

---

# 5. Elektrizitätslehre

## 5.1 Elektrischer Stromkreis; Gleichstrom, Wechselstrom, Spannung, Strom, Widerstand

### Grunderscheinungen

Wir sind im täglichen Leben von Elektrizität umgeben:

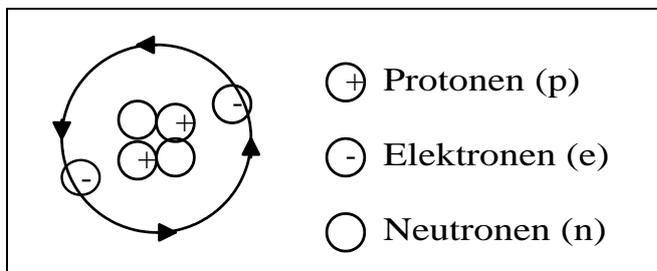
1. Knistern beim Ausziehen synthetischer Kleidung
2. Nichtleitende Griffe an elektrischen Geräten
3. Elektrischer Strom hat vielerlei Wirkungen: Wärmewirkung (Ofen), magnetische Wirkung (Elektromagnetismus), chemische Wirkung (Elektrolyse)
4. Angaben auf elektrischen Geräten: 220 V, 1000 W, 10 A.

Der Name Elektrizität geht zurück auf das griechische Wort "ελεκτρον" (Elektron) und bedeutet Bernstein. Dieser Stoff übt Kräfte auf andere Körper aus.

Versuch:

Ein mit einem Wolllappen geriebener Kunststoffstab zieht leichte Körper (z. B. Haare) an.

Die Grunderscheinungen der Elektrizität lassen sich mit einem einfachen Atommodell verstehen:



Alle Gegenstände bestehen aus kleinsten Teilen, den Atomen; diese bestehen aus Kern und Hülle. Der Atomkern besteht aus positiv geladenen Protonen und elektrisch geladenen Neutronen, die Hülle aus negativ geladenen Elektronen. Protonen und Neutronen haben annähernd gleiche Massen ( $m_p \approx m_n = 1,67 \cdot 10^{-27}$  kg), Protonen und Elektronen haben entgegengesetzt gleiche Ladungen, die sog. Elementarladung  $e$  ( $Q_p = -Q_e = e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  As). Das Elektron hat eine wesentlich kleinere Masse ( $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg). Der Durchmesser eines Atoms beträgt etwa  $10^{-10}$  m, der des Kerns etwa  $10^{-15}$  m.

Gleichnamig geladene Körper stoßen einander ab, ungleichnamig geladene Körper ziehen sich an. Atome mit gleich vielen positiven wie negativen Ladungsträgern sind nach außen elektrisch neutral. Werden unterschiedliche Ladungen getrennt, dann entsteht eine elektrische Spannung, d. h. auf weitere geladene Körper wirken Kräfte.

Der Ladungsausgleich zwischen den beiden verschiedenen Ladungen ist die Ursache aller elektrischen Vorgänge.

Beispiel: Gewitter!

Es gibt positive und negative Ladungen; durch Ladungstrennung entsteht elektrische Spannung.

## Elektrische Ladung

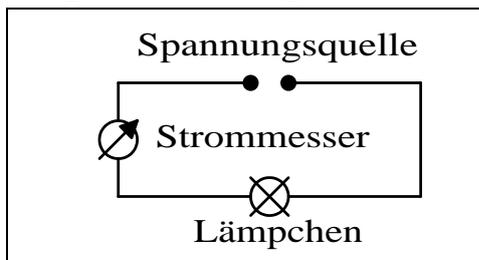
Elektrische Ladung tritt stets als ganzzahliges Vielfaches einer kleinsten Ladung, der sog. Elementarladung  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , auf. Um elektrische Ladungen entsteht ein elektrisches Feld. Für eine punktförmige Ladung  $Q$  lässt sich die Feldstärke  $E$  im Abstand  $r$  nach dem Coulombschen Gesetz leicht berechnen:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r^2}, \text{ also } E \sim \frac{1}{r^2}.$$

## Elektrischer Stromkreis

Elektrischer Strom ist das Fließen elektrischer Ladung. In einem geschlossenen elektrischen Stromkreis fließt Strom, wenn die Spannung durch eine Spannungsquelle, eine "Elektronenpumpe", aufrecht erhalten bleibt. In metallischen Leitern wird der Ladungstransport überwiegend von Elektronen besorgt.

Beispiel für einen geschlossenen Stromkreis:



## Gleich- und Wechselstrom

Die Bewegung der elektrischen Ladungen kann immer in dieselbe Richtung (Gleichstrom) oder in Form einer Hin- und Herbewegung (Wechselstrom) erfolgen. Als technische Stromrichtung wird außerhalb der Stromquelle die Richtung gedachter positiver Ladungen bezeichnet; tatsächlich bewegen sich die Elektronen in entgegengesetzter Richtung.

Elektrischer Strom ist verschobene Ladung  $Q$ . Sinnvollerweise definiert man:

Def.: Unter dem elektrischen Strom  $I$  versteht man den Quotienten aus Ladung  $Q$ , die während der Zeit  $t$  durch einen Leiterquerschnitt transportiert wird, und der Zeit  $t$ :

$$I = \frac{Q}{t} \text{ bzw. } Q = I \cdot t.$$

Einheit:  $[I] = 1 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Sekunde}} = 1 \frac{\text{C}}{\text{s}} = 1 \text{ Ampere.}$

Typische Stromstärken:

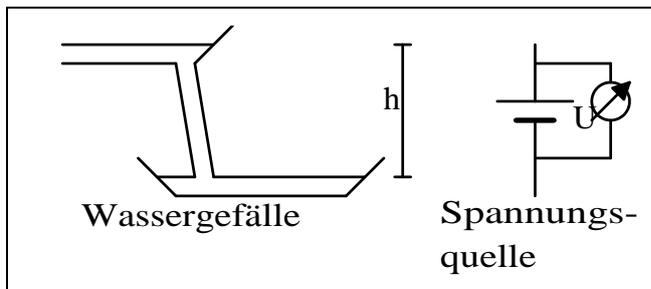
Gerät	Stromstärke	Gerät	Stromstärke
Glimmlampe	2 mA	Glühlampe	200 mA
Fön	2 A	Waschmaschine	10 A
Elektroschweißen	500 A	Blitz	1 kA

Für den Menschen ist ein Dauerstrom von einigen 10 mA lebensbedrohend; man soll daher nie Pole einer Stromquelle (z. B. einer Steckdose) mit feuchten Händen anfassen. Insbesondere ist es gefährlich, mit beiden Händen je einen Pol anzufassen, weil dann der Strom durch das Herz fließen würde.

## Spannung

Die elektrische Spannung ist die Voraussetzung für das Fließen eines elektrischen Stromes. Sie kann mit dem Druck von Flüssigkeiten und Gasen verglichen werden. Eine größere Spannung bewirkt in einem angeschlossenen Stromkreis eine größere Stromstärke.

Veranschaulichung:



Die elektrische Spannung wird nach dem italienischen Physiker Alessandro Volta (1745 -1827) in Volt gemessen. Sie gibt an, welche Energie pro Ladung zur Verfügung gestellt wird.

Definition: Die elektrische Spannung  $U$  ist der Quotient aus elektrischer potentieller Energie  $W$  und elektrischer Ladung  $Q$ :

$$U = \frac{W}{Q}. \text{ Einheit: } [U] = 1 \frac{\text{Joule}}{\text{Coulomb}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}} = 1 \text{ Volt} = 1 \text{ V.}$$

In der Bundesrepublik beträgt die Netzspannung 230 V.

Typische Spannungen:

Gerät	Spannung	Gerät	Spannung
Ni-Fe-Akkuzelle	1,2 V	Autolichtanlage	12 V
Bundesbahn	15 kV	Überlandleitungen	380 kV
Blitz	bis 1 GV		

## Widerstand

V1: Dieselbe Spannung  $U = 12 \text{ V}$  wird nacheinander an verschiedene Lämpchen gelegt.

E.: Man misst unterschiedliche Stromstärken  $I$ . Dasjenige Lämpchen, durch das bei derselben Spannung die kleinere Stromstärke fließt, setzt dem Stromfluss den größeren Widerstand gegenüber.

V2: Ein Lämpchen wird nacheinander an verschiedene Spannungen gelegt.

E.: Die Stromstärken nehmen mit zunehmender Spannung ebenfalls zu. Näherungsweise gilt  $I \sim U$ .

Definition:

Der elektrische Widerstand  $R$  eines Leiters ist der Quotient aus der Spannung  $U$  und der zugehörigen Stromstärke  $I$ :

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

Einheit:  $[R] = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1 \text{ Ohm} = 1 \Omega$ .

Unter günstigen Umständen sind Stromstärke und Spannung zueinander proportional; dann ist der elektrische Widerstand konstant:

$$\text{Gesetz von Ohm: } R = \frac{U}{I} = \text{const.}$$

Beispiele für elektrische Widerstände:

Gerät	Widerstand	Gerät	Widerstand
Elektroherd	12 $\Omega$	Glühlampe	500 $\Omega$
Mensch	100000 $\Omega$		

Anmerkungen:

1. Das Ohmsche Gesetz ist kein Naturgesetz, sondern eher eine Ausnahme; es gilt z. B. für Konstantan.
2. Bei sehr tiefen Temperaturen ( $\theta < 4 \text{ K}$ ) sinkt der elektrische Widerstand sprunghaft ab (Supraleitung).

## Energie und Leistung

Um Ladungen zu transportieren, muss von der Spannung  $U$  mit Hilfe des Stroms  $I$  während der Zeit  $t$  eine Arbeit  $W$  verrichtet werden. Dividiert man diese durch die Zeit  $t$ , erhält man die Leistung  $P$ .

Definition:

Die elektrische Leistung  $P$  eines Stroms  $I$  bei der Spannung  $U$  beträgt  
 $P = U \cdot I$ .

Einheit:  $[P] = 1 \text{ VA} = 1 \text{ Watt} = 1 \text{ W}$ .

Die elektrische Arbeit  $W$  eines Stroms  $I$  bei der Spannung  $U$  beträgt während der Zeit  $t$

$W = U \cdot I \cdot t$ .

Einheit:  $[W] = 1 \text{ VAs} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ J (Joule)}$ .

Beispiele für elektrische Leistungen:

Gerät	Leistung	Gerät	Leistung
Klingel	0,5 W	Leuchtstoffröhre	30 W
Glühbirne	25 - 250 W	Fön	1000 W
Dauerleistung Mensch	50 W	E-Lok	1300000 W

Anmerkung:

Die Gleichung  $P = U \cdot I$  gilt für Momentanwerte. In einem Wechselstromkreis ändert sich mit der Spannung und der Stromstärke auch die Leistung. Wechselstromleistungen sind daher sog. Effektivwerte.

### Elektrizität in der Diagnostik

Die kontrollierte Wirkung des elektrischen Stroms auf den Organismus hängt ab von den Eigenschaften des Stroms (Stromstärke, Spannung, Dauer, Elektrodenform u. a.), der Körperform und den Haut- und Gewebewiderständen.

Bei der Elektrokardiographie (EKG) und der Elektroenzephalographie verhalten sich erregter und unerregter Teil einer jeden Herzmuskelfaser wie ein elektrischer Dipol. Dabei zeigen die erregten Muskelpartien eine negative Ladung, die sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit ausbreitet (= Strom). Die Ströme werden an bestimmten Stellen des Körpers abgenommen und die Spannungsdifferenz an einem Oszillographen registriert. Die Abweichungen vom normalen Bild können so diagnostische Hinweise ergeben. Die Elektroden müssen sehr sorgfältig angelegt werden, um Kontaktpotentiale zu vermeiden (Auftragen von entsprechenden Pasten an die Kontaktstellen).

### Elektrizität in der Therapie

Gleichströme haben eine Reizwirkung auf Nerven, die sich bei geeigneter Stärke schmerzlindernd auf rheumatische Erkrankungen auswirken können.

Der Anschluss des Körpers an die Stromquelle erfolgt durch Plattenelektroden, durch Wechselelektroden (Vierzellenbad) oder im Stangerbad (Körper liegt im Wasser, Elektroden befinden sich am Wannenrand).

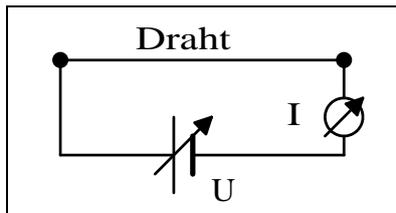
Herzschrittmacher vermitteln über Elektroden, die in den Herzmuskel eingepflanzt werden, Stromimpulse, die in entsprechender Frequenz die Herzmuskelkontraktionen wieder normalisieren.

## 5.2 Wärmewirkung, magnetische Wirkung, chemische Wirkung

### Wärmewirkung des elektrischen Stromes

Wenn ein elektrischer Strom einen Draht durchfließt, so erwärmt sich dieser je nach Stromstärke, Drahtdicke und Material mehr oder weniger.

V.: Durch einen Draht fließt ein Strom variabler Stärke.



E.: Mit zunehmender Stromstärke erwärmt sich der Draht immer mehr, fängt zu glühen an und reißt schließlich ab.

Fließt ein elektrischer Strom durch einen Leiter, so wird dieser erwärmt.

Anwendungen der Wärmewirkung:

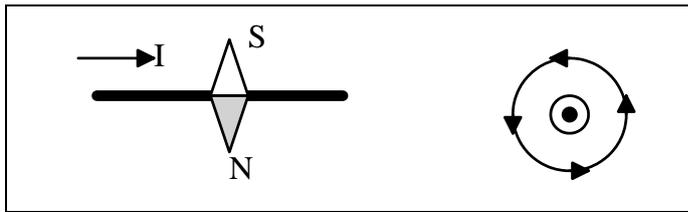
1. Tauchsieder
2. Bügeleisen
3. Heizstrahler
4. Heizkissen (mit gut isolierten Heizdrähten in einer biegsamen Asbestschnur)
5. Glühlampe (mit Wolframdraht in einer Stickstoff- oder Argonatmosphäre)
6. Elektroöfen, Waschmaschine, Wäschetrockner usw.

### Magnetische Wirkung des elektrischen Stroms

Erinnerung: Es gibt Eisenerzstücke (zuerst in Magnesia gefunden), die Körper aus Eisen, Kobalt oder Nickel anziehen. Solche Körper heißen Magnete. Die Haftkraft ist an den Enden der Magnete (Pole) am stärksten. Gleichnamige Magnetpole stoßen einander ab. Frei aufgehängte Magneten stellen sich in N-S-Richtung ein.

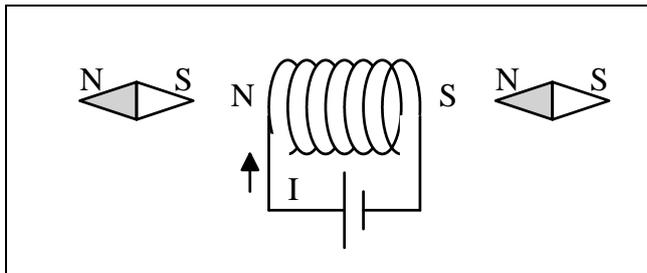
Die Stellen stärkster Anziehung eines Magneten heißen Pole. Gleichnamige Pole stoßen einander ab, ungleichnamige Pole ziehen einander an.

V.: Eine Magnetnadel steht über einem stromdurchflossenen Leiter.



E.: Die Magnetnadel stellt sich senkrecht zur Leiterichtung ein.

V.: Ein Leiter wird zu einer Spule gewickelt und vom Strom durchflossen.



E.: Die Spule wirkt wie ein Stabmagnet. Die magnetische Wirkung wird durch Einschieben eines Eisenkerns noch verstärkt.

Eine stromdurchflossene Spule wirkt wie ein Stabmagnet. Eine Spule mit Weicheisenkern heißt Elektromagnet.

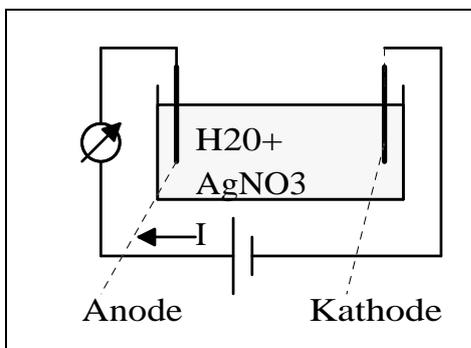
Anwendungen:

1. Elektromagnet zum Tragen schwerer Lasten
2. Relais
3. Lautsprecher
4. Elektromotor

### Chemische Wirkung des elektrischen Stroms

Auch wässrige Lösungen von Salzen, Säuren und Laugen leiten den elektrischen Strom.

V.: Zwei Kohleelektroden tauchen in eine wässrige Silbernitratlösung.



E.: Es fließt ein elektrischer Strom; an der Kathode scheidet sich Silber ab.

Erklärung: Positive Metallionen wandern zur (negativen) Kathode und werden mit Elektronen der Kathode zu neutralen Metallatomen.

Lösungen von Säuren, Laugen und Salzen leiten den elektrischen Strom. Dabei treten chemische Zerlegungen auf (Elektrolyse). Metalle schlagen sich an der Kathode nieder.

Anmerkungen, Anwendungen:

1. Aus dem Niederschlag kann man die unbekanntes Pole einer Stromquelle bestimmen.
2. Bei der Galvanisierung werden Gegenstände aus unedleren Metallen versilbert, verchromt oder verkupfert, indem sie in einem galvanischen Bad einer Lösung des Überzugsmetalls ausgesetzt werden.
3. Auf einem aktiven Transport von großen Molekülen in einem elektrischen Feld in einer Elektrolytlösung beruht auch der Vorgang der Elektrophorese. Nach Anlegen der Elektroden wandern die Moleküle verschieden schnell und unterschiedliche Strecken. Dies kann man in der Hämatologie zur Diagnose anhand unterschiedlicher Zusammensetzung von Albuminen und Globulinen benutzen.

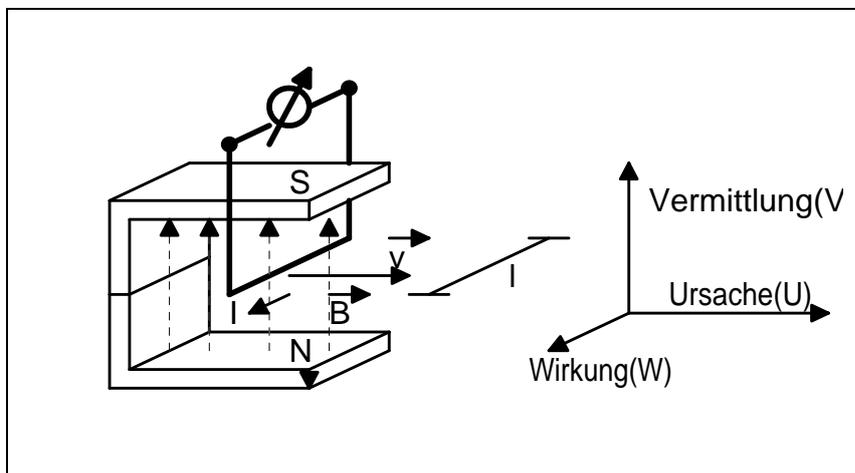
## 5.3 Induktion

Auf einen stromdurchflossenen Leiter wirkt in einem Magnetfeld i. a. eine Kraft, deren Richtung durch die sog. 1. UVW-Regel der rechten Hand ermittelt werden kann. Es bleibt zu klären, ob dieser Vorgang umkehrbar ist, d. h. ob die Bewegung eines Leiters in einem Magnetfeld einen elektrischen Strom verursachen kann.

### Grundlegende Erscheinungen

Der klassische Versuch zur Demonstration der mit dem Begriff Induktion beschriebenen Erscheinung ist der "Leiterschaukelversuch":

Versuch:



Eine frei beweglich aufgehängte Leiterschaukel, deren Enden mit einem empfindlichen Spannungsmesser verbunden sind, hängt im magnetischen Feld zwischen den Polen eines starken Hufeisenmagneten.

Ergebnis: Lässt man den Leiter schaukeln, registriert das Messgerät eine Spannung an den Leiterenden bzw. einen Stromfluss durch den Leiter, wobei die Richtung des Stromes von der Richtung der Bewegung des Leiters relativ zum Magneten abhängt.

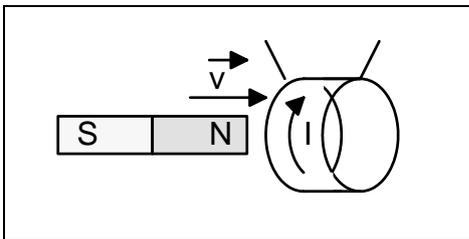
Variiert man die Versuchsparameter, so zeigt sich, dass mit zunehmender Leiteranzahl bzw. mit zunehmender Relativgeschwindigkeit zwischen Leiter und Magnet auch die Induktionsspannung zunimmt. Die Relativbewegung zwischen Leiter und Magnet kann ersetzt werden dadurch, dass man ein Stück des Leiters zu einer Schleife biegt und die Schleife im Magnetfeld so dreht bzw. die Schleifenfläche durch Deformieren so ändert, dass sich die Zahl der von der Schleife umfassten magnetischen Feldlinien zeitlich ändert. Die Richtung des induzierten Stromes kann durch die 2. UVW-Regel der rechten Hand bestimmt werden.

Durch geeignete Bewegung eines Leiters in einem Magnetfeld entsteht an seinen Enden eine Induktionsspannung. Wird der Leiterkreis geschlossen, fließt Induktionsstrom.

## Die Lenzsche Regel

Die Polung der Induktionsspannung bzw. die Richtung des Induktionsstroms ist im Leiterschaukelversuch leicht zu ermitteln; mit der UVW-Regel scheidert man dagegen beim nächsten Versuch:

Versuch:



Ein Stabmagnet wird in einen beweglich aufgehängten Aluminiumring gestoßen.

Ergebnis: Der Ring folgt der Bewegung des Magneten.

Erklärung: Im Ring (Spule!) entsteht ein Induktionsstrom, der ein Magnetfeld erzeugt. Der Strom ist offenbar so gerichtet, dass gleichnamige Pole des Stab- und des Ringfeldes einander benachbart sind und abstoßende Kräfte erzeugen. Beim Herausziehen des Stabmagneten aus dem Ring entsteht offensichtlich eine anziehende Kraft. Beide Male wirkt die entstehende Kraft der Bewegung des Stabmagneten, also der Ursache des Induktionsvorganges, entgegen.

Analoge Kraftwirkungen kann man auch beobachten, wenn man den Ring um den Eisenkern eines Elektromagneten steckt und den Strom einschaltet. Aus diesen Versuchen lässt sich folgern:

Lenzsche Regel: Der Induktionsstrom ist so gerichtet, dass er durch die von ihm ausgehende Kraft die Ursache seiner Entstehung zu hemmen versucht.

## Induktion in Spulen

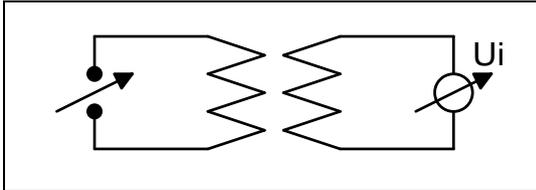
Die Induktionsspannung ist u. a. von der Anzahl der in einem Magnetfeld befindlichen Windungen eines Leiters abhängig. Es liegt daher nahe, Induktionserscheinungen unter Verwendung von Spulen zu untersuchen.

V.: Ein Stabmagnet wird mit jeweils konstanter Geschwindigkeit in Spulen verschiedener Windungszahlen gestoßen.

E.: Die induzierte Spannung nimmt mit der Windungszahl zu.

Ein magnetisches Feld, in dem an den Enden einer Spule eine Spannung induziert werden kann, muss nicht notwendigerweise durch einen Permanentmagneten erzeugt werden, sondern kann auch von einem Elektromagneten stammen:

Versuch:



Das Magnetfeld und seine Änderung werden mit Hilfe eines Elektromagneten erzeugt.

Ergebnisse:

Spannung wird induziert, wenn

1. bei konstantem Feldstrom die Induktionsspule geeignet bewegt wird,
2. bei ruhender Feld- und Induktionsspule die Stromstärke variiert wird,
3. die Feldspule von Wechselstrom durchflossen wird.

**Zusammenfassung:** Ändert sich der magnetische Fluss durch eine Induktionsspule, so entsteht an ihren Enden eine Induktionsspannung, die noch verstärkt wird, wenn die Kopplung zwischen Feld- und Induktionsspule intensiviert wird.

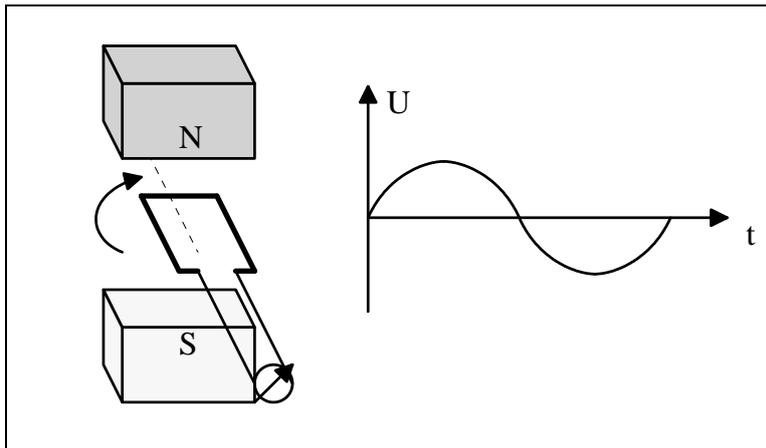
### Der Generator

Eine wichtige Anwendung der Induktion liegt im Generator vor.

Prinzip:

In einem Magnetfeld wird eine Spule bewegt.

E.: An den Enden entsteht durch Induktion eine Wechselspannung. Führt man die Spannung über einen Kommutator ab, so erhält man eine pulsierende Gleichspannung (vgl. Skizzen).



Dreht man eine Spule in einem Magnetfeld, so wird in ihr eine Wechselspannung induziert.

Anmerkungen:

1. Ein Generator verwandelt mechanische Energie in elektrische Energie.
2. Bei Vertauschen von Ursache und Wirkung entsteht ein Elektromotor.
3. Wechselspannung kann durch Transformatoren in weiten Grenzen transformiert werden (Hochspannungs-, Hochstromtransformator).

## 5.4 Elektromagnetische Strahlung

Wird ein Leiter (Hertzscher Dipol, Dipolantenne) induktiv an einen Hochfrequenzgenerator angekoppelt, so beginnt er selbst zu schwingen, d. h. durch ihn fließt ein Wechselstrom. Dabei gibt er Energie in Form elektromagnetischer Strahlung ab.

Elektromagnetische Strahlung tritt uns in vielerlei Formen entgegen, die sich vor allem in der Wellenlänge, der Frequenz und den Eigenschaften und Wirkungen (z. B. auf den Organismus) unterscheiden.

Einige Erscheinungsformen und Anwendungsgebiete:

1. technische Wechselströme ( $f = 50 \text{ Hz}$ )
2. Nachrichtenübertragung ( $10^5 \text{ Hz} < f < 10^{10} \text{ Hz}$ )
3. Mikrowellen ( $10^{11} \text{ Hz}$ )
4. u. v. m.

Dieses Dokument wurde mit Win2PDF, erhaeltlich unter <http://www.win2pdf.com/ch>  
Die unregistrierte Version von Win2PDF darf nur zu nicht-kommerziellen Zwecken und zur Evaluation eingesetzt werden.