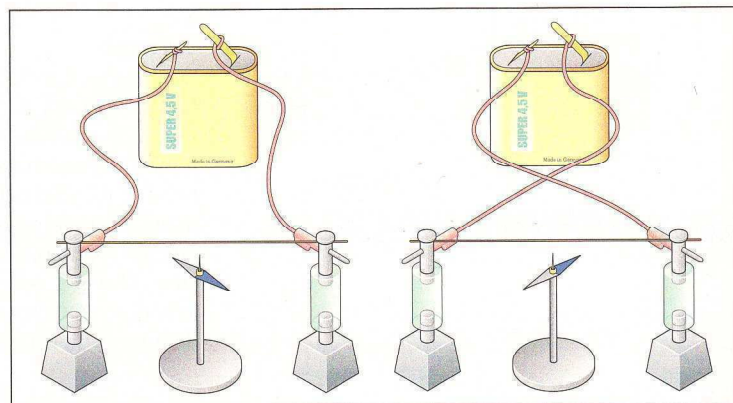
## Der Elektromagnet

Eisennägel werden von einer Spule angezogen, sobald Strom durch ihre Windungen fließt (▷ B 4). Eine anziehende Wirkung hast du auch schon zwischen einem Dauermagneten und Eisennägeln beobachtet. Die Strom führende Spule verhält sich wie ein Magnet. Wird der Stromfluss unterbrochen, fallen die Nägel ab.

▶ Eine Strom führende Spule ist ein Elektromagnet.

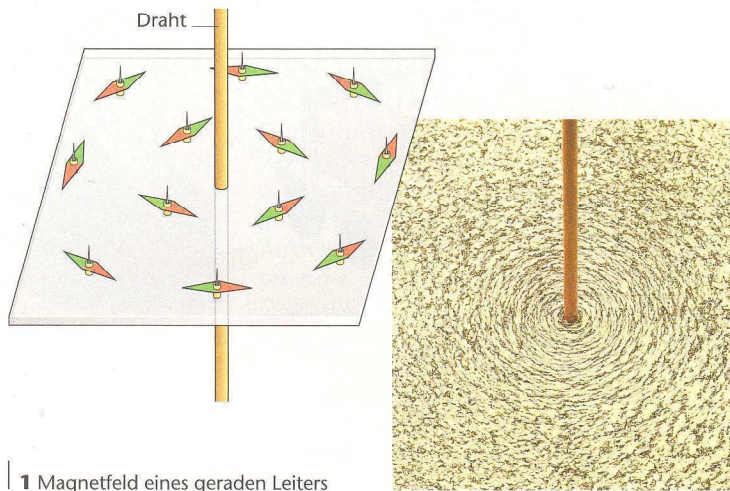


2 Zu Versuch 1

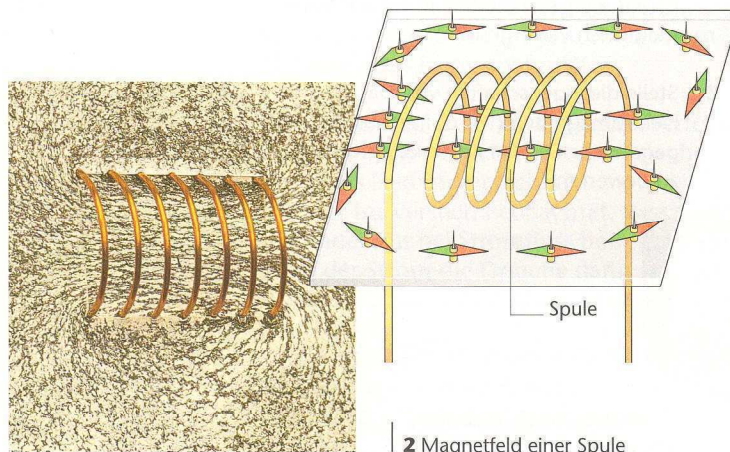


3 Ablenkung einer Kompassnadel bei verschiedenen Stromrichtungen.

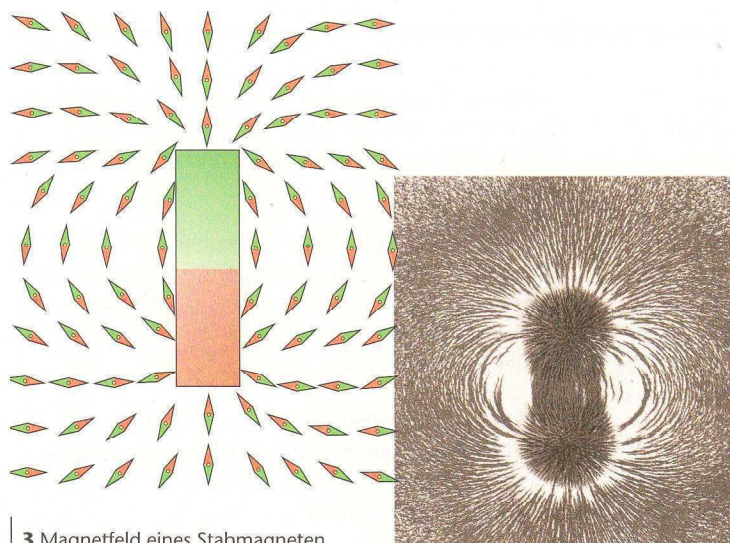
## Magnetfelder um Draht und Spule



1 Magnetfeld eines geraden Leiters



2 Magnetfeld einer Spule



3 Magnetfeld eines Stabmagneten

**Magnetfelder werden sichtbar gemacht**  
Du weißt bereits, dass sich Kompassnadeln und Eisenfeilspäne in Magnetfeldern ausrichten. Sie können daher als Hilfsmittel dienen, um den Magnetfeldern von stromdurchflossenen Drähten und Spulen auf die Spur zu kommen.

Bild 1 zeigt eine Plexiglasplatte, durch die ein elektrischer Leiter führt. Auf der Platte befinden sich zahlreiche Magnetnadeln. Nach Einschalten des Stromes durch den Draht richten sich alle Magnetnadeln rund um den Leiter aus. Wenn man die Nadeln in Gedanken miteinander verbindet, ergeben sich mehrere geschlossene Kreislinien.

Damit man die Kreise noch besser sieht, kann man Eisenfeilspäne benutzen. Die Späne richten sich um den Leiter herum aus. Deutlich ist die Struktur der magnetischen Feldlinien zu erkennen.

Aus diesen Versuchen kann man auf den Verlauf der Feldlinien schließen:

Die magnetischen Feldlinien um einen geraden stromdurchflossenen Leiter sind kreisförmig.

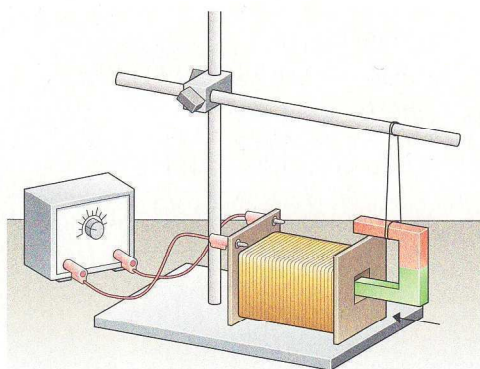
### Magnetfelder um Spulen

Im Bild 2 siehst du, wie sich Kompassnadeln und Eisenfeilspäne in der Umgebung einer stromdurchflossenen Spule ausrichten. Die Struktur erinnert an ein Magnetfeld um einen Stabmagneten ( $\triangleright$  B 3). So hat die Spule ebenfalls einen magnetischen Nord- und Südpol.

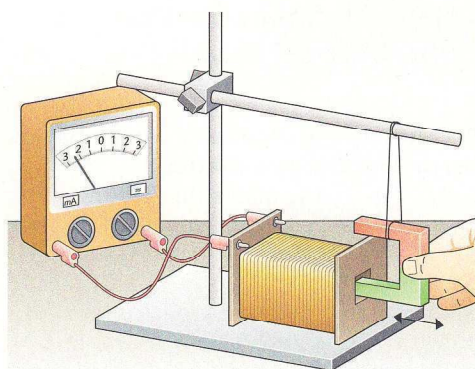
Im Unterschied zum Stabmagneten können wir bei der Spule den Verlauf der Feldlinien im Inneren beobachten. Dort verlaufen die Feldlinien annähernd parallel ( $\triangleright$  B 2). In diesem Bereich hat das magnetische Feld überall die gleiche Stärke und die gleiche Richtung.

Das Magnetfeld um eine stromdurchflossene Spule ähnelt dem eines Stabmagneten. Bei einer stromdurchflossenen Spule sind die Magnetfeldlinien geschlossen.

## Die elektromagnetische Induktion



1 Eine stromdurchflossene Spule ist ein Elektromagnet.



2 Experiment zur Induktion

„Gute magnetelektrische Maschinen, die billig starke Ströme erzeugen können, werden technisch außerordentlich wichtig werden und viele Industriebetriebe ganz umgestalten.“

WERNER VON SIEMENS, 1889

### Ein umkehrbares Experiment

Eine Spule wird zum Elektromagneten, wenn Strom durch ihre Windungen fließt. Diese Erfahrung hast du bereits in Experimenten gemacht.

Um die Strom führende Spule im Bild 1 hat sich ein Magnetfeld aufgebaut. Zwischen diesem und dem Magnetfeld des Dauermagneten wirken Kräfte. Der Magnet wird in die Spule gezogen.

Der englische Physiker MICHAEL FARADAY (1791–1867) fragte sich, ob man dieses Phänomen auch umkehren könnte. Ist es möglich, mithilfe von Magneten einen Stromfluss zu erzeugen? FARADAY stellte sich die Aufgabe: „Convert magnetism into electricity.“

### Strom mit Spule und Magnet

Im Bild 2 ist die Spule nicht mehr an die Spannungsquelle angeschlossen. Zwischen ihre Enden ist nur ein Amperemeter geschaltet. Der Magnet wird von Hand ausgelenkt, anschließend lässt man ihn in die Spule schwingen.

Während der Magnet sich bewegt kannst du am Amperemeter eine wechselnde Anzeige beobachten. Das bedeutet, dass durch den Spulendraht Strom fließt, obwohl die Spule mit keiner Spannungsquelle verbunden ist.

FARADAY konnte also zeigen, dass sich der Oersted-Versuch umkehren lässt.

### Spannung wird induziert

Wenn ein Strom durch die Spule fließt, muss eine Spannung vorhanden sein. Der Nachweis lässt sich einfach erbringen, indem im Versuch (▷ B 2) das Amperemeter durch ein Voltmeter ersetzt wird. Der Zeigerausschlag weist die Spannung nach. Die Spannung entsteht aber nur, solange sich der Magnet bewegt.

Diesen Vorgang der Spannungserzeugung bezeichnet man als **elektromagnetische Induktion**.

Man sagt, in der Spule wird eine Spannung induziert. Die entstehende Spannung nennt man deshalb **Induktionsspannung**  $U_{\text{ind}}$ .

### Voraussetzung für Induktion

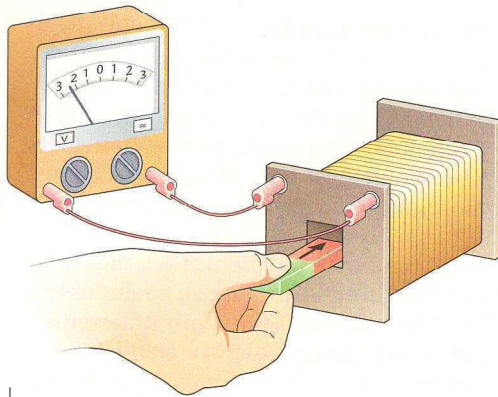
Wird wie im Bild 3 der Stabmagnet auf die Spule zu bewegt, zeigt das Messgerät eine Spannung an (▷ V 1a). Die Richtung des Zeigerausschlages hängt vom verwendeten Magnetpol und von der Bewegungsrichtung ab (▷ V 1a; V 1b).

Auch wenn der Magnet ruht und die Spule bewegt wird, entsteht eine Induktionsspannung (▷ V 1c). Befinden sich allerdings Spule und Magnet in Ruhe oder werden beide miteinander in die gleiche Richtung bewegt, entsteht keine Induktionsspannung (▷ V 1a; V 1d).

▶ Nur wenn Spule und Dauermagnet gegeneinander bewegt werden, entsteht eine Spannung.

Was geschieht bei der Bewegung von Spule oder Dauermagnet?

Der Stabmagnet ist von einem konstanten Magnetfeld umgeben. Die Spule befindet sich im Einfluss dieses Magnetfeldes.



3 Zu Versuch 1a, b

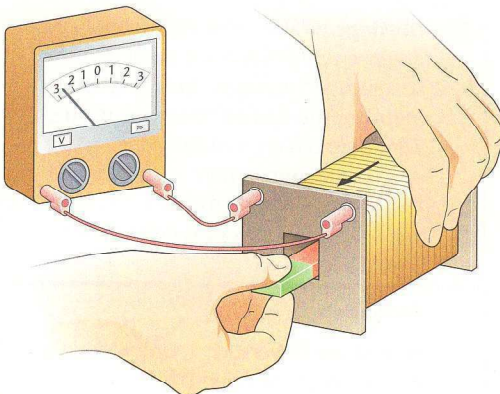
Werden Stabmagnet und Spule aufeinander zu bewegt, dann nimmt die magnetische Wirkung des Stabmagneten auf die Spule zu. Sie befindet sich in einem stärker werdenden Magnetfeld.

Werden Magnet und Spule wieder voneinander entfernt, dann verringert sich seine magnetische Wirkung auf die Spule. Sie befindet sich in einem schwächer werdenden Magnetfeld. Werden Spule und Magnet miteinander bewegt (▷ V 1d), dann bleibt die magnetische Wirkung auf die Spule gleich.

Aus den Versuchen ergibt sich das Induktionsgesetz:

Solange sich in einer Spule das Magnetfeld ändert, wird in ihr eine Spannung induziert. Die entstehende Spannung heißt Induktionsspannung.

Sind beim Induktionsvorgang die beiden Enden der Spule leitend miteinander verbunden, dann fließt ein Strom. Er heißt **Induktionsstrom**  $I_{\text{ind}}$ .



4 Zu Versuch 1c

### Versuch

1 Baue einen Versuch nach Bild 3 auf. Verwende eine Spule mit 1200 Windungen und ein Spannungsmessgerät mit Zeigermittelpunktlage. Führe die folgenden Versuche durch und beobachte jeweils den Zeiger des Messgerätes. Notiere deine Beobachtungen!

a) Schiebe den Stabmagneten mit dem Nordpol in die Spule hinein (▷ B 3). Lasse ihn kurz in der Spule ruhen und ziehe ihn dann wieder heraus.

b) Wiederhole Versuchsteil a), benutze aber jetzt den Südpol des Stabmagneten.

c) Halte den Magneten fest und schiebe die Spule über den Magneten, zunächst über den Nord- dann über den Südpol (▷ B 4).

d) Bewege Spule und Magnet miteinander in die gleiche Richtung.

### Aufgaben

- 1 Beschreibe den Vorgang der elektromagnetischen Induktion.
- 2 Tom will mit einer Spule und einem Magneten ein Lämpchen zum Leuchten bringen. Er nimmt eine Spule mit großer Windungszahl und legt einen starken Dauermagneten in ihr Inneres. Was meinst du dazu? Begründe deine Antwort.
- 3 Beschreibe, wie es in den Versuchen 1a), b) und c) zur Veränderung des magnetischen Feldes kommt.
- 4 Wenn sich eine Spule in einem veränderlichen Magnetfeld befindet, dann entsteht immer eine Induktionsspannung. Wann fließt dabei auch ein Induktionsstrom?
- 5 Welche Möglichkeiten gibt es, bei einem Induktionsversuch mit Spule und Magnet die Richtung des entstehenden Induktionsstromes umzukehren?
- 6 Warum konntest du in deinen Versuchen immer nur kurzzeitig eine Spannung entstehen lassen?



5 Spule mit 300 Windungen

## Wie lässt sich die Induktionsspannung vergrößern?



1 Mehr Spannung ...

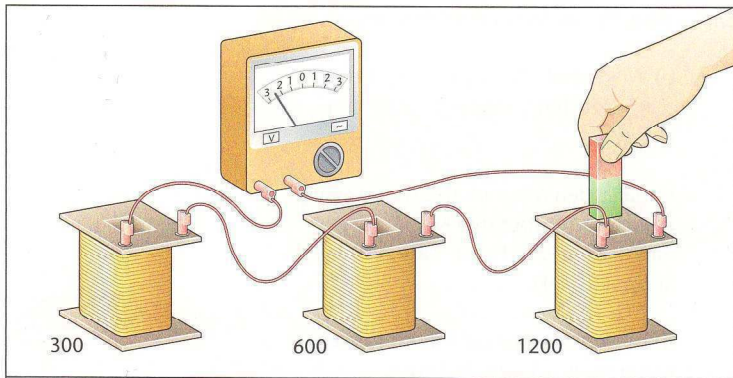
### Elektrizität für alle?

Michael hat die Superidee: Er will mit Stabmagnet und Spule Induktionsspannungen erzeugen und damit Fernseher, Computer, Bohrmaschine usw. betreiben. Sein Problem ist nur: „Wie kann ich eine ausreichend große Spannung erzeugen?“

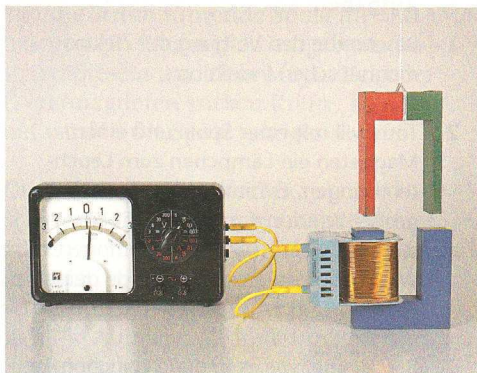
Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Größe der Induktionsspannung zu beeinflussen. Im Bild 2 werden Spulen mit unterschiedlichen Windungszahlen verwendet. Bei der Spule mit der größten Windungszahl ist die erreichte Induktionsspannung am höchsten. Voraussetzung: Es wird immer der gleiche Magnet verwendet und er wird immer gleich schnell bewegt.

Wenn du einen Magneten mit stärkerer Magnetkraft benutzt, kannst du ebenfalls höhere Induktionsspannungen erzeugen. Du kannst auch die Spule oder den Magneten schneller bewegen, um die Induktionsspannung zu erhöhen.

In den Bildern 4 und 5 drehen sich gleiche Magneten über Spulen mit gleichen Windungszahlen. In der Spule mit dem Eisenkern entsteht eine höhere Induktionsspannung, weil der Eisenkern magnetisiert wurde.

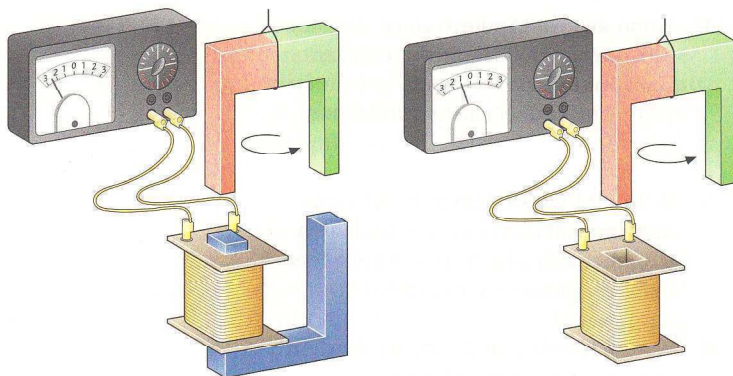


2 Induktionsspannung bei verschiedenen Windungszahlen



3 Ein Eisenkern erhöht die Induktionsspannung.

- Die Induktionsspannung kann vergrößert werden durch
- eine größere Windungszahl der Spule,
  - die Verwendung eines stärkeren Magneten,
  - eine schnellere Bewegung von Magnet oder Spule und
  - die Verwendung eines Eisenkerns.



4 Induktionsspannung mit ...

5 ... und ohne Eisenkern

### Versuch

- 1 Überlege dir Versuche, mit denen du unterschiedlich hohe Induktionsspannungen erzeugen kannst. Experimentiere mit Spulen unterschiedlicher Windungszahlen, verschiedenen Magneten und Eisenkernen. Protokolliere alle Versuche.

### Aufgaben

- 1 Formuliere zu Versuch 1 einen Merksatz als „je – desto“-Beziehung.
- 2 Begründe deine Ergebnisse aus Versuch 1.

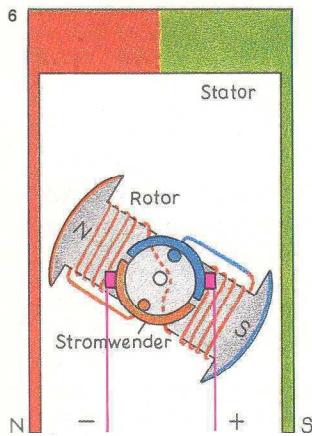
## Auf einen Blick

### Der Elektromotor

Ein Elektromotor besteht z. B. aus einem fest stehenden Dauer- oder Elektromagneten (dem *Stator*) und einem drehbaren Elektromagneten (dem *Rotor*) sowie einem *Kommutator* oder *Stromwender*.

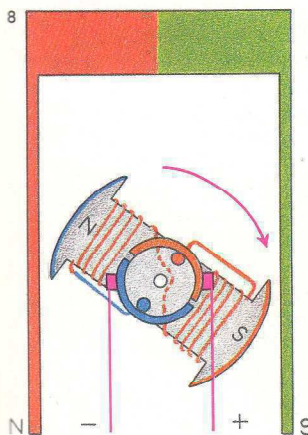
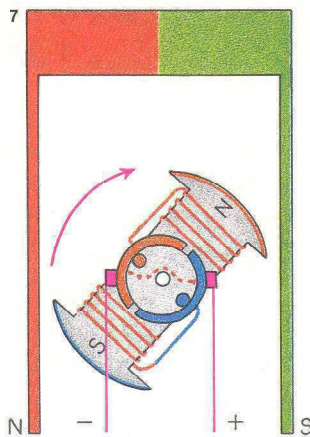
Der Stromwender hat die Aufgabe, die Stromrichtung in der Rotorspule im „richtigen“ Takt umzukehren. Dadurch werden immer wieder Nord- und Südpol des Rotors vertauscht.

So funktioniert ein Elektromotor:



Die gleichnamigen Pole von Rotor und Stator stoßen einander ab, die ungleichnamigen ziehen einander an: Der Rotor dreht sich.

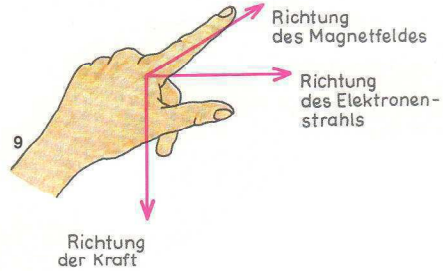
Die Drehung würde aufhören, wenn sich ungleichnamige Pole gegenüberstünden.



Der Stromwender kehrt die Stromrichtung in der Rotorspule rechtzeitig um. Aus dem Nordpol des Rotors wird dadurch ein Südpol und aus dem Südpol ein Nordpol. Die Drehung geht somit weiter.

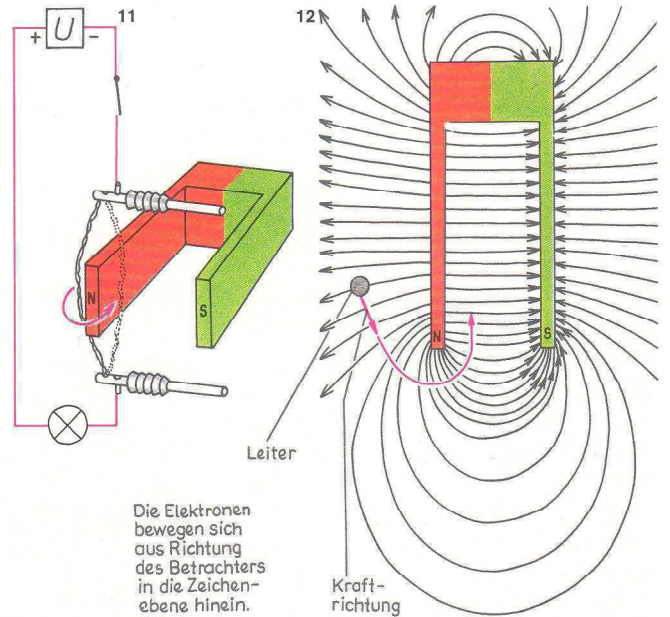
### Die Lorentzkraft

In einem Magnetfeld wirkt auf bewegte Elektronen (und andere Ladungsträger) eine Kraft senkrecht zur Bewegungsrichtung und senkrecht zur Richtung des Feldes. Diese Kraft heißt Lorentzkraft.



Elektronen in einem Metalldraht übertragen die Lorentzkräfte auf den Draht.

Die Kraft, die auf den Leiter im Magnetfeld wirkt, hängt von der Stromstärke, der Stärke des Magnetfeldes und der Länge des im Magnetfeld befindlichen Leiters ab.

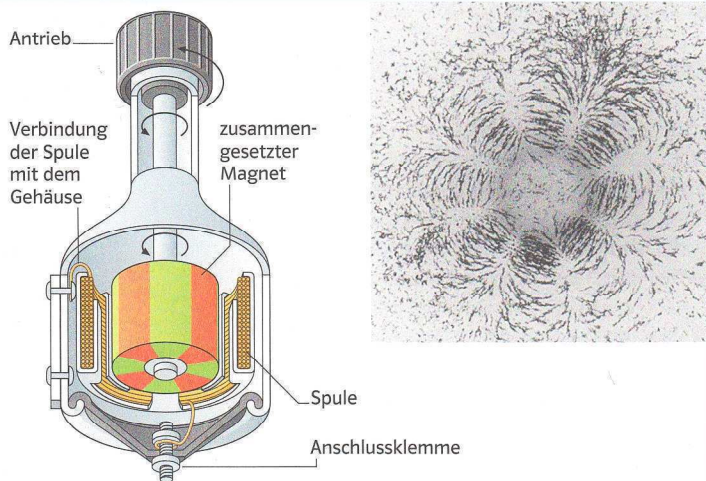


Die Elektronen bewegen sich aus Richtung des Betrachters in die Zeichenebene hinein.

Kraft-  
richtung

## Generatoren

■ **V1** Der Fahrraddynamo ist eine elektrische Quelle. Durch das Antriebsrädchen wird in seinem Inneren ein Magnet gedreht, der wie ein Zylinder aussieht. Zerlege einen Demonstrationsdynamo und weise mit Hilfe von Eisenfeilspänen sein Magnetfeld nach (→ B1). Bestimme die Lage der Pole und die Feldlinienrichtung.

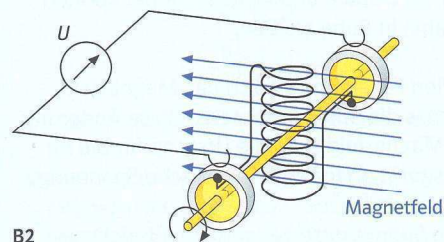


B1

■ **V2** Außer dem Magneten befindet sich im Fahrraddynamo noch eine Spule. Sie ist mit der Anschlussklemme und dem Gehäuse des Dynamos verbunden. Nimm eine solche Spule und schließe sie an ein Messgerät für

die Spannung an, dessen Nullpunkt in der Skalenmitte liegt. Drehe vor dieser Spule einen Stabmagneten. Das Messgerät zeigt eine Spannung an, deren Betrag und Polung sich ständig ändern.

■ **V3** Wir drehen eine Spule im Magnetfeld. Der Anschluss des Messgerätes an die Spule erfolgt über zwei Schleifkontakte (→ B2).



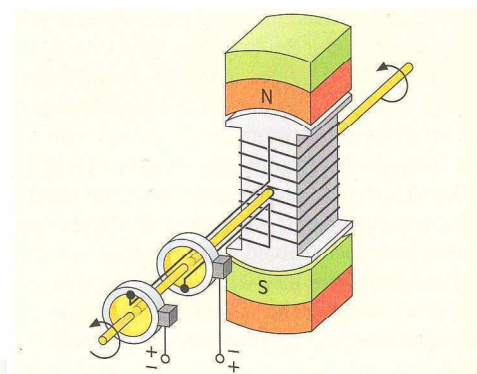
B2

Das Messgerät zeigt eine Spannung an, deren Betrag und Polung sich ständig ändern.

■ **V4** Dreht man in V2 und V3 den Magneten oder die Spule mit Hilfe eines Motors immer schneller, werden die Ausschläge des Zeigers kleiner, bis sie ganz verschwinden. Dagegen zeigt ein Messgerät für Wechselspannung weiterhin eine Spannung an, deren zeitlicher Verlauf sich mit einem Oszilloskop verfolgen lässt.

**Generatoren erzeugen Spannungen** Dreht sich eine Spule in einem Magnetfeld wie in B4, so entsteht an ihren Enden eine Spannung, die über Schleifkontakte an zwei Anschlüsse weitergegeben wird. Eine solche Anordnung heißt **Generator**. Die Spule bildet zusammen mit dem Eisenkern den **Anker**. Während jeder Umdrehung des Ankers ändern sich der Betrag und die Polung der entstehenden Spannung. Sie heißt deshalb **Wechselspannung**. In einem Generator entsteht auch eine Wechselspannung, wenn die Spule fest steht und das Magnetfeld von einem sich drehenden Magneten stammt. Ein Beispiel hierfür ist der **Dynamo** (→ B1).

■ **A1** Wie lässt sich unter Verwendung eines Stabmagneten eine Wechselspannung erzeugen?



B4 Ein Generator

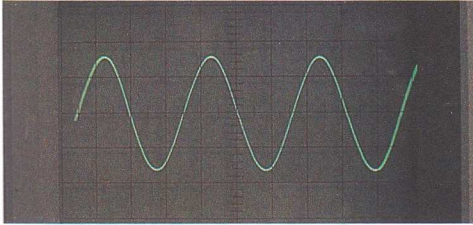
G

B3 Schaltzeichen für Generatoren

● Im Generator entsteht durch Drehen einer Spule im Magnetfeld oder eines Magneten vor einer Spule eine Wechselspannung.



**Die Wechselspannung** B1 zeigt den zeitlichen Verlauf einer von einem Generator erzeugten Wechselspannung, wie sie mit dem Oszilloskop zu beobachten ist.



B1

Entsprechend den beiden Polungen, die die Spannung an den Anschlüssen bei jeder Umdrehung hat, gibt man in Diagrammen ( $\rightarrow$  B2b) die Spannung mit positiven oder mit negativen Werten an. Die Spule befindet sich im Feld eines Magneten. Bei der Drehung ändert sich ständig der Winkel zwischen der Ebene ihrer Windungen und den magnetischen Feldlinien. Entsprechend ändert sich auch der Anteil des Magnetfeldes, der die in der Windungsebene liegende Spulenfläche durchsetzt. Diese Änderung induziert eine Spannung an ihren Enden ( $\rightarrow$  B3).

● Durch die Drehung des Ankers wird der Anteil des Magnetfeldes, der die Windungsebene seiner Spule durchsetzt, ständig verändert. Das induziert eine Wechselspannung zwischen den Enden der Spule.

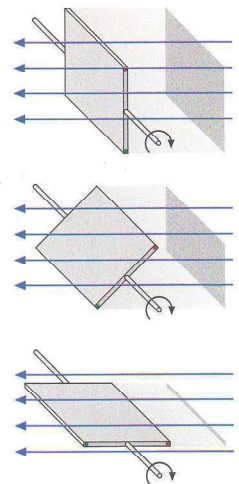
In B2 wird der Zusammenhang zwischen der Position des Ankers, also der Drehspule, und der induzierten Spannung dargestellt. Dreht

man den Anker z. B. von Stellung 1 etwas weiter, so ändert sich der Querschnitt des Magnetfeldes durch die Spule viel weniger als etwa bei Stellung 2 oder 3. Deshalb hat die induzierte Spannung ihren größten Betrag in den Stellungen 3, 7 und 11. Erstaunlich ist, dass gerade in Stellung 1 die induzierte Spannung 0 Volt beträgt, obwohl dort der größtmögliche Anteil des Magnetfeldes die Windungen der Spule durchsetzt. Entscheidend für den Betrag der induzierten Spannung ist aber nicht der Anteil des Magnetfeldes, sondern das Ausmaß seiner Änderung in der Spule ( $\rightarrow$  B2a)!

Die Zeiger von Messgeräten mit Skalen, die die Polung der Spannung zeigen, können raschen Polwechseln nicht mehr folgen. Zum Messen solcher Wechselspannungen benutzt man ein Oszilloskop, das eine Zeitspannung-Kurve wie in B1 anzeigt.

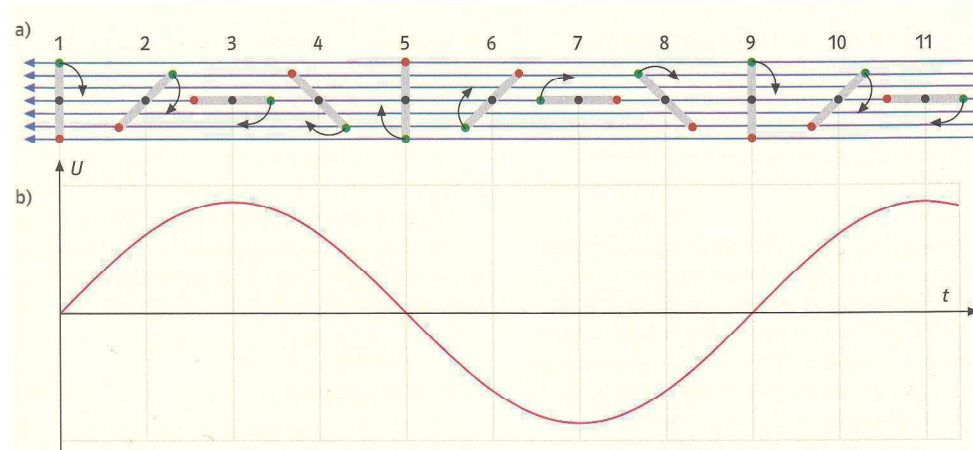
Man kann auch ein Drehspul-Messgerät für Wechselspannungen umrüsten. Es enthält einen Gleichrichter und zeigt dann eine entsprechende Gleichspannung an. Deren Wert ist um den Faktor 0,7 kleiner als der Maximalwert der ursprünglichen Wechselspannung. Für die im Generator induzierte Spannung gilt:

- Der Höchstwert der vom Generator erzeugten Wechselspannung steigt bei
  - höherer Drehgeschwindigkeit,
  - stärkerem Magnetfeld,
  - größerer Windungszahl und Querschnittsfläche der Spule im Anker.



B3 Windungsebene mit vom Magnetfeld durchsetzter Fläche

B4 Schaltzeichen für eine Quelle mit Wechselspannung

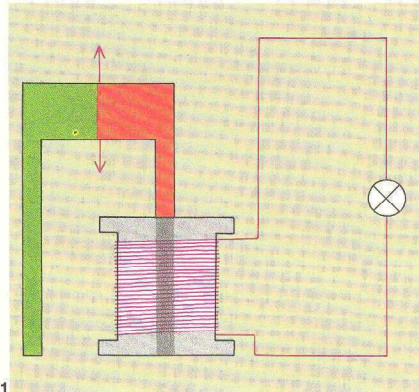


B2 Stellungen des Ankers (a) und die entsprechend induzierte Spannung (b)

## Spannungserzeugung durch Induktion

### Auf einen Blick

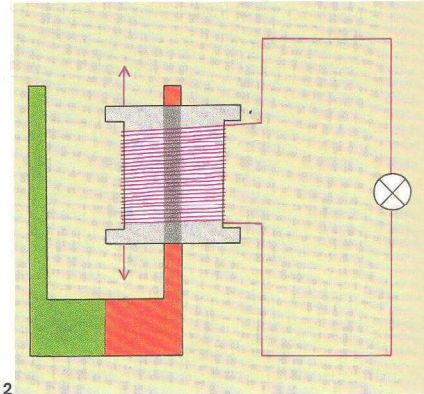
#### Die Induktion



Wenn man einen *Magneten* in eine Spule hineinbewegt oder ihn aus der Spule herauszieht, kann man eine Spannung zwischen den beiden Enden der Spule messen.

Auch wenn man die *Spule* bewegt und der Magnet ruht, tritt eine Spannung auf.

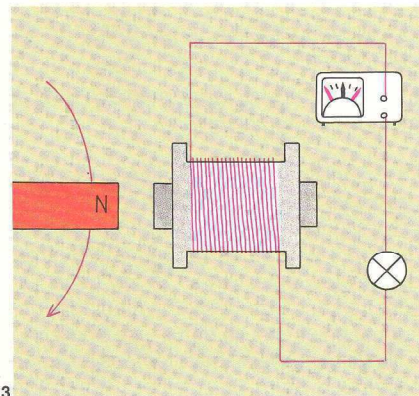
In beiden Fällen ändert sich die Stärke des Magnetfeldes in der Spule. Diese Änderung hat zur Folge, dass die Elektronen im Leiter angetrieben werden.



Wenn sich die Stärke des Magnetfeldes im Innern der Spule ändert, entsteht eine Spannung zwischen den Anschlüssen der Spule. Diesen Vorgang nennt man **Induktion**.

Je schneller Magnet oder Spule bewegt werden (je schneller sich also die Stärke des Magnetfeldes in der Spule ändert), desto höher ist die Induktionsspannung.

Die Induktionsspannung kann man auch dadurch erhöhen, dass man eine Spule mit mehr Windungen oder einen stärkeren Magneten verwendet.

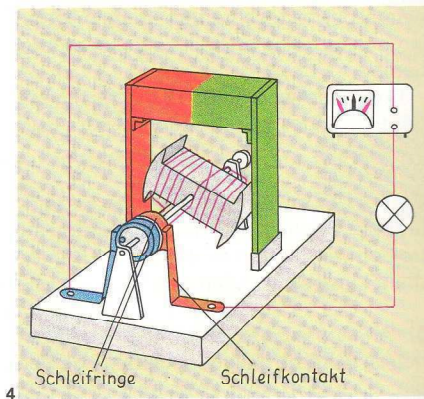


#### Generatoren

Generatoren erzeugen durch Induktion elektrische Spannungen. Beim Antrieb der Generatoren muss Arbeit verrichtet werden. Die dadurch zugeführte Energie wird in elektrische Energie umgewandelt.

Dieser Aufbau zeigt das Grundprinzip des Generators: Wenn der Dauermagnet gedreht wird, ändert sich das Magnetfeld in der Spule.

Die Folge ist eine Induktionsspannung zwischen den Spulenanschlüssen.



Bei diesem Generator wird nicht der Dauermagnet gedreht, sondern die Spule. Die beiden Enden des Spulendrahtes sind mit je einem der Schleifringe verbunden. Wenn man die Spule dreht, werden die Elektronen angetrieben: Zwischen den Ringen herrscht eine Spannung.

Wenn sich eine Spule in einem Magnetfeld dreht, ändert sich die Stärke des Magnetfeldes nicht. Trotzdem kommt es zur Induktion. Allgemein gilt das **Induktionsgesetz**:

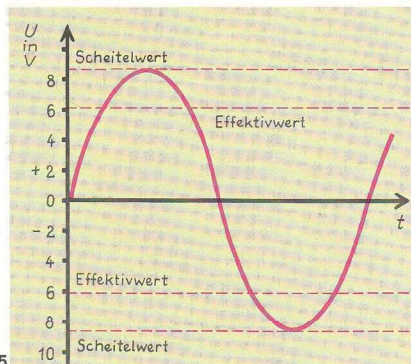
Eine Induktionsspannung entsteht, wenn sich der magnetische Fluss durch eine Leiterschleife ändert.

## Spannungserzeugung durch Induktion

### Die Wechselspannung

Bei einer Batterie ist der eine Pol stets ein Pluspol, der andere immer ein Minuspol. Man bezeichnet die Spannung einer Batterie als **Gleichspannung**. Wenn man ein Lämpchen an die Batterie anschließt, fließen die Elektronen immer in die gleiche Richtung (*Gleichstrom*).

Der Generator von Bild 4, ein Fahrraddynamo und auch die Steckdosen in den Haushalten liefern keine Gleichspannung, sondern eine **Wechselspannung**: Die Polung der



5 Zeitlicher Verlauf einer Wechselspannung

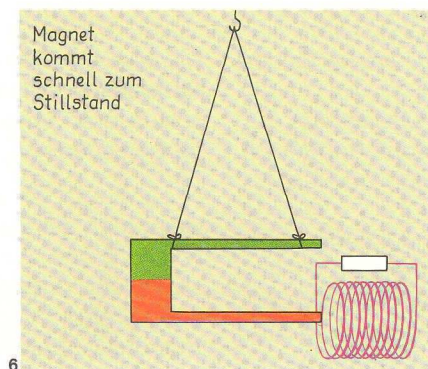
Anschlüsse wechselt ständig. Bei jedem Umpolen ändert der Elektronenstrom seine Richtung (*Wechselstrom*).

Eine Wechselspannung mit einem Scheitelwert von 8,5 V ruft in einer Lampe die gleiche Licht- und Wärmewirkung hervor wie eine Gleichspannung von 6 V.

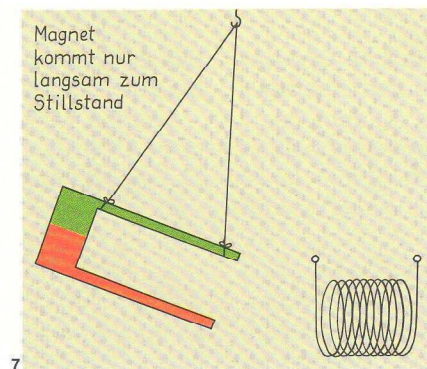
Man sagt, die Wechselspannung hat einen **Effektivwert** von 6 V.

Entsprechend definiert man Effektivwerte von Wechselströmen.

### Induktion und elektrische Energie



6



7

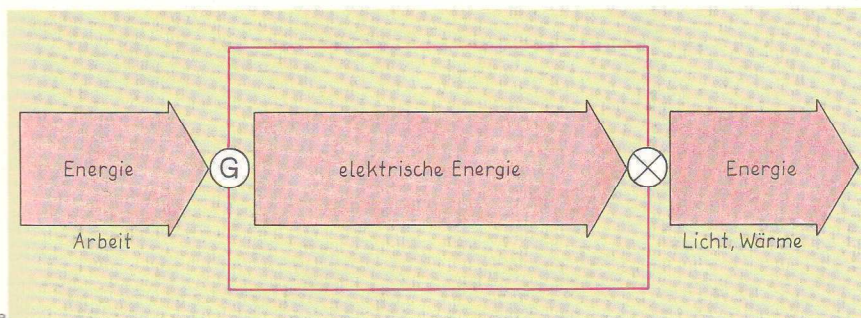
Wenn der Stromkreis geschlossen ist, kommt der schwingende Magnet schneller zur Ruhe, als wenn der Stromkreis unterbrochen ist und kein Strom fließt.

Sobald nämlich ein Strom fließt, wird die Spule selbst zum Magneten. Die Pole von Magnet und Spule ziehen einander an bzw. stoßen einander ab – und zwar so, dass der Magnet gebremst wird.

Auch aus dem Satz von der Erhaltung der Energie ergibt sich, dass der Magnet gebremst wird:

Bei geschlossenem Stromkreis wird die Bewegungsenergie des Magneten in elektrische Energie umgewandelt und dann vom Widerstand als Wärme abgegeben. Die Bewegungsenergie nimmt also rasch ab; die Bewegung wird immer langsamer.

Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, dass sein Magnetfeld der Induktionsursache entgegenwirkt (Lenz'sche Regel).



8

Im Generator wird der Rotor ebenfalls gebremst, wenn ein Strom fließt. Soll ständig ein Strom fließen, muss dauernd Arbeit verrichtet werden.

Der Generator wandelt die zugeführte Energie in elektrische Energie um.

Die Energie wird vom Stromkreis übertragen und z. B. von einer Lampe als Wärme oder Licht abgegeben.

## Magnetismus und Elektrizität

### Dauermagnete

**Magnetpole:** Jeder Magnet hat einen Nord- und einen Südpol. Im Bereich der Magnetpole ist die Magnetkraft am größten.

**Polgesetze:** Ungleichnamige Magnetpole ziehen sich an, gleichnamige Magnetpole stoßen sich ab.

**Magnetfeld:** Das Magnetfeld ist der Raum um einen Magneten, in dem magnetische Kräfte wirken. Magnetische Feldlinien sind ein Modell zur Veranschaulichung des magnetischen Feldes. Sie zeigen die Richtung der Magnetkraft und die Stärke des Magnetfeldes an und können mit Eisenfeilspänen sichtbar gemacht werden (▷ B 3).

### Magnetismus durch elektrischen Strom

Wenn Strom durch einen elektrischen Leiter fließt, entsteht ein magnetisches Feld um den Leiter (▷ B 4).

Ein Elektromagnet ist ein Strom führender Draht, der zu einer Spule aufgewickelt wurde.

Das magnetische Feld einer stromdurchflossenen Spule lässt sich verstärken durch:

- eine größere Windungszahl der Spule
- die Verwendung eines Eisenkerns und
- eine höhere Stromstärke in der Spule.

### Elektromotoren

Elektromotoren wandeln elektrische Energie in mechanische Energie um. Bei einem einfachen Elektromotor dreht sich ein Elektromagnet (Rotor) im Magnetfeld eines feststehenden Magneten (Stator).

Der Kommutator vertauscht die Magnetpole des Rotors bei jeder Umdrehung zweimal. Dadurch wird aufgrund der magnetischen Kräfte zwischen Rotor und Stator eine ständige Drehbewegung möglich (▷ B 2).

### Elektromagnetische Induktion

Solange sich eine Spule in einem sich verändernden Magnetfeld befindet, wird in der Spule eine Spannung induziert (erzeugt). Diese Erscheinung nennt man elektromagnetische Induktion (▷ B 1).

Befindet sich die Spule dabei in einem Stromkreis, fließt ein elektrischer Strom (Induktionsstrom).

Die entstehende Induktionsspannung kann vergrößert werden durch:

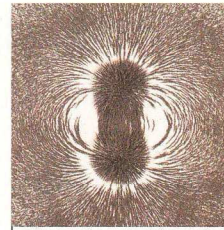
- eine größere Windungszahl der Spule,
- die Verwendung eines stärkeren Magneten und
- eine schnellere Magnetfeldänderung.

### Generatoren

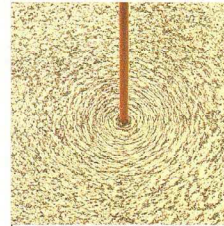
Generatoren wandeln mechanische Energie in elektrische Energie um. Ein Fahrraddynamo ist ein einfaches Beispiel für einen **Innenpol-Generator**. Dabei dreht sich ein Magnet im Inneren einer feststehenden Spule. Generatoren für große Leistungen verwenden Elektromagnete anstelle der Dauermagnete.

Beim **Außenpol-Generator** dreht sich eine Spule im Magnetfeld eines feststehenden Magneten.

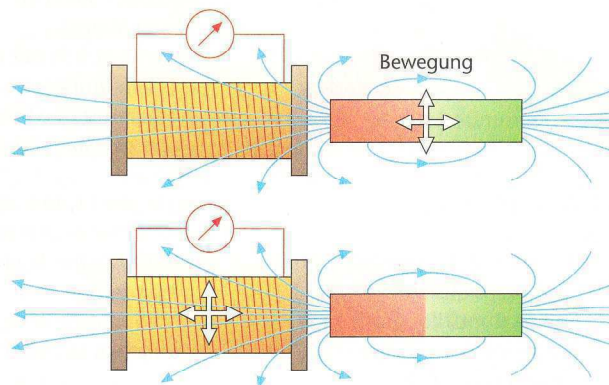
Außenpol-Generatoren erzeugen Wechselstrom, Außenpol-Generatoren mit Kommutator erzeugen Gleichstrom.



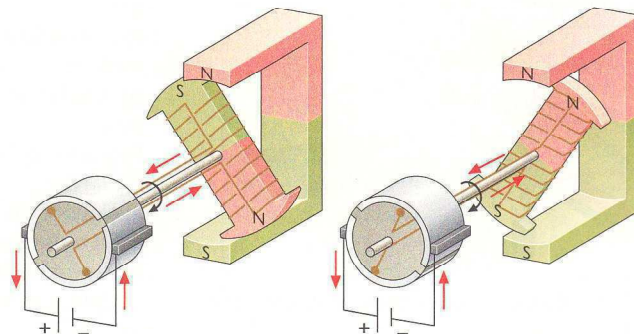
3 Magnetfeld um einen Stabmagneten



4 Magnetfeld um einen geraden Leiter



1 Elektromagnetische Induktion



2 Der Kommutator ermöglicht die Drehung des Rotors

## Transformatoren



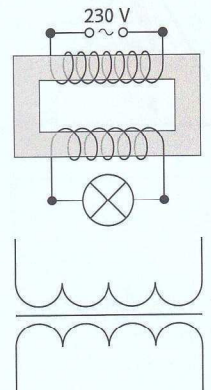
**VORSICHT!** Versuche mit Transformatoren können gefährlich sein! Das gilt auch dann, wenn die Quelle weniger als 24 V hat: Am Transformator können trotzdem viel höhere, lebensgefährliche Spannungen entstehen! Deshalb dürfen alle Versuche nur im Beisein der Lehrkraft durchgeführt werden.

■ **V1** Eine Spule mit Anschluss für Netzspannung (230 V) steckt auf einem geschlossenen Eisenkern. Ein isoliertes Experimentierkabel wird mit einigen Windungen um einen Schenkel des Eisenkerns gewickelt. Eine kleine Glühlampe, die an das Kabel angeschlossen ist, leuchtet auf, sobald der Stromkreis mit Anschluss zum Netz geschlossen ist. Ein Oszilloskop zeigt, dass an der Glühlampe eine Wechselspannung vorhanden ist.

■ **V2** Wir verbinden eine Spule mit einer Quelle für Wechselspannung und eine zweite Spule mit einem Messgerät für Wechselspannung. Wir messen die Spannungen und vergleichen die Anzeigen am Messgerät für beide Spulen bei folgenden Anordnungen:

- die beiden Spulen werden einmal mit, einmal ohne Eisenkern in geringer Entfernung voneinander aufgestellt;
- eine der Spulen wird durch einen Pappkarton abgedeckt;
- die kleinere Spule wird in die größere geschoben;
- beide Spulen werden auf einen gemeinsamen, offenen oder geschlossenen Eisenkern gesteckt;
- parallel zum Messgerät wird zusätzlich ein geeignetes Lämpchen angeschlossen.

Das Messgerät schlägt am stärksten aus, das Lämpchen leuchtet am hellsten, wenn die beiden Spulen einen gemeinsamen, geschlossenen Eisenkern haben.



**B1** Schaltzeichen für Transformatoren

### Die Funktionsweise des Transformators

Ein Transformator besteht aus zwei Spulen auf einem gemeinsamen, meist geschlossenen Eisenkern. Dabei gibt es weder zwischen den beiden Spulen noch zwischen dem aufgewickelten Draht und dem Eisenkern eine elektrisch leitende Verbindung! Die beiden Spulen können, wie beim Experimentiertransformator, nebeneinander angeordnet sein. Bei den meisten technischen Transformatoren sind sie übereinander gewickelt (→ B2). Die an die Quelle für Wechselspannung angeschlossene Spule wird **Primärspule**, die zweite Spule wird **Sekundärspule** genannt.

- Ein Transformator besteht aus Primär- und Sekundärspule mit gemeinsamem Eisenkern.

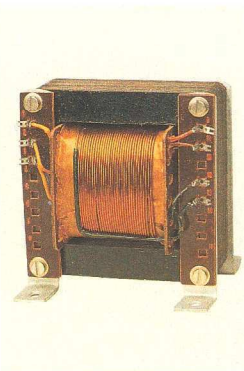
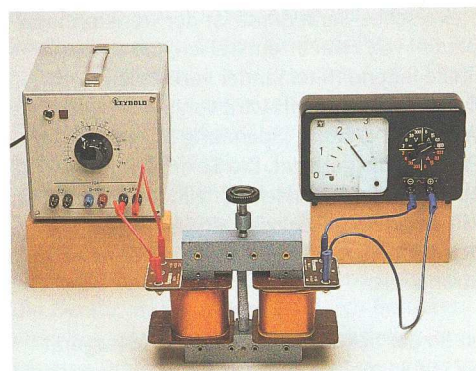
Der Wechselstrom in der Primärspule erzeugt ein sich ständig änderndes Magnetfeld. Durch den geschlossenen Eisenkern wird es verstärkt und praktisch vollständig durch das Innere der Sekundärspule geführt. Die Windungsebenen der Sekundärspule werden somit von einem sich ständig ändernden Magnetfeld durchsetzt. Damit wird in der

Sekundärspule eine Spannung induziert, sodass sie in einem zweiten Stromkreis als Quelle mit Wechselspannung wirken kann.

- Beim Transformator entsteht durch Wechselstrom in der Primärspule ein veränderliches Magnetfeld, das in der Sekundärspule eine Wechselspannung induziert.

■ **A1** Weshalb funktioniert ein Transformator nur mit einer sich ständig ändernden Spannung?

Ein Transformator kann nur mit einer Spannung betrieben werden, die sich ständig ändert.



**B2** Experimentiertransformator und technischer Transformator

## Der Transformator

### Von 230V auf 3,6V?

Viele elektrische Geräte dürfen nicht mit 230V betrieben werden. Sie arbeiten mit anderen, meist geringeren Spannungen. So benötigt ein Handy beispielsweise nur eine Spannung von 3,6V. Wie ist es möglich, dass man das Handy dennoch über das Ladegerät an die Netzspannung (230V) anschließen kann?



### Transformator

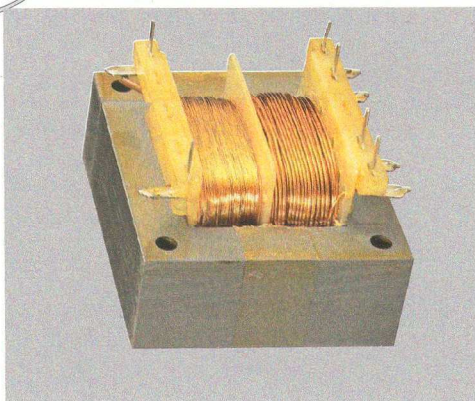
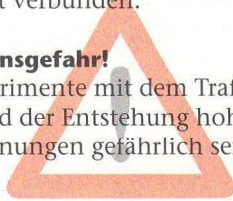
Viele Elektrogeräte werden über Transformatoren (Kurzform: Trafo) an die Netzspannung angeschlossen. Transformatoren wandeln die Netzspannung in die benötigte Betriebsspannung um. Ein Transformator wird zwischen Steckdose und Gerät geschaltet. Oft sind Trafos in das Gerät eingebaut wie es z. B. bei Ladegeräten (Notebook usw.) der Fall ist.



In den Bildern 1 und 4 erkennst du, wie ein Transformator prinzipiell aufgebaut ist: Ein Transformator besteht aus zwei Spulen, die auf einen gemeinsamen Eisenkern gewickelt sind. Jede Spule hat einen eigenen Stromkreis. In einem Ladegerät z. B. liegt eine Spule an 230V Wechselspannung an, die zweite Spule ist mit dem Gerät verbunden.

### Lebensgefahr!

Experimente mit dem Trafo können aufgrund der Entstehung hoher Induktionsspannungen gefährlich sein!



1 Transformator

Auch bei kleinen Eingangsspannungen können lebensgefährliche Ausgangsspannungen entstehen. Führe Versuche mit Trafos nur nach Anweisung des Lehrers durch! Experimentiere niemals mit Trafos, die an die Netzspannung angeschlossen sind.

### Drahtlose Energieübertragung

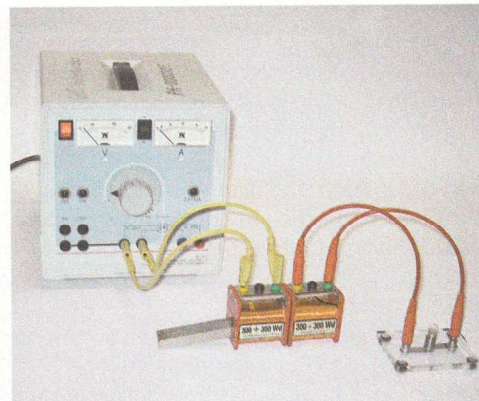
Zwischen den Spulen eines Trafos besteht keine leitende Verbindung. Wie also kommt elektrische Energie von der ersten zur zweiten Spule? In Versuch 1 kannst du diese Frage untersuchen (▷ V1a, 1b).

Das Prinzip ist bei allen Transformatoren gleich: Wenn du die Spule 1 an Wechselspannung anschließt, dann fließt durch ihre Windungen Wechselstrom. Es entsteht um diese Spule ein magnetisches Feld, das sich ebenfalls ständig ändert. Der gemeinsame Eisenkern verstärkt das magnetische Feld von Spule 1 und überträgt es auf Spule 2.

Durch die Magnetfeldänderungen wird in der zweiten Spule eine Wechselspannung induziert. Das Lämpchen leuchtet, die elektrische Energie wird durch elektromagnetische Induktion übertragen.

Die Spule, die das magnetische Wechselfeld erzeugt, wird **Primärspule** genannt (▷ B4). In der zweiten Spule wird Spannung induziert. Sie heißt **Sekundärspule**.

Ein Transformator besteht aus zwei Spulen, die auf einem geschlossenen Eisenkern sitzen. Durch elektromagnetische Induktion wird Energie vom Primär- auf den Sekundärkreis übertragen.



2 Zu Versuch 1

## Energieübertragung mit Wechselstrom

### Auf einen Blick

#### Der Transformator

Jeder Transformator besteht aus einer *Feldspule (Primärspule)* und einer *Induktionsspule (Sekundärspule)*. Beide Spulen sitzen auf einem geschlossenen Eisenkern. Zwischen den Spulen gibt es keine elektrische Verbindung.

Die Feldspule wird an eine Energiequelle mit Wechselspannung angeschlossen. Im Eisenkern entsteht dann ein Magnetfeld, das sich ständig ändert. Durch diese Magnetfeldänderungen kommt es zur Induktion.

Zwischen den Anschlüssen der Induktionsspule wird die Sekundärspannung  $U_2$  erzeugt. Sie hängt ab von der Spannung  $U_1$  an der Feldspule (Primärspannung) und vom Verhältnis der Windungszahlen  $N_1$  und  $N_2$ .

Wenn kein Gerät an die Induktionsspule angeschlossen ist (unbelasteter Trafo), gilt:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Der unbelastete Trafo benötigt nur einen sehr kleinen Energiestrom.

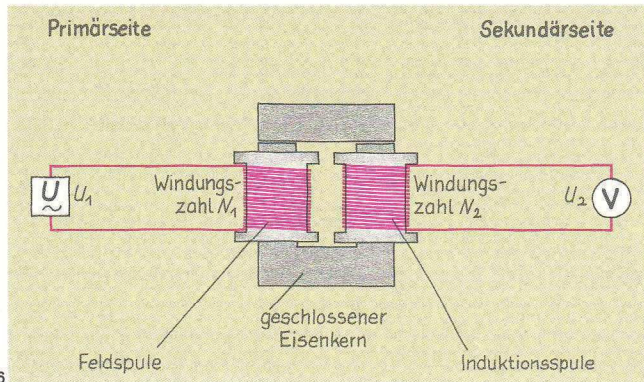
Wird an den Trafo ein Gerät angeschlossen, so erhält es von ihm elektrische Energie. Der Trafo entnimmt diese Energie dem Netz.

Bei Belastung nimmt daher der Primärstrom  $I_1$  zu. Wie groß er ist, hängt vom Sekundärstrom  $I_2$  und vom Verhältnis der Windungszahlen  $N_1$  und  $N_2$  ab.

Der Sekundärstrom bestimmt den Primärstrom.

Für den belasteten Trafo gilt:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$



6

### Energieübertragung mit Hochspannung

Wenn ein Strom  $I$  durch einen Leiter mit dem Widerstand  $R$  fließt, wird in diesem Energie umgewandelt und als Wärme abgegeben.

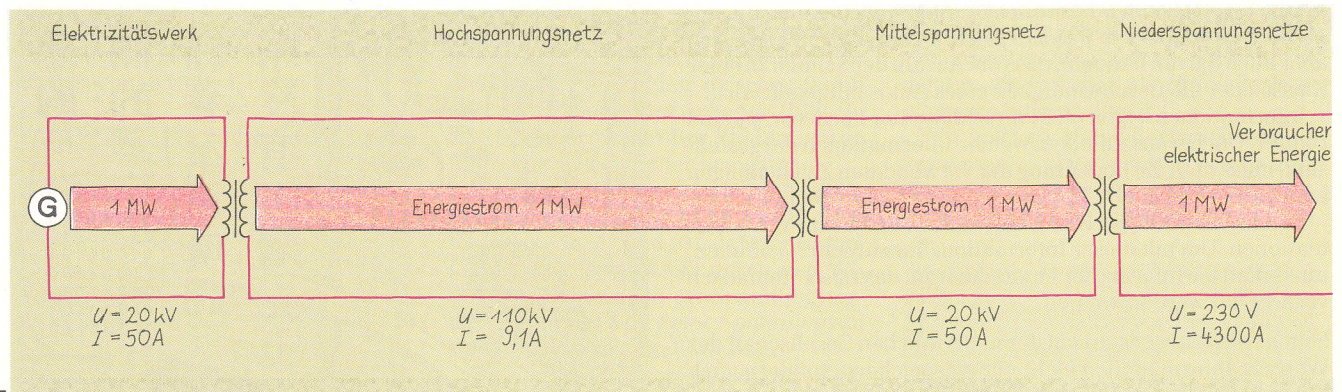
Die Verlustleistung ändert sich mit dem Quadrat der Stromstärke:  $P_V = R \cdot I^2$ .

Verringert man z. B. die Stromstärke auf ein Zehntel, so sinkt die Verlustleistung auf ein Hundertstel.

Um bei der Übertragung elektrischer Energie die Verluste gering zu halten, sorgt man für möglichst kleine Ströme, indem man die Spannung erhöht.

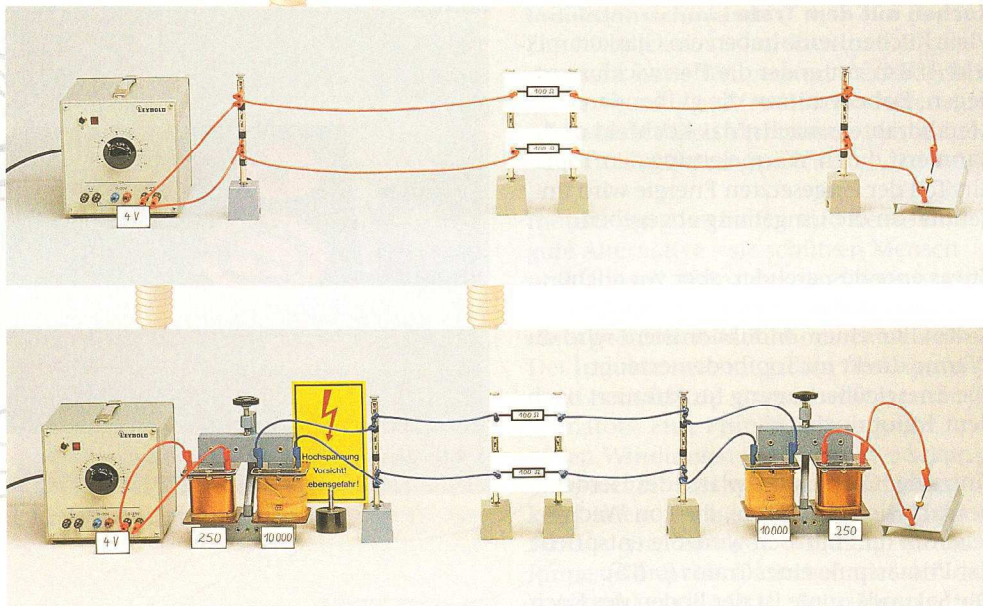
Wie man an der Beziehung  $P_{el} = U \cdot I$  erkennt, ist für einen bestimmten Energiestrom bei zehnfacher Spannung nur ein Zehntel der Stromstärke nötig.

Am Beginn der Übertragungsstrecke wird die Spannung daher mit Hilfe eines Transformators erhöht und am Ende mit einem zweiten verringert.



7

## Die Übertragung der elektrischen Energie



1 Modellversuch zur Fernleitung elektrischer Energie: Bei Hochspannung sind die Transportverluste gering.

### Versuch

- a) Eine Lampe ( $3,8\text{V}/0,07\text{A}$ ) wird über eine „Fernleitung“ (je  $100\Omega$ ) an  $4\text{V}$  Wechselspannung angeschlossen ( $\triangleright$  B 1, oben).
- b) In einer zweiten Schaltung wird die Ausgangsspannung zuerst hochtransformiert ( $n_1=250/n_2=10\,000$ ) und die Hochspannung an die „Fernleitung“ angelegt. Vor der Lampe wird die Spannung im gleichen Verhältnis wieder heruntertransformiert ( $\triangleright$  B 1, unten). Vergleiche die Helligkeiten der Lampen.

### Die Übertragung elektrischer Energie

Der Transport elektrischer Energie erfolgt normalerweise durch Drähte. Wegen des elektrischen Widerstands kommt es dabei zu einer Umwandlung von elektrischer Energie in nicht weiter nutzbare Wärme. Es erreicht also nur ein Teil der Energie den Empfänger.

In Versuch 1 wird der elektrische Widerstand von langen Drähten ersatzweise durch zwei  $100\text{-}\Omega$ -Widerstände erreicht, die in Hin- und Rückleitung geschaltet sind ( $\triangleright$  B 1).

Der Versuchsteil 1a zeigt, dass aufgrund dieses Widerstandes zu wenig Energie an der Lampe ankommt: Sie leuchtet nicht. Da die Erwärmung der Drähte von der Stromstärke abhängt, ist es sinnvoll diese zu verkleinern. Damit trotzdem noch die

gleiche Energie pro Zeit (Leistung) zum Empfänger gelangt, muss wegen  $P = U \cdot I$  die Spannung erhöht werden.

In Versuchsteil 1b erfolgt die Verkleinerung der Stromstärke bei gleichzeitiger Vergrößerung der Spannung mithilfe eines Transformators. Vor dem Empfänger (dem Glühlämpchen) werden dann mit einem zweiten Transformator Spannung und Stromstärke wieder auf die ursprünglichen Werte gebracht. Das Leuchten des Lämpchens zeigt, dass jetzt ein größerer Teil der Energie beim Lämpchen ankommt.

Je kleiner die Stromstärke ist, desto weniger unerwünschte Wärme entsteht bei der Übertragung der elektrischen Energie.

### Warum Hochspannungsleitungen?

Bei der Übertragung der elektrischen Energie von einem Kraftwerk zu den Haushalten treten die gleichen Erscheinungen wie in Versuch 1 auf. Bei hohen Stromstärken würde in den mehrere  $100\text{ km}$  langen Leitungen viel Wärme entstehen. Deshalb versucht man, die Stromstärken in diesen Leitungen möglichst gering zu halten. Um die gleiche Leistung zu übertragen, muss aber die Spannung entsprechend groß sein. Und das ist der Grund, warum die elektrische Energie durch Hochspannung übertragen wird. Bei Spannungen von bis zu  $380\,000\text{ V}$  ist die Stromstärke so gering, dass auch in den langen Zuleitungen nur wenig Wärme entsteht.



### Das Netz der Energieversorgung

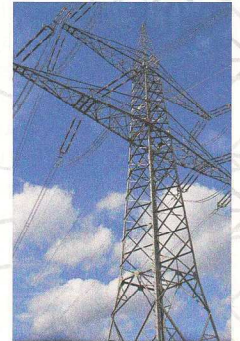
Die Generatoren in den Kraftwerken erzeugen Spannungen von ca. 10 000 bis 20 000 V. Zur Übertragung der Energie sind diese Spannungen noch zu gering. Deshalb werden sie durch Transformatoren am Kraftwerk auf bis zu 380 000 V erhöht und dann in das Verbundnetz eingespeist (▷ B 2). Hoch- und Höchstspannungsleitungen (▷ B 3–B 5) verteilen den Strom landesweit und versorgen ganze Städte und Regionen mit Energie. Diese Leitungen sind – bildlich gesprochen – die Autobahnen der Energieversorgung.

Elektrische Geräte lassen sich mit der Hochspannung nicht betreiben, sie muss durch weitere Transformatoren wieder verringert werden. **Umspannwerke** übernehmen diese Aufgabe, sie setzen die Hochspannung auf Werte von 10 000 oder 20 000 V herab. Mit diesen Spannungen werden Industriebetriebe, Dörfer oder Stadtteile versorgt (▷ B 2). Für die Steckdose sind 10 000 V immer noch viel zu hoch. Weitere Transformatoren erniedrigen die Spannung noch einmal auf die gewünschten 230 V bzw. 400 V (▷ B 2).

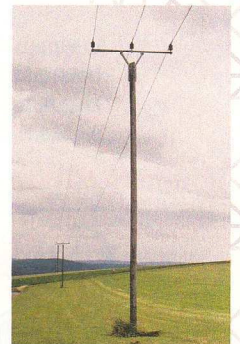
### Vom Kraftwerk zum Verbundnetz

In den Anfängen der Stromversorgung war nur ein Kraftwerk für die Versorgung eines einzelnen Bereiches zuständig. Jedes Kraftwerk musste ständig in Betrieb sein, auch wenn zu bestimmten Zeiten nur wenig elektrische Energie benötigt wurde. Bei der Reparatur eines Kraftwerkes hatten die Bewohner in seinem Bereich unter Umständen tagelang keinen elektrischen Strom. Ab 1920 entstanden deshalb die ersten Zusammenschlüsse der verschiedenen Stromerzeuger zu einem **Verbundnetz**. Bei einer Störung in einem Kraftwerk konnten die anderen Kraftwerke des Netzes die fehlende Leistung aufbringen. Bei geringem Strombedarf (z. B. in der Nacht) wurden einige Werke abgeschaltet. Die Stromerzeugung wurde durch das Verbundnetz sicherer und preisgünstiger.

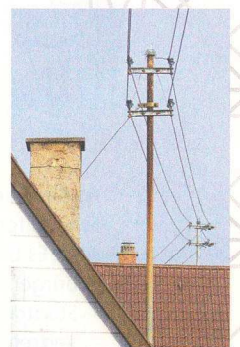
Heute endet unser Verbundnetz nicht an den Landesgrenzen. Das deutsche Netz ist in ein System eingebettet, das die meisten europäischen Staaten miteinander verbindet. Kraftwerksausfälle und Netzstörungen werden sofort von den anderen Teilnehmern des Netzes ausgeglichen. Kannst du dich überhaupt noch an einen längeren Stromausfall erinnern?



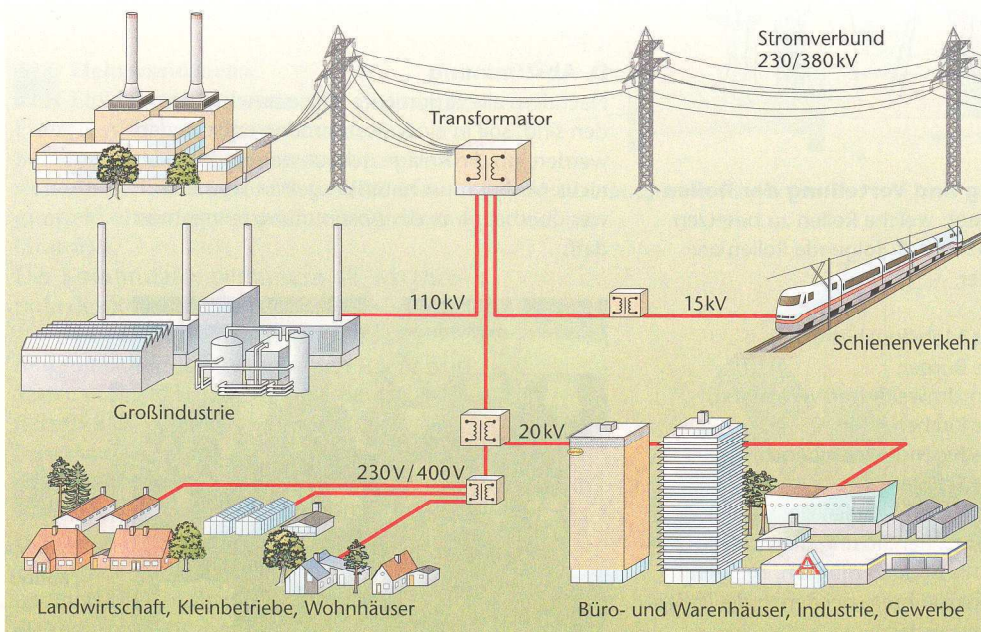
3 Eine 380 000-V-Höchstspannungsleitung



4 Eine oberirdische 10 000-V-Leitung



5 Die 230-V/400-V-Versorgungsleitungen eines Hauses



2 Das Verbundnetz der Stromerzeuger

## Anwendungen von Hochstromtransformatoren

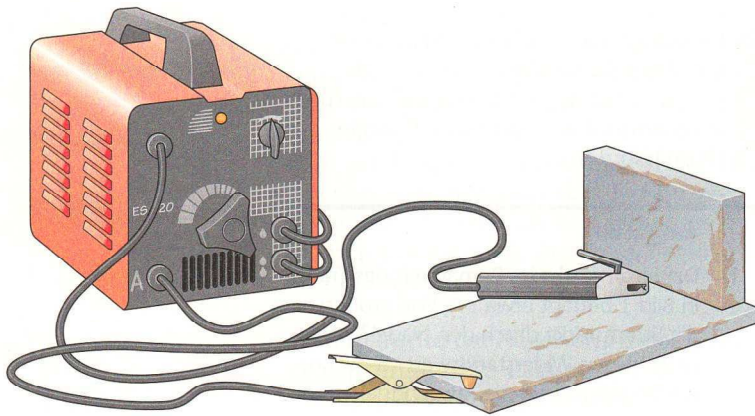


1 Induktionsschmelzofen

### Induktionsschmelzen

Um Metalle zum Schmelzen zu bringen, sind sehr hohe Temperaturen erforderlich. Früher wurde das Metall in Hochöfen ausschließlich durch Verbrennen von Kohle oder Holz glühend gemacht.

Induktionsschmelzöfen sind heute eine gute Alternative – sie schützen Mensch und Umwelt. Kernstück des Ofens ist ein Transformator. Im Bild 1 siehst du das Bild eines geöffneten Induktionsschmelzofens. Der Induktionsschmelzofen funktioniert nach dem Prinzip eines Hochstromtransformators. Eine Primärspule mit sehr vielen Windungen wird mit einer Sekundärspule mit sehr wenigen Windungen kombiniert. Oft besteht die Sekundärspule nur aus einer einzigen Windung, die als Rinne geformt ist. Darin befindet sich das zu schmelzende Metall. Beim Einschalten fließt in der Sekundärspule ein sehr großer Strom. Die Sekundärwindung wird deshalb so heiß, dass das Metall schmilzt.

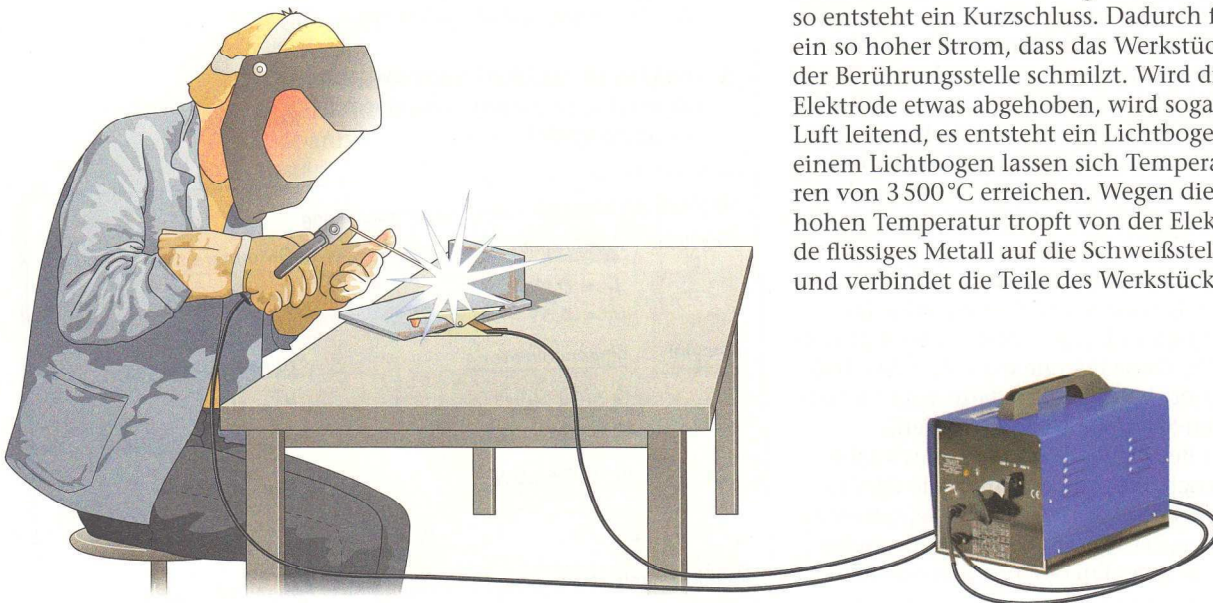


2 Ein Schweißtransformator

### Elektrisches Schweißen

Um zwei Metallteile zu verschweißen, müssen die Kontaktstellen zum Glühen gebracht werden. Auch hier können die erforderlichen Temperaturen durch große Stromstärken in einem Schweißtrafo erreicht werden (▷ B2).

Und so funktioniert es: Ein Pol der Sekundärspannung des Schweißtrafos wird mit dem Werkstück verbunden. Der andere Pol führt zur Schweißelektrode (▷ B3). Berührt man damit kurzzeitig das Werkstück, so entsteht ein Kurzschluss. Dadurch fließt ein so hoher Strom, dass das Werkstück an der Berührungsstelle schmilzt. Wird die Elektrode etwas abgehoben, wird sogar die Luft leitend, es entsteht ein Lichtbogen. In einem Lichtbogen lassen sich Temperaturen von 3 500 °C erreichen. Wegen dieser hohen Temperatur tropft von der Elektrode flüssiges Metall auf die Schweißstelle und verbindet die Teile des Werkstücks.



3 Elektroschweißen mithilfe eines Schweißtransformators

### Kochen mit dem Trafo

Viele Küchenherde haben ein Glaskeramikfeld ( $\triangleright$  B 4), unter der die Heizwicklungen liegen. Dabei erhitzen die glühenden Metalldrähte zunächst das Kochfeld und dann erst durch Wärmeleitung den Topf. Ein Teil der eingesetzten Energie wird ungenutzt an die Umgebung abgegeben.

Etwas energiesparender, aber vor allem schneller, arbeiten Induktionsherde ( $\triangleright$  B 6). Bei einem Induktionsherd wird die Wärme direkt im Topfboden erzeugt. Die Energieübertragung funktioniert nach dem Trafoprinzip.

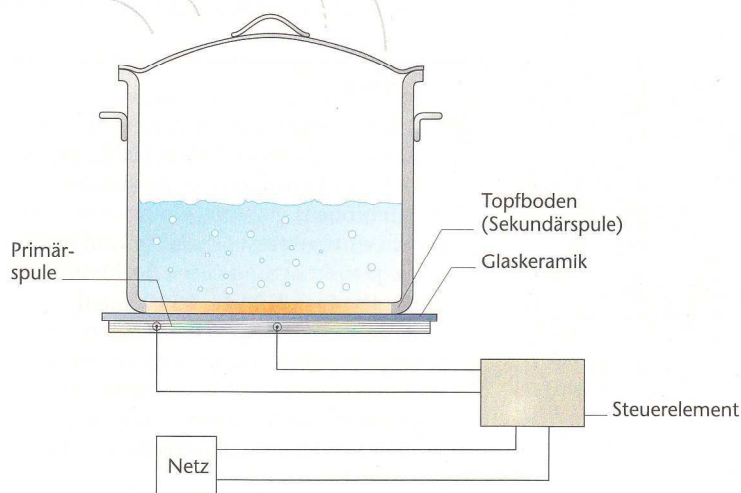
Unter der Glaskeramikplatte des Herdes befindet sich eine Spule, die von Wechselstrom durchflossen wird. Sie entspricht der Primärspule eines Trafos ( $\triangleright$  B 5). Die Sekundärspule ist der Boden des Kochtopfs (Stahl). Du kannst ihn dir als Spule mit einer einzigen geschlossenen Windung vorstellen.

Wenn Strom durch die Primärspule unter der Glaskeramikplatte fließt, erzeugt er im Topfboden (der Sekundärspule) einen starken Strom. Die elektrische Energie wird direkt in Wärme im Topfboden umgewandelt.

Der große Vorteil besteht darin, dass das Kochfeld von Anfang an seine volle Wirkung entfaltet, denn es wird nicht zuerst die Glaskeramikplatte, sondern direkt der Topf aufgeheizt ( $\triangleright$  B 6). Aus diesem Grund dauert es nur etwa 1 Minute, um einen halben Liter Wasser zum Sieden zu bringen. Die eingesetzte Energie wird beim Induktionsherd sehr effektiv genutzt. Steht kein Topf auf dem Herd, erfolgt auch keine Energieübertragung.



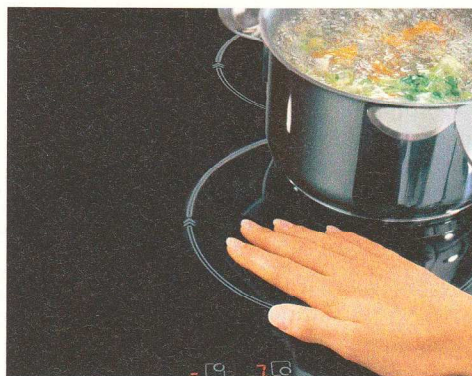
4 Ein Glaskeramikfeld mit Heizwicklungen



5 Schematischer Aufbau eines Induktionsherdes

### Aufgaben

- 1 Bei einem Induktionsschmelzofen hat die Primärspule 25 Windungen. Es fließt ein Strom von 1000 A. Wie groß ist der Strom der Sekundärspule (eine Windung)?
- 2 Welche Vorteile haben Induktionsherde gegenüber herkömmlichen Herden? Gibt es auch Nachteile?



6 Induktionsherd: Die Wärme wird direkt im Topfboden erzeugt.