

Vorstudienlehrgang der Wiener Universitäten VWU

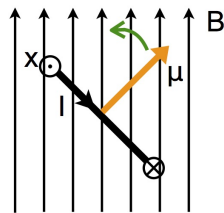
Skriptum

Physik-Kurs

Teil 5: Elektrodynamik und Magnetismus

Katharina Durstberger-Rennhofer

Version November 2016



Inhaltsverzeichnis

1	Magnetismus	1
1.1	Allgemeine Begriffe	1
1.2	Stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld - Lorentzkraft	2
1.2.1	Die 3-Finger-Regel	3
1.2.2	Die Einheit des Magnetfeldes	3
1.3	Freie Ladungen im Magnetfeld - Lorentzkraft	3
1.3.1	Richtung der Kraft	4
1.4	Aufgaben	4
2	Anwendungen der Lorentz-Kraft	6
2.1	Kreisbahn von bewegten Ladungen im Magnetfeld	6
2.1.1	Massenspektrometer	6
2.1.2	Beschleunigung im Kondensator und Ablenkung im Magnetfeld	7
2.2	Der magnetische Dipol	8
2.2.1	Das magnetische Dipolmoment	8
2.2.2	Drehmoment und magnetisches Dipolmoment	9
2.3	Der Gleichstrommotor	10
2.3.1	Der prinzipielle Aufbau des Motors	10
2.3.2	Die einzelnen Phasen der Rotation	10
2.4	Der elektrische Dipol	11
2.5	Die Wirkung elektrischer und magnetischer Felder auf Ladungen	12
2.5.1	Wirkung auf Einzelladungen	12
2.5.2	Wirkung auf Dipole	12
2.6	Aufgaben	12
3	Jeder Strom erzeugt ein Magnetfeld	15
3.1	Das Feld eines geradlinigen Leiters	15
3.2	Das Magnetfeld einer Spule	15
3.3	Der Magnetische Fluss	16
3.4	Zusammenwirken mehrerer Magnetfelder	16
3.5	Die Wirkung von parallelen Strömen aufeinander	17
3.6	Aufgaben	18
4	Induktionsgesetz	20
4.1	Die elektromotorische Kraft	20
4.2	Das Induktionsgesetz	20
4.2.1	Ableitung des Induktionsgesetzes	20
4.2.2	Induktionsspannung und Lorentzkraft	22
4.3	Gegenseitige Induktivität (Gegeninduktivität)	22
4.3.1	Herleitung	22
4.4	Selbstinduktivität	24
4.5	Aufgaben	25
5	Der Wechselstrom	27
5.1	Allgemeines	27
5.2	Der Wechselstromgenerator	27
5.2.1	Grundlage	27

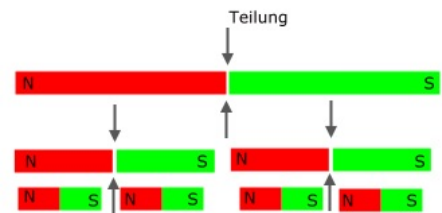
5.2.2	Aufbau des Generators	28
5.2.3	Berechnung der Wechselspannung	28
5.2.4	Die einzelnen Phasen der Rotation	29
5.2.5	Zusammenfassung	29
5.3	Wechselstromwiderstände	30
5.3.1	Wechselstromkreis mit rein Ohm'schem Widerstand	30
5.3.2	Wechselstromkreis mit rein induktivem Widerstand	31
5.3.3	Wechselstromkreis mit rein kapazitivem Widerstand	32
5.3.4	Wechselstromwiderstände in Serienschaltung	33
5.4	Leistung im Wechselstromkreis	34
5.4.1	Momentante Leistung und mittlere Leistung	34
5.4.2	Leistung und Phasenwinkel	34
5.4.3	Einheiten	35
5.5	Aufgaben	35
6	Materie im Magnetfeld	38
6.1	Wiederholung: Materie im elektrischen Feld	38
6.2	Materie im Magnetfeld	38
6.2.1	Diamagnetische Stoffe	38
6.2.2	Paramagnetische Stoffe	38
6.2.3	Ferromagnetische Stoffe	39
6.3	Der Transformator	39
6.3.1	Aufbau und Funktionsweise	39
6.3.2	Transformatorverluste	40
6.3.3	Verkleinerung einer Spannung	40
6.4	Aufgaben	42
7	Energieversorgung mit elektrischem Strom	43
7.1	Drehstrom (Dreiphasenstrom)	43
7.1.1	Allgemeines Prinzip	43
7.1.2	Reale Ausführung	43
7.1.3	Sternschaltung	43
7.1.4	Dreieckschaltung	44
7.2	Der Weg des Stromes vom Kraftwerk zum Verbraucher	44
7.2.1	Energieerzeugung durch Kraftwerke	44
7.2.2	Energietransport durch Leitungen	46
7.2.3	Energieverbrauch im Haushalt	47
7.3	Aufgaben	50

1 Magnetismus

1.1 Allgemeine Begriffe

Magnetpole

- Es gibt zwei Arten von magnetischen "Ladungen", die Magnetpole genannt werden: Nordpol N und Südpol S.
Meist wird der Nordpol grün und der Südpol rot dargestellt.
- Zwischen den Polen gibt es magnetische Kräfte. Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige Pole ziehen sich an.
- Wenn man einen Magneten in Stücke zerteilt, so erhält man kleinere Magnete, die wieder jeweils einen Nord- und einen Südpol besitzen. Magnetpole können nicht isoliert existieren, es gibt sie nur in Kombination.

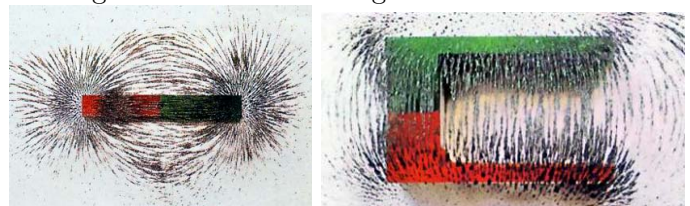


Es gibt verschiedene Arten von Magneten:

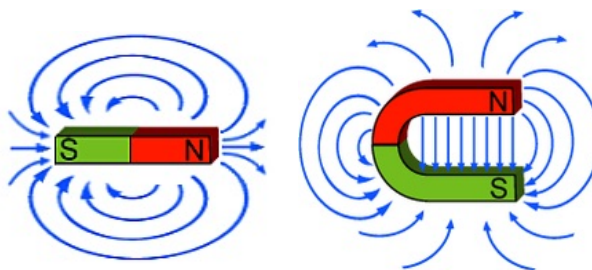
- Natürliche Magnete: in der Natur vorkommende Magnetit-Steine, die sich aus eisenhaltiger Lava zusammensetzen, die den natürlichen Magnetismus der Erde gespeichert haben
- Dauer- oder Permanentmagnete: industrielle gefertigte Magnete aus Eisenlegierungen (sehr leistungsfähig: Neodym, Eisen und Bor)
Die häufigsten Formen von Permanentmagneten:
Stabmagnet, Hufeisenmagnet, Scheibenmagnet, Ringmagnet, Blockmagnet, Rundmagnet, Magnethaken (Kompass)
- Elektromagnete: werden technisch durch Strom (Induktion) erzeugt, sie können ein- und ausgeschaltet werden
- Erde: unser Planet wirkt wie ein Magnet mit einem magnetischen Nord- und Südpol (diese entsprechen in etwa den geographischen Polen), was zu Orientierungszwecken verwendet werden kann (Kompass)

Magnetfeld und Feldlinien

- Die magnetische Kraftwirkung kann durch ein magnetisches Feld (Magnetfeld) B dargestellt werden, das den gesamten Raum ausfüllt.
- Das Magnetfeld B kann durch Feldlinien dargestellt werden. Je dichter die Feldlinien sind, desto stärker ist das magnetische Feld und damit die magnetische Kraftwirkung.
- Die Magnetfeldlinien können z.B. durch Eisenpulver (sogenannte Eisenfeilspäne) sichtbar gemacht werden.



- Die Feldlinien beginnen an den Polen und laufen vom Nordpol zum Südpol, allerdings nur im Außenraum eines Magneten. Das Feld eines Stabmagneten ist inhomogen, das Feld zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten ist homogen, wenn die Pole breit sind und nahe beisammen liegen.



Zwischen den Polen eines Magneten gibt es ein Kraftfeld, man nennt es Magnetfeld B . Der Pol, wo die Feldlinien beginnen, heißt Nordpol N (meist rot eingezeichnet), der Pol, wo sie enden, heißt Südpol S (meist grün eingezeichnet).

Konvention über die Darstellung von Richtungen

Magnetfelder und die Kräfte, die sie ausüben, benötigen den gesamten 3-dimensionalen Raum. Damit man übersichtliche 3-dimensionale Zeichnungen und Skizzen anfertigen kann, führen wir folgende zeichnerische Darstellungen für die 3 Raumrichtungen ein:

- **rechts, links:** wird mit Pfeilen nach links oder nach rechts dargestellt \rightarrow , \leftarrow
- **oben, unten:** wird mit Pfeilen nach oben oder nach unten dargestellt \uparrow , \downarrow
- **vorne, hinten:** wird mit einem Punkt (Pfeilen von vorne gesehen) oder mit einem Kreuz (Pfeil von hinten gesehen) dargestellt \odot , \otimes

Die ersten beiden Richtungen bewegen sich in der sogenannten "Zeichenebene" (z.B. das Blatt Papier oder die Tafel). Die dritte Richtung bewegt sich aus dieser Ebene heraus, entweder nach vorne oder nach hinten.

1.2 Stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld - Lorentzkraft

Diese Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter wurde 1889 das erste Mal vom englischen Physiker Oliver Heaviside (1850 - 1925) abgeleitet, 1895 vom niederländischen Physiker und Mathematiker Hendrik Antoon Lorentz (1853 - 1928) eingeführt.

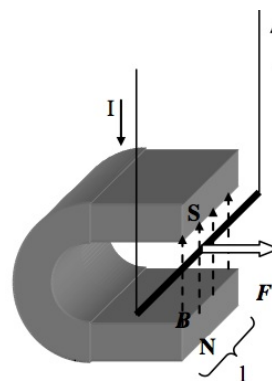
Experiment:

Ein Strom I fließt durch einen Leiter. Dieser Leiter wird beweglich aufgehängt (mit einer sogenannten Leiterschaukel) und befindet sich in einem homogenen Magnetfeld. Ein Teil des Leiters steht normal zum Magnetfeld. Wenn nun der Strom eingeschaltet wird, so misst man eine Kraft F , die die Leiterschaukel entweder weiter ins Magnetfeld hineinzieht oder aus dem Magnetfeld herausdrückt. Die Kraft F steht dabei normal zu B und zum Leiter. Man stellt auch fest, dass die Kraft proportional zum Strom I , zur Länge l des Leiters im Feld und zur Stärke des Magnetfeldes B ist. Die Größe der Kraft ist gegeben durch:

$$F = l \cdot I \cdot B \quad (1.1)$$

Wenn Strom und Magnetfeld nicht normal aufeinander stehen, sondern den Winkel α einschließen, so wird diese Kraft kleiner:

$$F = l \cdot I \cdot B \cdot \sin \alpha \quad (1.2)$$



Es gilt allgemein:

Auf einen stromdurchflossenen Leiter mit der Stromstärke I und der Länge l wirkt im Magnetfeld B die sogenannte **Lorentz-Kraft** F_L . Die Kraft ist normal zu I und B und hat den Betrag

$$F_L = l \cdot I \cdot B \cdot \sin \alpha \quad (1.3)$$

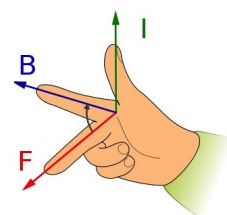
Dabei ist l die wirksame Länge des Leiters im Magnetfeld. Der Strom I und das Magnetfeld B stehen im Winkel α zueinander.

Die Richtung der Lorentzkraft wird durch die 3-Finger-Regel der rechten Hand bestimmt.

1.2.1 Die 3-Finger-Regel

Für die 3-Finger-Regel verwendet man Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger, die gemeinsam ein sogenanntes Dreibein bilden. Alle Finger stehen (ungefähr) im rechten Winkel zueinander.

Die Lorentzkraft auf einen stromdurchflossenen Leiter bestimmt man mit der 3-Finger-Regel der rechten Hand, auch Rechte-Hand-Regel genannt. Der Daumen zeigt in die Richtung der Stromrichtung I , der Zeigefinger zeigt in die Richtung des Magnetfeldes B . Der Mittelfinger gibt dann die Richtung der Lorentz-Kraft F_L an.



1.2.2 Die Einheit des Magnetfeldes

Man kann die Lorentz-Kraft benutzen, um eine Definition für das Magnetfeld B zu geben. Wenn B und I normal aufeinander stehen ($\alpha = 90^\circ$), dann gilt die einfachere Formel $F_L = l \cdot I \cdot B$. Damit kann man nun B ausdrücken:

$$B = \frac{F_L}{l \cdot I} \quad (1.4)$$

Es gilt folgende Definition:

Ein **Magnetfeld** B hat die Stärke $1 \text{ T} = 1 \text{ Tesla}$, wenn es auf einen Strom $I = 1 \text{ A}$ der Länge 1 m , der normal zu B steht, die Lorentz-Kraft $F = 1 \text{ N}$ ausübt.

Einheit:

$$[B] = \left[\frac{F_L}{l \cdot I} \right] = \frac{\text{N}}{\text{m} \cdot \text{A}} = \text{T Tesla}$$

Das Magnetfeld B wird auch als magnetische Flussdichte oder magnetische Feldstärke bezeichnet.

1.3 Freie Ladungen im Magnetfeld - Lorentzkraft

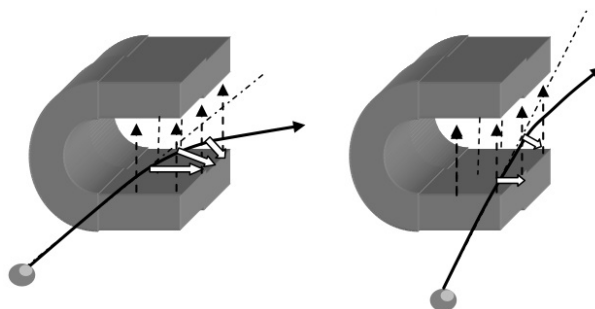
Die Lorentzkraft wirkt nicht nur auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld, sondern auch auf freie bewegte Ladungen kann man eine ablenkende Kraft feststellen.

Bild links:

Eine positive Ladung Q wird in ein Magnetfeld B geschossen. Die Geschwindigkeit v steht normal zum Feld B . Die Ladung wird durch die Lorentzkraft auf eine gekrümmte Bahn abgelenkt.

Bild rechts:

Wenn die Geschwindigkeit v nicht normal zum Magnetfeld steht, sondern den Winkel α bildet, so ist



die Lorentz-Kraft entsprechend kleiner und die Ablenkung nicht so groß.

Wenn sich eine Ladung Q mit der Geschwindigkeit v in einem Magnetfeld B bewegt, so wird sie durch die **Lorentz-Kraft** F_L abgelenkt. Die Lorentzkraft F_L steht immer normal auf v und B und hat den Betrag

$$F_L = Q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha \tag{1.5}$$

Die Geschwindigkeit v und das Magnetfeld B stehen im Winkel α zueinander.

1.3.1 Richtung der Kraft

Die Richtung der Lorentzkraft auf eine freie Ladung wird mit der 3-Finger-Regel bestimmt. Der Daumen zeigt in die Richtung der Geschwindigkeit v , der Zeigefinger zeigt in die Richtung des Magnetfeldes B . Der Mittelfinger gibt dann die Richtung der Lorentzkraft F_L an.

Für freie Ladungsträger hängt die Richtung der Kraft vom Vorzeichen der Ladung ab.

Es gilt:

Wenn $Q > 0$ (positive Ladung), so verwendet man die 3-Finger-Regel der rechten Hand.

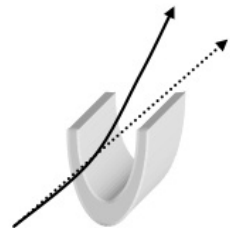
Wenn $Q < 0$ (negative Ladung), so verwendet man die 3-Finger-Regel der linken Hand.

1.4 Aufgaben

(1.1) a) Eine positive Ladung bewegt sich in Pfeilrichtung und wird in einem Magnetfeld in der abgebildeten Weise abgelenkt.

Auf welcher Seite befindet sich der Nordpol des Magneten?

b) Die Ladung $Q = 4 \text{ mC}$ wird parallel zu einem Magnetfeld abgeschossen. Wird sie abgelenkt? Wenn ja, in welche Richtung?



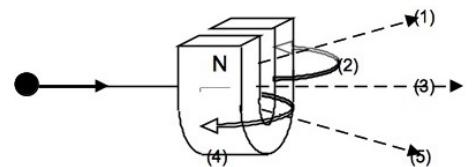
(1.2) Eine positive Ladung wird in Pfeilrichtung durch ein Magnetfeld geschossen.

a) Auf welcher Bahn (1) bis (5) bewegt sich die Ladung weiter?

- (1) nach oben abgelenkt, (2) nach links abgelenkt,
- (3) nicht abgelenkt, (4) nach rechts abgelenkt,
- (5) nach unten abgelenkt

b) Zeichnen Sie das Magnetfeld ein!

c) Wie heißt die Kraft, die auf die Ladung wirkt?

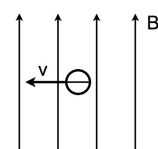
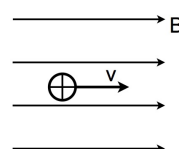
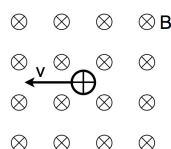
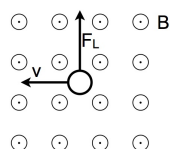


(1.3) Eine Ladung $Q = +4 \text{ mC}$ bewegt sich gleichförmig mit $v = 200 \text{ m/s}$ in einem homogenen Magnetfeld $B = 0,2 \text{ T}$. Dieses zeigt normal zur Bewegungsrichtung nach rechts.

a) In welche Richtung wird die Ladung abgelenkt?

b) Wie groß ist die Kraft, mit der sie abgelenkt wird?

(1.4) Bestimmen Sie für die vier Abbildungen jeweils die gesuchten Größen!



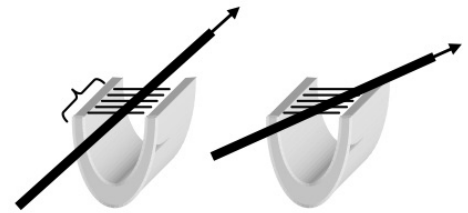
Ladungsvorzeichen? Lorentzkraft? Lorentzkraft? Lorentzkraft?

(1.5) Bestimmen Sie für die vier Abbildungen jeweils die gesuchten Größen!

Lorentzkraft?	Lorentzkraft?	Lorentzkraft?	Lorentzkraft?

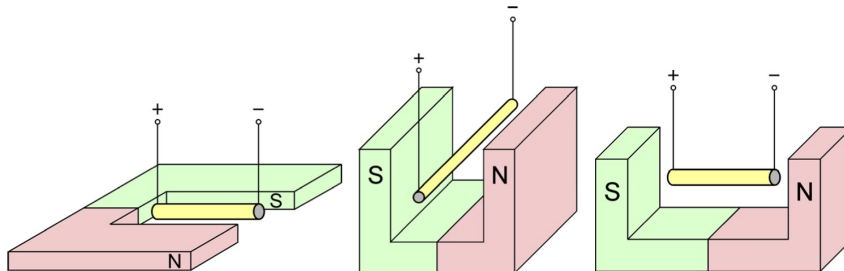
(1.6) Die Abbildung zeigt einen stromführenden Leiter ($I = 2 \text{ A}$, $L = 0,9 \text{ m}$) in einem Magnetfeld. Der Nordpol des Magneten befindet sich rechts. Der Abstand der Pole beträgt $0,2 \text{ m}$ die "Breite" des Magnetfeld beträgt $0,3 \text{ m}$. Auf den Leiter im linken Bild wirkt die Lorentzkraft $F = 20 \text{ N}$.

- In welche Richtung wirkt die Kraft?
- Wie groß ist die Lorentzkraft im rechten Bild?
- Berechnen Sie die magnetische Feldstärke B !



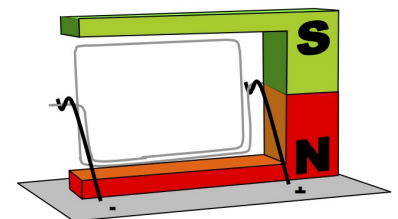
- (1.7) a) In welcher Einheit wird das Magnetfeld gemessen?
 b) Ein elektrischer Strom fließt parallel zu einem Magnetfeld. Warum wird er nicht abgelenkt?
 c) Bei welcher Art von Magneten und in welchem Bereich erhält man ein annähernd homogenes Magnetfeld?

(1.8) Eine stromdurchflossene Leiterschaukel befindet sich in einem Magnetfeld. Zeichnen Sie in den drei Abbildungen die Krafrichtung auf den Leiter ein!



(1.9) Die Abbildung zeigt eine drehbar gelagerte Leiterschleife, die sich im homogenen Bereich eines Hufeisenmagneten befindet. Durch die Schleife fließt ein Strom von $1,5 \text{ A}$, wobei der rechte Anschluss mit dem Pluspol der Quelle verbunden ist.

- Zeichne die Richtung des äußeren Magnetfeldes und die der Kräfte auf die einzelnen Spulenabschnitte ein.
- Wie groß ist die Kraft auf den oberen, 80 mm langen Leiterabschnitt, wenn dort eine Magnetfeld von 20 mT herrscht?
- Eine andere, gleich große Spule (mehrere Leiterschleifen hintereinander) besitzt $5,5$ Windungen (oben 5 Leiterabschnitte, unten 6 Leiterabschnitte). In der Mitte des oberen Leiterabschnittes ist ein Kraftmesser angebracht, der bei einer Stromstärke von 2 A eine Kraft von 46 mN registriert. Wie groß muss also das Magnetfeld sein?



2 Anwendungen der Lorentz-Kraft

2.1 Kreisbahn von bewegten Ladungen im Magnetfeld

Weil der Vektor der Lorentzkraft stets senkrecht auf dem Geschwindigkeitsvektor steht, also stets senkrecht zur Bewegungsrichtung wirkt, bleibt der Geschwindigkeitsbetrag des geladenen Teilchen konstant. Allerdings ändert sich durch den Einfluss der Lorentzkraft die Bewegungsrichtung. Im homogenen Magnetfeld ist das Magnetfeld B überall gleich groß. Daher bleibt auch der Betrag der Lorentzkraft konstant. Als Folge einer Kraft deren Betrag konstant und deren Richtung stets senkrecht zur momentanen Bewegungsrichtung ist, ergibt sich als Teilchenbahn eine Kreisbahn. Dabei stellt die Lorentzkraft die für die Kreisbewegung erforderliche Zentripetalkraft dar.

In der Abbildung wird eine Masse m mit der positiven Ladung $Q > 0$ mit der Geschwindigkeit v in ein homogenes Magnetfeld B geschossen. Sobald sie ins Feld eintritt, wirkt die Lorentzkraft F_L , die bewirkt, dass sich die Ladung auf einer Kreisbahn bewegt. Es gilt für die Kreisbahn :

Lorentz-Kraft = Zentripetalkraft

$$Q \cdot v \cdot B = m \cdot r \cdot \omega^2 = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (2.1)$$

Daraus ergeben sich verschiedene Zusammenhänge:

$$m = \frac{Q \cdot B \cdot r}{v} \quad \text{oder} \quad r = \frac{m \cdot v}{Q \cdot B}$$

Die Zeit, die eine Ladung für einen vollen Umlauf benötigt, ist gegeben als

$$T = \frac{2\pi \cdot r}{v} = \frac{2\pi \cdot m}{Q \cdot B} \quad (2.2)$$

und ist unabhängig von der Bahngeschwindigkeit v des Teilchens.

Auf diese Weise konnte man die Masse des Elektrons feststellen, nachdem man durch ein anderes Experiment die Ladung gemessen hatte. Es ergaben sich folgende Werte:

Masse des Elektrons: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg

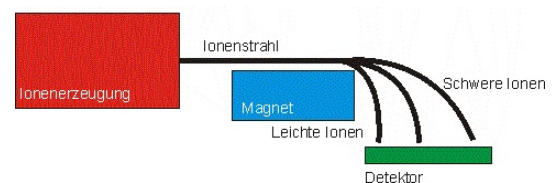
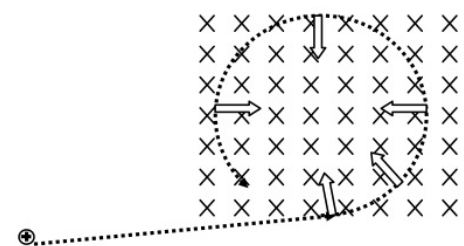
Ladung des Elektrons: $Q_e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C

2.1.1 Massenspektrometer

Mit Massenspektrometern kann man die Masse von elektrisch geladenen Teilchen (Ionen) bestimmen. Dabei werden die Teilchen durch ein homogenes Magnetfeld geschickt und dadurch auf eine Kreisbahn gelenkt. Anschließend wird der Radius dieser Kreisbahn gemessen. Da der Radius nicht nur von der Masse, sondern auch von der Geschwindigkeit der Teilchen abhängt, platziert man vor dem Massenspektrometer meist einen Geschwindigkeitsfilter (siehe nächster Abschnitt). Dieser lässt nur Teilchen mit der gewünschten Geschwindigkeit v durch.

Hat man den Radius r der Teilchenbahn gemessen und kennt man die Ladung Q und Geschwindigkeit v des Teilchens, sowie das magnetische Felde B , so kann man die Masse m berechnen

$$m = \frac{Q \cdot B \cdot r}{v} \quad (2.3)$$

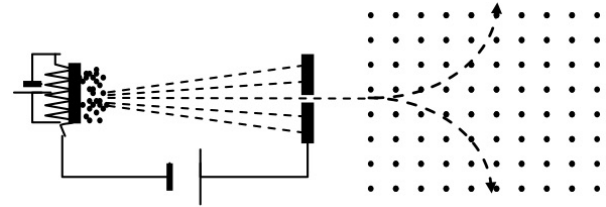


Kennt man die Ladung des Teilchens nicht, so kann man lediglich die spezifische Ladung $\frac{Q}{m}$ berechnen

$$\frac{Q}{m} = \frac{v}{B \cdot r} \quad (2.4)$$

2.1.2 Beschleunigung im Kondensator und Ablenkung im Magnetfeld

Die Abbildung zeigt einen Kondensator. Die linke Platte ist negativ geladen mit U_- und wird durch einen zweiten Stromkreis geheizt, so dass aus dem Metall Elektronen austreten. Man nennt diese Platte auch Glühkathode. Die Elektronen werden im elektrischen Feld des Kondensators durch die Spannung $\Delta U = U_+ - U_-$ nach rechts beschleunigt. In der rechten positiven Platte (auch Anode genannt) mit U_+ ist ein Öffnung, so dass die Elektronen hindurch fliegen können. Hinter der Öffnung treten sie in ein magnetisches Feld B ein und werden durch die Lorentzkraft auf eine Kreisbahn abgelenkt.



Wir untersuchen diese Anordnung in zwei Schritten:

- 1) der Kondensator und seine Beschleunigung (dient als Geschwindigkeitsfilter)

Wir können die Geschwindigkeit der Elektronen durch den Energieerhaltungssatz berechnen:

$$\Delta W_{\text{ges}} = \Delta W_{\text{kin}} + \Delta W_{\text{pot}} = 0 \quad (2.5)$$

für die kinetische Energie gilt

$$\Delta W_{\text{kin}} = \frac{m_e \cdot v_E^2}{2} - \frac{m_e \cdot v_A^2}{2} = + \frac{m_e \cdot v^2}{2} \quad (2.6)$$

und für die potentielle Energie gilt

$$\Delta W_{\text{pot}} = Q_e \cdot (U_E - U_A) = Q_e \cdot (U_+ - U_-) = Q_e \cdot \Delta U \quad (2.7)$$

Daraus ergibt sich

- 2) das Magnetfeld und seine Ablenkung:

Das Magnetfeld führt zu einer kreisförmigen Ablenkung der Elektronen. Die Richtung der Bahn wird durch die Linke-Hand-Regel bestimmt, da es sich um negative Teilchen handelt.

x Die Größe der Lorentzkraft ist gegeben durch

$$F_L = Q_e \cdot v \cdot B = Q_e \cdot \sqrt{\frac{-2 \cdot Q_e \cdot \Delta U}{m_e}} \cdot B \quad (2.8)$$

und der Radius der Kreisbahn ergibt sich als

$$r = \frac{m_e \cdot v}{Q_e \cdot B} = \sqrt{\frac{-2 \cdot \Delta U \cdot m_e}{Q_e \cdot B^2}} \quad (2.9)$$

Beispiel (2.1)

Elektronen werden durch einen Kondensator mit der Spannung von $U = 45 \text{ V}$ beschleunigt und dann durch ein Magnetfeld der Stärke $B = 0,001 \text{ T}$ abgelenkt.

- a) Welche Geschwindigkeit erreichen die Elektronen beim Durchgang durch die positive Platte des Kondensators?
- b) In welche Richtung werden die Elektronen im Magnetfeld abgelenkt? Wie verändert sich dadurch die Bahn?
- c) Wie groß ist der Radius der Bahn?

Lösung

a) die Geschwindigkeit ergibt sich aus der Energieerhaltung

$$\frac{m_e \cdot v^2}{2} + Q_e \cdot \Delta U = 0$$

$$v = \sqrt{\frac{-2 \cdot Q_e \cdot \Delta U}{m_e}} = \sqrt{\frac{-2 \cdot (-1,6) \cdot 10^{-19} \cdot 45}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 4 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

b) Die Elektronen beschreiben den oberen Kreis in der Abbildung (Linke-Hand-Regel).

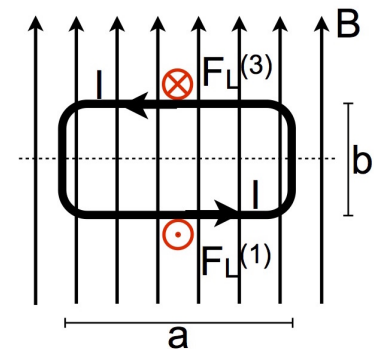
c) der Bahnradius ist

$$r = \frac{m_e \cdot v}{Q_e \cdot B} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 4 \cdot 10^6}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,001} = 2,275 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

2.2 Der magnetische Dipol**2.2.1 Das magnetische Dipolmoment****Einfache Ableitung**

Eine geschlossene Leiterschleife (Rechteck mit den Abmessungen a und b) steht parallel zum Magnetfeld B . In der Schleife kreist ein Strom I . Auf die vier Seiten des Leiters wirkt nun jeweils die Lorentzkraft:

- $F_L^{(1)} = a \cdot I \cdot B$
wirkt auf die untere Seite der Schleife und zeigt nach vorne
- $F_L^{(2)} = 0$
wirkt auf die rechte Seite der Schleife und ist gleich null
- $F_L^{(3)} = a \cdot I \cdot B$
wirkt auf die obere Seite der Schleife und zeigt nach hinten
- $F_L^{(4)} = 0$
wirkt auf die linke Seite der Schleife und ist gleich null



Die beiden Kräfte $F_L^{(1)}$ und $F_L^{(3)}$ bewirken eine Drehung der Schleife um die gestrichelte Linie (Drehachse). Wir können das Drehmoment auf die Schleife berechnen:

$$T_{\text{ges}} = T_1 + T_3 = \frac{b}{2} \cdot F_L^{(1)} + \frac{b}{2} \cdot F_L^{(3)} = b \cdot a \cdot I \cdot B = A \cdot I \cdot B = \mu \cdot B \quad (2.10)$$

dabei führen wir eine neue Größe ein, das magnetische Dipolmoment $\mu = A \cdot I$.

Jede Fläche A mit einem Umlaufstrom I bildet einen magnetischen Dipol. Die Stärke des Dipols wird durch das magnetische Dipolmoment μ beschrieben und ist gegeben durch

$$\mu = A \cdot I \quad (2.11)$$

Das magnetische Dipolmoment ist eigentlich ein Vektor, der normal auf die Fläche A steht und dessen Richtung durch die Rechte-Hand-Schrauben-Regel bestimmt wird (gekrümmte Finger in Richtung von I , Daumen in Richtung von μ).

Einheit:

$$[\mu] = [A \cdot I] = \text{m}^2 \cdot \text{A}$$

Allgemeine Ableitung

Gegeben ist ein geschlossener rechteckiger Leiter (Länge a , Breite $2b$, Fläche $A = 2ab$) in einem Magnetfeld B . In diesem Leiter "kreist" ein Strom I . Der Winkel zwischen dem Flächenvektor \vec{A} und dem Feld B ist α , d.h. der Winkel zwischen der Leiterfläche und dem Magnetfeld ist $90^\circ - \alpha$.

Auf die vier Seiten des Rechtecks wirken vier Kräfte: F_2 (nach hinten) und F_4 (nach vorne) sind entgegengesetzt gleich und in derselben Ebene. Sie heben sich daher gegenseitig auf.

F_1 und F_3 sind entgegengesetzt gleich aber nicht in derselben Ebene.

Jede dieser Kräfte erzeugt ein Drehmoment T , so daß sich der rechteckige Leiter im B -Feld um die gestrichelte Achse dreht. Das Drehmoment ist gegeben als Kraftarm mal Kraft.

Wir berechnen das gesamte Drehmoment:

$$T_{\text{ges}} = T_1 + T_3 = b \cdot \sin \alpha \cdot a \cdot I \cdot B + b \cdot \sin \alpha \cdot a \cdot I \cdot B = 2b \cdot \sin \alpha \cdot a \cdot I \cdot B = A \cdot I \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Das gesamte Drehmoment ist also gegeben als:

$$T_{\text{ges}} = A \cdot I \cdot B \cdot \sin \alpha = \mu \cdot B \cdot \sin \alpha \quad (2.12)$$

2.2.2 Drehmoment und magnetisches Dipolmoment

Das Drehmoment eines stromdurchflossenen geschlossenen Leiters mit der Fläche A und dem Umlaufstrom I in einem Magnetfeld B kann damit sehr einfach durch das magnetische Dipolmoment $\mu = A \cdot I$ dargestellt werden:

$$T = \mu \cdot B \cdot \sin \alpha \quad (2.13)$$

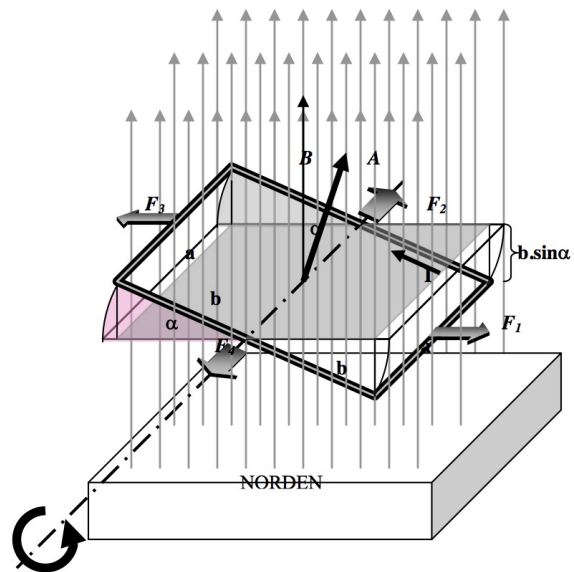
wobei α der Winkel zwischen μ und B ist.

Eigentlich ist das Drehmoment ein Vektor und es gilt $\vec{T} = \vec{\mu} \times \vec{B}$ (Vektorprodukt zwischen $\vec{\mu}$ und \vec{B}). Ein Dipolmoment μ dreht sich in einem magnetischen Feld B und zwar so lange, bis der Vektor des Dipolmoments $\vec{\mu}$ parallel zum Magnetfeld \vec{B} ausgerichtet ist. Die Drehrichtung des Dipolmoments ist so, daß sich der Vektor $\vec{\mu}$ um den jeweils kleineren Winkel parallel zum Magnetfeld \vec{B} dreht. Gemeinsam mit dem Dipolmoment dreht sich dann natürlich auch die Fläche A und zwar so lange, bis sie normal zu den Feldlinien von B steht.

Ein magnetischer Dipol dreht sich im Magnetfeld so lange bis seine Ausrichtung parallel zum Feld ist mit dem Drehmoment

$$T = \mu \cdot B \cdot \sin \alpha \quad (2.14)$$

wobei α der Winkel zwischen μ und B ist.



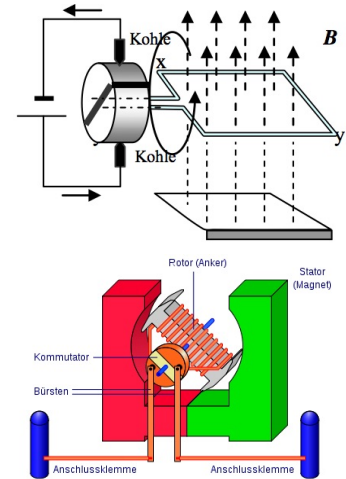
2.3 Der Gleichstrommotor

2.3.1 Der prinzipielle Aufbau des Motors

Der Gleichstrommotor verwandelt elektrische Energie in Bewegungsenergie.

Der Gleichstrommotor ist nichts anderes als ein magnetischer Dipol: Eine Leiterschleife mit Umlaufstrom in einem Magnetfeld. Um den Strom in die Schleife einzuspeisen verwendet man einen sogenannten Kommutator (auch Kollektor genannt). Das sind zwei Hälften eines leitenden Rades, die durch eine Isolierschicht getrennt sind. Die äußere Stromquelle speist den Strom über zwei Kohlestäbe in den Kommutator. Die beiden Enden der Leiterschleife sind mit je einer Hälfte des Kommutators verbunden. Dadurch verhindert man, daß sich die Schleife wieder zurück dreht, wenn sie den "Totpunkt" überschreitet. Die Schleife dreht sich also immer in dieselbe Richtung.

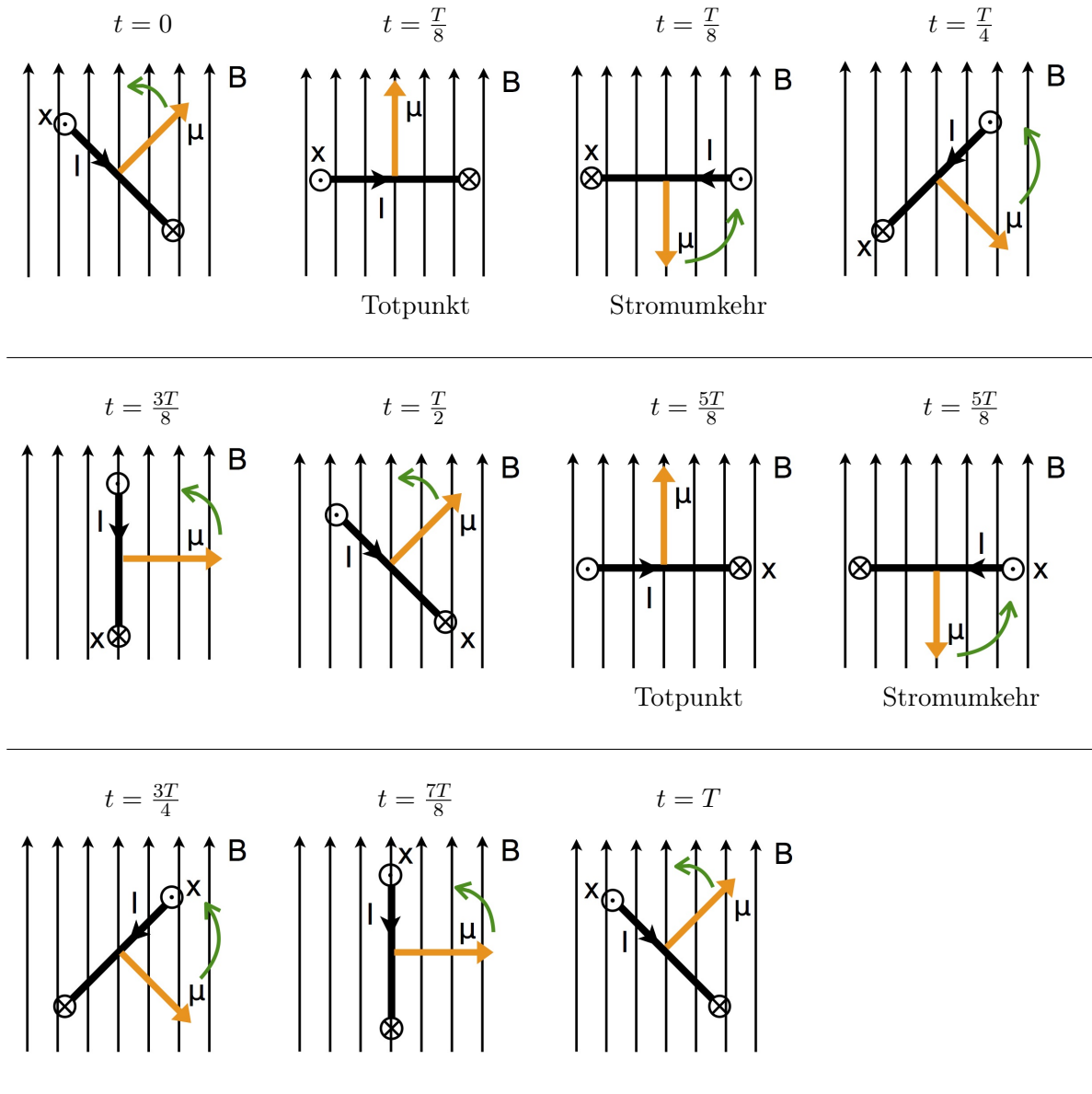
Meist wird die einzelne Leiterschleife durch eine Spule ersetzt. Das sind einfach mehrere Leiterschleifen hintereinander, die vom selben Strom I durchflossen werden.



2.3.2 Die einzelnen Phasen der Rotation

Wir betrachten eine Leiterschleife mit Umlaufstrom I im Magnetfeld B , die sich dreht. Ein Punkt der Leiterschleife ist mit X gekennzeichnet, damit man die volle Umdrehung der Schleife besser verfolgen kann. Am sogenannten Totpunkt würde die Schleife keine weitere Drehbewegung ausführen, da das magnetische Dipolmoment parallel zum Magnetfeld steht. Daher dreht man die Stromrichtung in der Schleife einfach um und die Drehbewegung wird von neuem ausgeführt.

Die volle Umdrehung dauert die Zeit T und wir zerlegen diese Periode T in kleinere Schritte.



2.4 Der elektrische Dipol

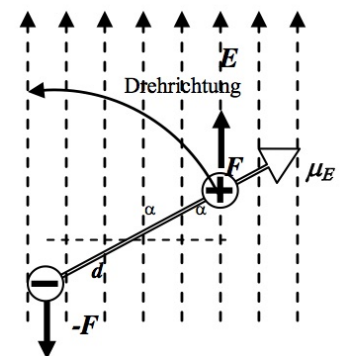
Es gibt nicht nur einen magnetischen Dipol sondern auch einen elektrischen Dipol.

Der Elektrische Dipol besteht aus zwei entgegengesetzten Ladungen $\pm Q$ in einem festen Abstand d . Seine Größe ist gegeben durch

$$\mu_e = Q \cdot d \tag{2.15}$$

Der Vektor \vec{d} zeigt.

Der elektrische Dipol ist ein Vektor, der von $-Q$ nach $+Q$ zeigt. Der elektrische Dipol μ_e richtet sich im elektrischen Feld E parallel zu \vec{E} aus, weil auf beide Ladungen die Coulomb-Kraft F_C in unterschiedliche Richtungen wirkt und der Dipol sich dadurch dreht. Das Drehmoment ist gegeben durch



$$T = F_C \cdot \frac{d}{2} \cdot \sin(180^\circ - \alpha) + F_C \cdot \frac{d}{2} \cdot \sin(180^\circ - \alpha) = F_C \cdot d \cdot \sin \alpha = Q \cdot E \cdot d \cdot \sin \alpha \tag{2.16}$$

Dies kann man mit dem elektrischen Dipolmoment auch schreiben als

$$T = \mu_e \cdot E \cdot \sin \alpha \quad (2.17)$$

oder vektoriell $\vec{T} = \vec{\mu}_e \times \vec{E}$.

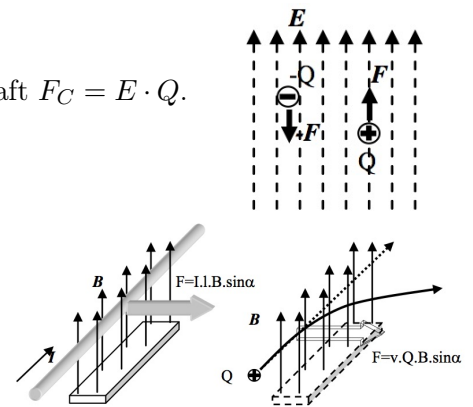
Wichtige Beispiele für einen elektrischen Dipol sind Moleküle, die einen positiven und einen negativen Teil haben, zum Beispiel Moleküle von Salzen. Sie können sich im elektrischen Feld drehen

2.5 Die Wirkung elektrischer und magnetischer Felder auf Ladungen

2.5.1 Wirkung auf Einzelladungen

Das elektrische Feld E wirkt auf Ladungen $\pm Q$ mit der Coulomb-Kraft $F_C = E \cdot Q$. Die Kraft wirkt in die Feldrichtung bzw. gegen die Feldrichtung.

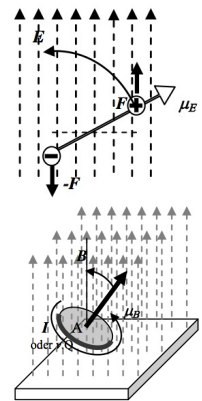
Das Magnetfeld B wirkt nur auf bewegte Ladungen (Ströme oder freie Bewegung) mit der Lorentz-Kraft $F_L = Q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$ bzw. $F_L = l \cdot I \cdot B \cdot \sin \alpha$. Die Kraft F_L ist immer normal zur Geschwindigkeit v und zum Magnetfeld B bzw. zum Strom I und B . Der Winkel α ist zwischen v und B bzw. zwischen I und B .



2.5.2 Wirkung auf Dipole

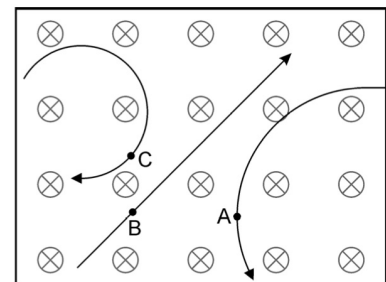
Der elektrische Dipol μ_E besteht aus zwei getrennten Ladungen $\pm Q$ im Abstand d . Er dreht sich im elektrischen Feld E , bis er parallel zum Feld steht. Das Drehmoment ist $T = \mu_E \cdot E \cdot \sin \alpha$, wobei der Winkel α zwischen μ_E und E ist.

Der magnetische Dipol μ_B besteht aus einer Fläche A mit einem Umlaufstrom I . Er dreht sich im magnetischen Feld B , bis er parallel zum Feld steht. Das Drehmoment ist $T = \mu_B \cdot B \cdot \sin \alpha$, wobei der Winkel α zwischen μ_B und B ist.



2.6 Aufgaben

- (2.1) Um die Bahnen von kleinsten Teilchen zu beobachten, kann eine Nebelkammer eingesetzt werden (hier als Rechteck dargestellt). Ein Magnetfeld durchdringt die ganze Nebelkammer und es steht senkrecht zur Papierebene. Drei verschiedene Teilchen A, B und C werden senkrecht zur Magnetfeldrichtung in die Nebelkammer eingeschossen und bewegen sich auf den gezeichneten Bahnen. Zeichnen Sie jeweils die auf das Teilchen wirkende Kraft ein und geben seine Ladungsart an! Wie heißt diese Kraft?



- (2.2) Elektronen und Protonen werden jeweils mit der Spannung $U = 1000$ V beschleunigt und fliegen danach von links kommend in ein homogenes Magnetfeld ($B = 20$ mT), das aus der Papierebene

heraus zeigt.

- In welche Richtung zeigt die auf die Teilchen wirkende Lorentzkraft F_L ?
- Wie verändert sich dadurch die Bahn der Teilchen? (Skizze!)
- Wie groß ist die Lorentzkraft F_L in beiden Fällen?

(2.3) Protonen werden in einem homogenen elektrischen Feld eines Plattenkondensators mit der Spannung $U = 20$ kV beschleunigt und dann durch ein senkrecht zur Flugrichtung gerichtetes Magnetfeld mit der Flussdichte $B = 0,2$ T auf eine Kreisbahn gelenkt. Berechnen Sie den Radius der Kreisbahn!

(2.4) Elektronen werden mit der Geschwindigkeit $v = \text{const}$ im rechten Winkel in ein Magnetfeld $B = 1$ mT geschossen. Die Elektronen werden auf eine Kreisbahn mit dem Radius $r = 0,6$ m abgelenkt.

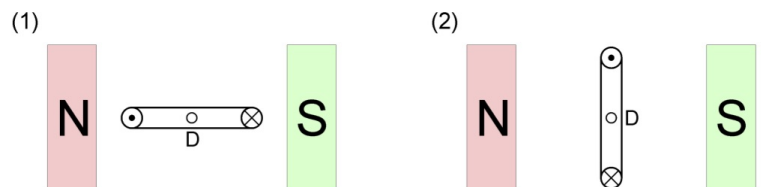
- Berechnen Sie die Geschwindigkeit v der Elektronen!
- Wie groß ist die kinetische Energie der Elektronen? (Antwort in Joule und eV)

(2.5) Ein Elektron fliegt mit $v = 4000$ m/s in ein homogenes Magnetfeld $B = 0,2$ T, das normal zur Flugrichtung verläuft.

- Berechnen Sie den Radius seiner Kreisbahn!
- Was geschieht, wenn das Magnetfeld B parallel zu v verläuft?

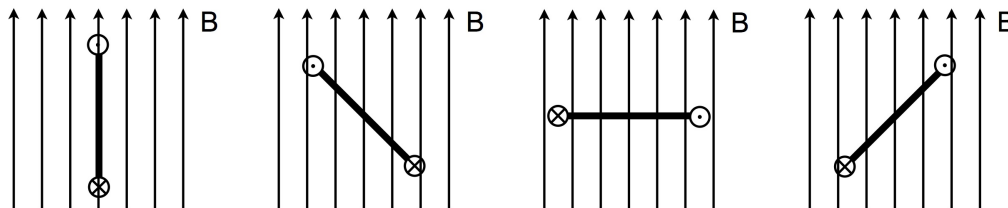
(2.6) In einem Magnetfeld befindet sich eine Leiterschleife.

- Welche beiden Bedingungen müssen erfüllt sein, damit auf die Leiterschleife eine Kraft wirkt, die zu einer Drehbewegung der Leiterschleife führt?



- Zeichnen Sie in beide Abbildungen jeweils die Kräfte auf die Leiterschleife ein, wenn ein Gleichstrom fließt. Geben Sie auch die Drehrichtung der Leiterschleife an!
- Welche der beiden Abbildungen (1) oder (2) stellt den sogenannten Totpunkt dar?

(2.7) Zeichnen Sie in den abgebildeten Elektromotoren die Stromrichtung, das magnetische Dipolmoment und die Drehrichtung der Schleife ein!



(2.8) Eine Leiterschleife hat die Fläche $A = 20$ cm², den Umlaufstrom $I = 3$ A. Berechnen Sie das Drehmoment auf diese Schleife im Magnetfeld $B = 0,3$ T, wenn die Schleife

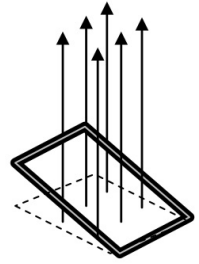
- parallel zum Feld steht!
- normal zum Feld steht?
- mit dem Feld einen Winkel $\beta = 60^\circ$ bildet.

(2.9) Gegeben sei ein elektrischer Stromkreis in Form eines Rechtecks ($a = 20$ cm, $b = 8$ cm, $I = 2$ A) Parallel zum Stromkreis verläuft ein Magnetfeld $B = 0,5$ T.

- In welche Richtung dreht sich das Rechteck?
- In welche Richtung dreht sich das Rechteck, wenn das Magnetfeld normal zum Rechteck steht?

(2.10) Das abgebildete Rechteck hat die Fläche $A = 30 \text{ cm}^2$, der Umlaufstrom beträgt $I = 20 \text{ A}$, das Magnetfeld ist $B = 4 \text{ T}$ und der Winkel zwischen Feld und Rechteck beträgt 60°

- Welche Richtung muß der Umlaufstrom haben, damit sich die Schleife parallel zur gestrichelten Fläche dreht?
- Wie groß ist das magnetische Dipolmoment?
- Wie groß ist das Drehmoment?



(2.11) a) Welches Feld wirkt nur auf bewegte Ladungen? In welche Richtung?
 b) Welches Feld wirkt auf bewegte und auf ruhende Ladungen? In welche Richtung?
 c) Wozu ist die Kraft auf eine bewegte Ladung im Magnetfeld proportional?

(2.12) a) Was versteht man unter einem elektrischen Dipol.
 b) In welchem Feld macht er welche Bewegung?
 c) In welche Richtung?

(2.13) a) Was versteht man unter einem magnetischen Dipol.
 b) In welchem Feld macht er welche Bewegung?
 c) In welche Richtung?

(2.14) a) Nennen Sie Anwendungen des magnetischen Dipols!
 b) Nennen Sie ein Beispiel für einen elektrischen Dipol!

3 Jeder Strom erzeugt ein Magnetfeld

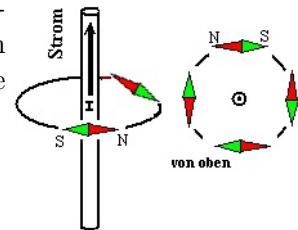
Der dänische Physiker Hans-Christian Oersted (1777 - 1851) entdeckte durch Zufall 1820, dass ein stromdurchflossener Leiter eine danebenliegende Kompassnadel ablenkt. Damit war klar, dass es einen Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus gibt.

3.1 Das Feld eines geradlinigen Leiters

Der Strom I fließt im abgebildeten Leiter geradlinig nach oben. Man stellt in der Umgebung des Leiters einige Magnetnadeln (Kompass) auf. Normalerweise zeigen solche Nadeln wegen des erdmagnetischen Felds immer in Nord-Süd-Richtung. Hier zeigen sie in Richtung der Tangente an einen Kreis, dessen Achse der Strom I ist. Magnetfelder lassen sich also auch durch elektrische Ströme erzeugen.

Es gilt allgemein:

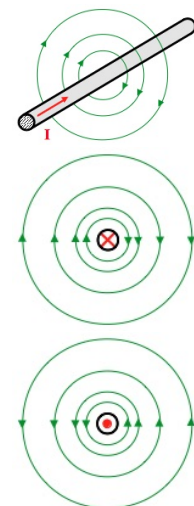
Jeder Strom in einem geradlinigen Leiter erzeugt ein Magnetfeld.
Es umgibt den Leiter kreisförmig.



Richtung des Magnetfeldes

Die Feldlinien verlaufen kreisförmig in geschlossenen Bahnen normal zum Strom. Die Orientierung der Feldlinien hängt von der Stromrichtung ab. Der Strom I läuft senkrecht in die Papierebene hinein. B ist im Uhrzeigersinn gerichtet. Der Strom I kommt senkrecht aus der Papierebene heraus. B läuft gegen den Uhrzeigersinn. Die Richtung des B -Feldes kann durch die "Rechte-Hand-Schrauben-Regel" bestimmt werden:

Daumen ... Strom I , gekrümmte Finger ... Magnetfeld B



Stärke des Magnetfeldes

Die Stärke des Magnetfeldes nimmt mit dem Abstand vom Leiter ab. In der Nähe des Leiters ist das B -Feld sehr stark, und nimmt mit dem Abstand vom Leiter ab. Das magnetische Feld eines sehr langen geradlinigen Leiters im Abstand r ist umgekehrt proportional zum Abstand. Wenn der Abstand r vom Leiter viel kleiner als seine Länge ist ($r \ll l$), so gilt:

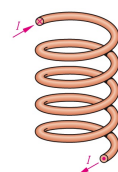
$$B_r = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r} \quad (3.1)$$

Dabei ist μ_0 eine Konstante für das magnetische Feld, ähnlich wie ϵ_0 beim elektrischen Feld. Die Konstante μ_0 heißt magnetische Permeabilitätskonstante im Vakuum oder Induktionskonstante. Es ist: $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$

3.2 Das Magnetfeld einer Spule

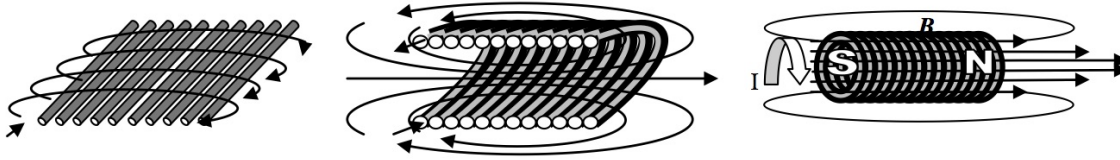
Eine Spule ist ein Leiter, der (meist) kreisförmig aufgewickelt wird. Die Spule ist bestimmt durch ihre Länge l , ihren Radius r (oder ihre Fläche A) und die Anzahl der Windungen. Sie wird von einem Strom der Stärke I durchflossen.

Wir wissen, dass der gerade Leiter von einem kreisförmigen Magnetfeld umgeben ist. Legt man nun mehrere Leiter nebeneinander und biegt diese Leiter dann zu ein Halbkreis zusammen und schließt sodann die einzelnen Leiter zu Kreisen, so erhält man im Inneren



dieser nebeneinander liegenden Leiterschleifen ein homogenes Magnetfeld. Außen ist das Feld ähnlich dem Feld eines Stabmagneten mit zwei Polen.

In den folgenden Bildern wird graphisch erklärt wie man vom einfachen Leiter und dessen Magnetfeld zur Spule und dem entsprechenden homogenen Magnetfeld kommt.



Im Inneren einer langen, dünnen Spule entsteht ein homogenes Magnetfeld. Wenn der Radius r einer Spule sehr klein ist im Vergleich zur Länge l der Spule ist ($r \ll l$), gilt:

$$B_{\text{spule}} = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{\ell} \quad (3.2)$$

wobei N die Anzahl der Windungen, I der Strom und ℓ die Länge der Spule ist.

Die Richtung des Magnetfeldes kann durch die "Rechte-Hand-Schrauben-Regel" bestimmt werden: Daumen ... Magnetfeld B , gekrümmte Finger ... Strom I

3.3 Der Magnetische Fluss

Der magnetische Fluss Φ durch eine Fläche A gibt die Zahl der Feldlinien durch diese Fläche an. Es gilt:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A} = B \cdot A_n = B \cdot A \cdot \cos \varphi \quad (3.3)$$

wobei A der Normalvektor der Fläche A , A_n die Normalfläche von A und φ der Winkel zwischen A und A_n bzw. \vec{B} und \vec{A} ist.

Einheit:

$$[\Phi] = [\vec{B} \cdot \vec{A}] = \text{T} \cdot \text{m}^2 = \text{Wb} \quad \text{Weber}$$

Der Einheitenname Weber ist nach dem deutschen Physiker Wilhelm Eduard Weber (1804 - 1891) benannt.

3.4 Zusammenwirken mehrerer Magnetfelder

Genauso wie beim elektrischen Feld gilt auch beim Magnetfeld:

Die gesamte Wirkung mehrerer Magnetfelder ist gleich ihrer Vektorsumme.

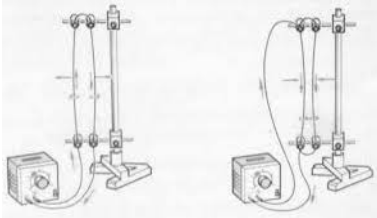
$$\vec{B}_{\text{ges}} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots \quad (3.4)$$

Bei den Flüssen addiert man wieder die Beträge:

$$\Phi_{\text{ges}} = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots \quad (3.5)$$

3.5 Die Wirkung von parallelen Strömen aufeinander

Versuch



Wenn man in einem Experiment durch zwei parallele Leiter Ströme schickt, die entweder beide dieselbe Richtung haben (parallele Ströme) oder beide entgegengesetzte Richtungen haben (antiparallele Ströme), so stellt man fest, dass im parallelen Fall die beiden Leiter eine anziehenden Kraft erfahren (rechtes Bild) und im antiparallelen Fall eine abstoßende Kraft (linkes Bild).

Erklärung

Zwei parallele Ströme I_1 und I_2 laufen im Abstand r in dieselbe Richtung. Der Strom I_1 erzeugt ein Magnetfeld B_1 am Ort vom Strom I_2 :

$$B_1 = \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2\pi \cdot r}$$

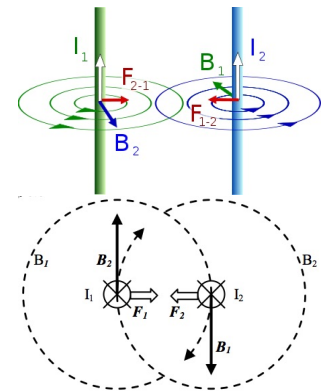
Dieses Magnetfeld bewirkt eine Lorentz-Kraft F_2 auf den Strom I_2

$$F_2 = \ell \cdot I_2 \cdot B_1 = \frac{\mu_0 \cdot \ell \cdot I_1 \cdot I_2}{2\pi \cdot r}$$

Wegen des dritten Axioms von Newton gibt es eine gleich große Gegenkraft

$$F_1 = -F_2 = -\frac{\mu_0 \cdot \ell \cdot I_1 \cdot I_2}{2\pi \cdot r}$$

Die beiden Leiter ziehen sich also an und zwar pro Meter Länge mit $|\frac{F}{\ell}| = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2}{2\pi \cdot r}$. Wenn die beiden Ströme antiparallel sind, so bleibt die Berechnung der Kraft dieselbe, es ändern sich nur die Richtungen im Bild.



Parallele Ströme ziehen sich an, antiparallele Ströme stoßen sich ab. Die Kraft pro Länge des Leiters beträgt

$$|\frac{F}{\ell}| = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2}{2\pi \cdot r} \quad (3.6)$$

wobei I_1 und I_2 die beiden Ströme im Abstand r sind.

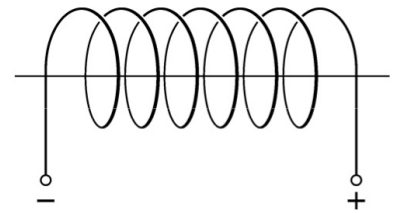
Neudefinition der Stromstärke Ampere

Wenn $I_1 = I_2 = 1 \text{ A}$ und $r = 1 \text{ m}$ ist, so beträgt die Anziehungskraft pro Meter Länge $|F| = \frac{\mu_0}{2\pi}$. Damit kann man die Stromstärke neu definieren, indem man es auf eine Kraftmessung zurückführt.

Ein Strom hat die Stromstärke $I = 1 \text{ A}$, wenn er im Abstand $r = 1 \text{ m}$ auf einen gleich starken, parallelen Strom pro Meter Länge die Kraft $|F| = \frac{\mu_0}{2\pi}$ ausübt.

3.6 Aufgaben

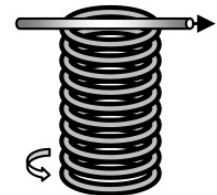
- (3.1) Zu welchen Größen ist das Magnetfeld eines langen geradlinigen Stroms proportional, zu welchen Größen ist sie umgekehrt proportional? Unter welcher Bedingung gilt dies nur?
- (3.2) Wir blicken genau in Richtung des Stroms eines langen geradlinigen Leiters.
 a) Welche Form hat das Magnetfeld?
 b) In welche Richtung zeigt es oberhalb des Leiters bzw. links vom Leiter?
- (3.3) Unter welchen Bedingungen ist das Magnetfeld im Inneren einer Spule homogen? Wozu ist es proportional? Wozu ist es umgekehrt proportional?
- (3.4) a) Zeichnen Sie das Feldlinienbild einer stromdurchflossenen Spule. Wie verlaufen die Feldlinien im Inneren und außerhalb der Spule?
 b) Mit welcher Regel wird die Richtung des Magnetfeldes einer stromdurchflossenen Spule in Abhängigkeit von der Stromrichtung bestimmt?
 c) Wovon hängt die Stärke des Magnetfeldes der Spule ab?



- (3.5) Eine Spule mit Durchmesser $d = 6$ cm und Länge $l = 20$ cm hat 4000 Windungen wird von einem Strom $I = 50$ mA durchflossen. Bestimmen Sie das Magnetfeld im Inneren!

- (3.6) Sie blicken in Richtung der Achse einer Spule. Der Strom läuft dann für Sie im Uhrzeigersinn durch die Windungen. Befinden Sie sich auf der Nordpolseite oder der Südpolseite der Spule?

- (3.7) Die abgebildete Spule ist an ihrem Ort befestigt. Sie hat den Radius $r = 5$ cm und die Länge $l = 20$ cm. Der Spulenstrom beträgt $I_{\text{spule}} = 2$ A und fließt in die eingezeichnete Richtung. Auf der Spule liegt frei beweglich ein isolierter Leiter, in welchem der Strom $I_{\text{leiter}} = 20$ A fließt.



- a) Bestimmen Sie Betrag und Richtung des Magnetfeldes der Spule!
 b) Bestimmen Sie Betrag und Richtung der Lorentz-Kraft, mit welcher der Leiter abgelenkt wird!

- (3.8) Berechnen sie den magnetischen Fluss Φ einer Spule mit kreisförmigem Querschnitt, durch die ein Strom der Stärke $I = 1,5$ A fließt. Die Spule hat die Länge $l = 65$ cm, den Radius $r = 3,5$ cm und $N = 1500$ Windungen.

- (3.9) Gegeben sind zwei parallele Ströme im Abstand $r = 20$ cm mit $I_1 = 10$ A und $I_2 = 30$ A.

- a) Wie groß ist das Magnetfeld, welches I_1 im zweiten Leiter erzeugt?
 b) Wie groß ist das Magnetfeld, welches I_2 im ersten Leiter erzeugt?
 c) Mit welcher Kraft ziehen sich die Ströme an?
 d) In welchem Abstand x von I_1 ist das gesamte Magnetfeld beider Ströme gleich Null?

- (3.10) Gegeben sind zwei antiparallele Ströme im Abstand $r = 40$ cm mit $I_1 = 10$ A und $I_2 = 30$ A.

- a) Wie groß ist das Magnetfeld, welches I_1 im zweiten Leiter erzeugt?
 b) Wie groß ist das Magnetfeld, welches I_2 im ersten Leiter erzeugt?
 c) Mit welcher Kraft stoßen sich die Ströme ab?
 d) Wie groß ist das gesamte Magnetfeld beider Ströme genau in der Mitte zwischen den Leitern?
 e) Wie groß ist das gesamte Magnetfeld beider Ströme im Abstand von 10 cm außerhalb von I_1 ?

- (3.11) Wie müssen zwei Ströme fließen, damit sie sich abstoßen?

- (3.12) Die “Rechte-Hand-Schrauben-Regel” kommt in diesem Kapitel zweimal vor.
- Bei welchen Problemen?
 - Welche Größe wird jeweils durch den Daumen und durch die gekrümmten Finger dargestellt?
- (3.13) Geben Sie eine Definition für die Einheit 1 Coulomb:
- nach dem Coulomb’schen Gesetz.
 - mit Hilfe der neuen Definition von 1 Ampere.

4 Induktionsgesetz

4.1 Die elektromotorische Kraft

Es gibt Systeme, in denen ein elektrischer Strom einen vollen Kreis beschreibt und nicht in einem Punkt A beginnt und in einem Punkt B endet. Hier gibt es Probleme mit der Unabhängigkeit der Spannung vom Weg. Ein Leiter, der einen Strom im Kreis fließen lässt heißt Leiterschleife. Angenommen, der Widerstand der gesamten abgebildeten Leiterschleife ist $R = 200 \Omega$ und der Strom in ihr ist $I = 5 \text{ A}$. Dann gilt ${}_A U_A = 0 \text{ V}$ und zugleich ${}_A U_A = R \cdot I = 1000 \text{ V}$.

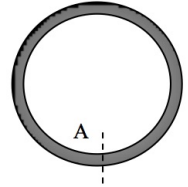
In der Leiterschleife gibt es die Elektromotorische Kraft $EMK = 1000 \text{ V}$, die diesen Strom verursacht und es ist analog zur Spannung:

$$EMK = -E \cdot \Delta s \quad (4.1)$$

dabei ist E das elektrische Feld und Δs ist die Länge der gesamten Schleife. Es gilt jetzt:

$${}_A U_A - EMK = 0 \quad (4.2)$$

Statt Elektromotorische Kraft verwendet man oft den Ausdruck Induktionsspannung U_{ind} .



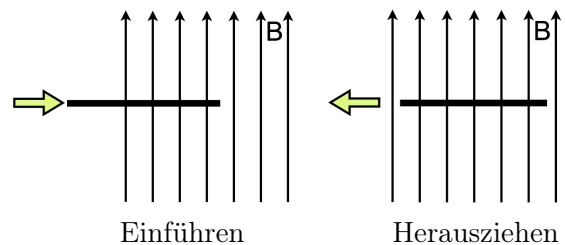
4.2 Das Induktionsgesetz

4.2.1 Ableitung des Induktionsgesetzes

Wir betrachten eine Leiterschleife in einem (homogenen) Magnetfeld.

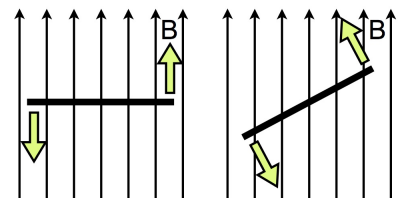
Versuch 1: Leiterschleife ins Feld einführen und wieder herausziehen

Die Leiterschleife in der Abbildung wird ins Magnetfeld B hinein gebracht. Dadurch stellt man fest, dass in der Leiterschleife eine Spannung entsteht und ein Strom fließt. Wenn man die Schleife wieder aus dem Magnetfeld herauszieht, so ergibt sich ebenfalls eine Spannung. Die Spannung entsteht aber nur so lange, wie eine Bewegung der Schleife statt findet. Wenn die Schleife in Ruhe ist, so entsteht keine Spannung.



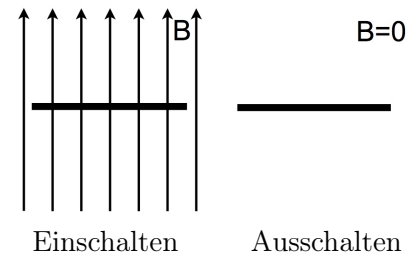
Versuch 2: Leiterschleife im Feld drehen

Die Leiterschleife in der Abbildung wird im Magnetfeld B (gegen den Uhrzeigersinn) gedreht. Dadurch stellt man fest, dass in der Leiterschleife eine Spannung entsteht und ein Strom fließt. Die Spannung entsteht aber nur so lange, wie eine Bewegung der Schleife statt findet. Wenn die Schleife in Ruhe ist, so entsteht keine Spannung.



Versuch 3: Magnetfeld einschalten und ausschalten

Die Leiterschleife in der Abbildung befindet sich im Magnetfeld B . Dann wird das Magnetfeld ausgeschaltet, sodass $B = 0$. Dadurch stellt man fest, dass in der Leiterschleife eine Spannung entsteht und ein Strom fließt. Wenn das Magnetfeld wieder eingeschaltet wird, entsteht ebenfalls eine Spannung. Die Spannung entsteht aber nur, wenn sich das Magnetfeld verändert. Wenn das Magnetfeld konstant bleibt, so entsteht keine Spannung.



Ergebnis der Versuche – das Induktionsgesetz

Allen drei Versuchen ist gemeinsam, dass eine Spannung in der Leiterschleife entsteht, wenn sich etwas ändert. Diese Änderung bezieht sich auf den magnetischen Fluss $\Phi = B \cdot A_n$, wobei B das Magnetfeld und A_n die projizierte Normalfläche normal auf die Feldlinien ist.

Das Induktionsgesetz lautet:

Wenn sich in einer Leiterschleife der magnetische Fluss Φ ändert, so entsteht in der Schleife eine Induktionsspannung U_{ind}

$$U_{\text{ind}} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (4.3)$$

Die Flussänderung $\Delta \Phi$ kann nun entweder durch eine Änderung der Fläche A_n erreicht werden (Versuch 1 und 2) oder durch eine Änderung des Magnetfeldes (Versuch 3) (oder beides)

$$\Delta \Phi = \begin{cases} B \cdot \Delta A_n & \text{Versuch 1 und 2} \\ \Delta B \cdot A_n & \text{Versuch 3} \end{cases} \quad (4.4)$$

Auf welche Art der Fluss geändert wird, ist für das Entstehen der Induktionsspannung nicht wichtig. Je größer die Änderungsrate des magnetischen Fluss ist (d.h. je schneller sich die Gesamtzahl der Feldlinien verändert), desto größer ist die induzierte Spannung.

Der Strom, der in der Schleife entsteht, heißt Induktionsstrom I_{ind} . Man sagt auch der Strom wird induziert. Die Größe des Induktionsstromes hängt vom Widerstand R der Schleife ab

$$I_{\text{ind}} = \frac{U_{\text{ind}}}{R} \quad (4.5)$$

Die Richtung des Induktionsstromes kann durch die Schrauben-Regel bestimmt werden. Es gilt:

Daumen ... Magnetfeld B gekrümmte Finger ... Induktionsstrom I_{ind}

Man verwendet die rechte Hand, wenn $U_{\text{ind}} > 0$ und die linke Hand, wenn $U_{\text{ind}} < 0$.

4.2.2 Induktionsspannung und Lorentzkraft

Auf einem U-förmig gebogenen, links offenen Leiterstück liegt frei beweglich ein geradliniger Leiter mit der Länge l . Die ganze Anordnung befindet sich in einem Magnetfeld B , das senkrecht in die Papierebene hinein zeigt.

Wenn man den geradlinigen Leiter mit der Geschwindigkeit $v = \text{const}$ nach rechts bewegt, so braucht man dazu eine Kraft $F_{\text{ges}} = F_{\text{Reibung}} + F$, die größer als die Reibung ist und außerdem von v abhängt.

Zusätzlich entsteht in den beiden Leiterstücken ein konstanter Strom I im Uhrzeigersinn.

Nach dem 1. Axiom von Newton sollte man für die gleichförmige Bewegung des geraden Leiters keine Kraft (außer der Reibung) brauchen. Es muß daher in diesem Fall eine Gegenkraft $-F$ geben. Diese entsteht auf folgende Weise:

Im Leiter befinden sich Ladungen, sagen wir, positive. Wenn der Leiter mit v nach rechts bewegt wird, werden diese Ladungen von der Lorentzkraft $F_L = v \cdot Q \cdot B$ nach oben gezogen. Es entsteht im Leiterkreis ein Strom I im Uhrzeigersinn. Auf diesen Strom I wirkt nun neuerlich eine Lorentzkraft nach links. Dies ist die Gegenkraft $-F$ wobei $F = l \cdot I \cdot B$ ist. Um die Spannung zu bestimmen setzen wir die elektrische Leistung $P_{\text{el}} = U \cdot I$ mit der mechanischen Leistung $P_{\text{mech}} = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{-F \cdot \Delta s}{\Delta t}$ gleich

$$U \cdot I = -\frac{F \cdot \Delta s}{\Delta t} = -\frac{l \cdot I \cdot B \cdot \Delta s}{\Delta t} = -I \cdot B \cdot \frac{l \cdot \Delta s}{\Delta t} = -I \cdot B \cdot l \cdot v = -I \cdot B \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t} = -I \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

und damit ergibt sich

$$U_{\text{ind}} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -B \cdot l \cdot v \quad (4.6)$$

Der magnetische Flussänderung ist hier $\Delta \Phi = B \cdot \Delta A = B \cdot l \cdot \Delta s = B \cdot l \cdot v \cdot \Delta t$.

Wenn die Fläche größer wird ($\Delta A > 0$), so wird auch der Fluss größer ($\Delta \Phi > 0$) und die Induktionsspannung ist negativ $U_{\text{ind}} < 0$ und die Richtung des Induktionsstromes I_{ind} wird mit der linken Hand bestimmt.

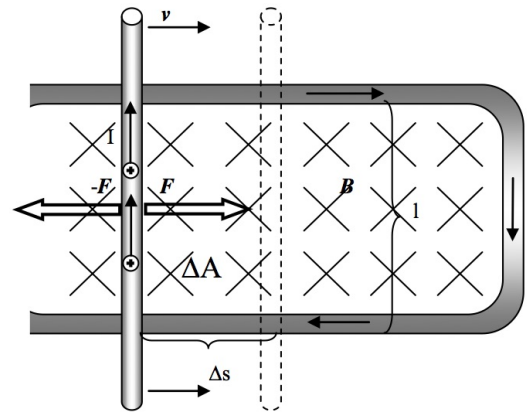
Wenn die Fläche kleiner wird ($\Delta A < 0$), so wird auch der Fluss kleiner ($\Delta \Phi < 0$) und die Induktionsspannung ist positiv $U_{\text{ind}} > 0$ und die Richtung des Induktionsstromes I_{ind} wird mit der rechten Hand bestimmt.

4.3 Gegenseitige Induktivität (Gegeninduktivität)

4.3.1 Herleitung

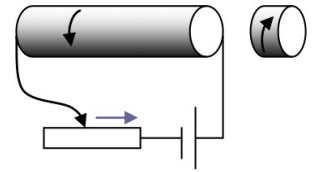
Gegeben sind zwei Spulen. Es gibt keine leitende Verbindung zwischen ihnen, so daß kein Strom von einer Spule auf die andere fließen kann. Spule 1 hat die Länge l_1 , den Durchmesser $2r_1$ und die Windungszahl N_1 , Spule 2 hat die Länge l_2 , den Durchmesser $2r_2$ und die Windungszahl N_2 .

Spule 1 ist an eine Spannungsversorgung angeschlossen und es fließt ein Strom I_1 . Mit Hilfe eines variablen Widerstandes (Schiebewiderstand) kann der Spulenstrom I_1 verändert werden. Spule 2 hat keine Stromquelle.

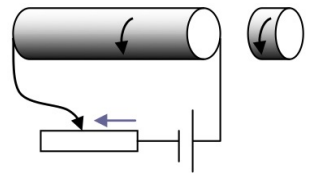


Versuch 1

Wir schieben den Leiter (Pfeil) am Schiebewiderstand nach rechts, so daß R immer kleiner wird: der Spulenstrom I_1 steigt. Dadurch wird auch das Magnetfeld stärker und auch durch die Spule 2 steigt der magnetische Fluß. Nach dem Induktionsgesetz entsteht in Spule 2 ein neuer Induktionsstrom I_2 . Nach der Linken-Hand-Schraubenregel hat dieser Strom die Gegenrichtung von I_1 .

**Versuch 2**

Wir schieben den Leiter (Pfeil) am Schiebewiderstand nach links, so daß R immer größer wird: der Spulenstrom I_1 sinkt. Dadurch wird auch das Magnetfeld schwächer und auch durch die Spule 2 sinkt der magnetische Fluß. Nach dem Induktionsgesetz entsteht in Spule 2 ein neuer Induktionsstrom I_2 . Nach der Rechten-Hand-Schraubenregel hat dieser Strom dieselbe Richtung wie I_1 .



Wenn in einer Spule ein Strom I_1 steigt, so entsteht in einer Nachbarspule ein Induktionsstrom I_2 in Gegenrichtung. Wenn in einer Spule ein Strom I_1 sinkt, so entsteht in einer Nachbarspule ein Induktionsstrom I_2 in dieselbe Richtung. Wenn sich der Strom I_1 nicht verändert entsteht in der Nachbarspule kein Strom.

Die Induktionsspannung in der Spule 2 ist proportional zu Änderung von I_1 pro Zeiteinheit

$$U_2 = -{}_1L_2 \cdot \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \quad (4.7)$$

Die Konstante ${}_1L_2$ heißt gegenseitige Induktivität der beiden Spulen.

Einheit:

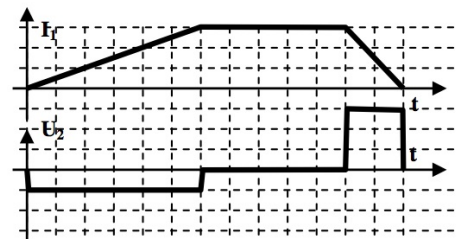
$$[{}_1L_2] = \left[\frac{U_2}{\Delta I_1 / \Delta t} \right] = \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} = \text{H} \quad \text{Henry}$$

Die gegenseitige Induktivität beschreibt die Wirkung der beiden Spulen aufeinander und ist abhängig von der Geometrie der Spulen und von den Stoffen, mit denen der Raum in den Spulen und zwischen ihnen gefüllt ist.

Beispiel (4.1)

Zwei Spulen haben die Gegeninduktivität ${}_1L_2 = 2 \text{ H}$. Berechnen Sie die Induktionsspannung U_2 in der zweiten Spule wenn,

- der Strom I_1 in den ersten sechs Sekunden gleichförmig von Null auf 3 A ansteigt,
- der Strom I_1 in den nächsten 5 Sekunden gleich bleibt,
- der Strom I_1 in den letzten 2 Sekunden von 3 A auf Null absinkt.



Lösung

- $U_2 = -{}_1L_2 \cdot \frac{\Delta I_1}{\Delta t} = -2 \cdot \frac{3-0}{6-0} = -1 \text{ V}$ (Gegenrichtung zu I_1)
- $U_2 = -{}_1L_2 \cdot \frac{\Delta I_1}{\Delta t} = -2 \cdot \frac{3-3}{11-6} = 0 \text{ V}$ (in der Spule 2 entsteht keine Spannung)
- $U_2 = -{}_1L_2 \cdot \frac{\Delta I_1}{\Delta t} = -2 \cdot \frac{0-3}{13-11} = +3 \text{ V}$ (gleiche Richtung wie I_1)

4.4 Selbstinduktivität

Der Grund, warum in Spule 2 eine Spannung entsteht, ist die Änderung des magnetischen Flusses. Dieser ändert sich aber nicht nur in Spule 2, sondern auch in Spule 1 selbst. Deshalb entstehen auch in Spule 1 von selbst zusätzliche neue Spannungen, wenn man in ihr den Strom verändert. Dies nennt man Selbstinduktion.

Wenn der Strom in einer Spule steigt, so wird in ihr eine Gegenspannung induziert, wenn der Strom in einer Spule sinkt, wird eine Spannung in derselben Richtung wie der Strom induziert.

Die Induktionsspannung in der Spule ist proportional zu Änderung von I pro Zeiteinheit

$$U_{\text{ind}} = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (4.8)$$

Die Konstante L heißt Selbstinduktivität der Spule.

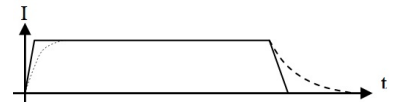
Einheit:

$$[L] = \left[\frac{U}{\Delta I / \Delta t} \right] = \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} = \text{H} \quad \text{Henry}$$

Die Selbstinduktivität beschreibt die Wirkung der Spule auf sich selbst.

Beispiel: Ein- und Ausschalten einer Spule

Beim Einschalten des Stroms steigt er von Null bis auf eine bestimmte Stärke. Wenn sich in diesem Stromkreis eine Spule befindet, so entsteht eine Gegenspannung, die den eingeschalteten Strom verkleinert. Es dauert länger, bis der Strom die volle Stärke erreicht. Die Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf eines Stroms beim Einschalten und Ausschalten mit Spule (gestrichelt) und ohne Spule.



Beim Ausschalten ist es umgekehrt. Sobald der Strom absinkt, entsteht eine neue zusätzliche Spannung in dieselbe Richtung. Sie verstärkt den absinkenden Strom, sodaß es länger dauert, bis er auf Null zurückgeht. Dies bemerkt man oft, wenn man ein Radiogerät ausschaltet. Die Musik spielt noch eine kurze Zeit nach dem Abschalten.

Regel von Lenz

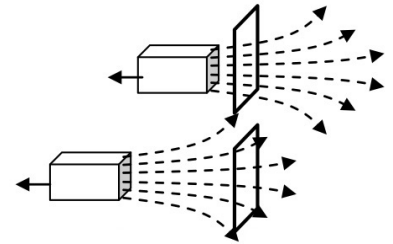
Die Ursache für eine induzierte Gegenspannung ist das Ansteigen des Magnetfeldes und des Stroms, der es erzeugt. Die Ursache für eine Spannung in gegebener Stromrichtung ist das Absinken des gegebenen Stroms. Man kann daher das Gesetz von der Induktionsspannung auch anders formulieren:

Ein Induktionsstrom hat immer eine solche Richtung, dass er seine eigene Ursache schwächt.

4.5 Aufgaben

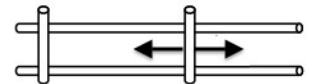
(4.1) Ein Magnet wird nach links bewegt. Dadurch entsteht in der Leiterschleife ($R = 200 \Omega$) eine Änderung des Magnetfeldes. Das untere Bild zeigt die Anordnung um 2 Sekunden später als das obere Bild.

- Wie groß ist die magnetische Flußänderung in der Schleife?
- Bestimmen Sie Induktionsspannung und den Induktionsstrom!
- Welche Richtung hat der Induktionsstrom? Wie wird die Richtung bestimmt?



(4.2) Die beiden horizontalen Teile der Leiterschleife haben den Abstand $l = 20 \text{ cm}$. Außerdem gibt es ein Magnetfeld von 10 T das normal aus der Papierebene heraustritt.

- Bestimmen Sie Richtung und Betrag der Induktionsspannung, welche entsteht, wenn man den rechten vertikalen Teil mit $v = 5 \text{ m/s}$ nach rechts bewegt?
- Bestimmen Sie Richtung und Betrag der Induktionsspannung, welche entsteht, wenn man den rechten vertikalen Teil mit $v = 5 \text{ m/s}$ nach links bewegt?
- Bestimmen Sie Richtung und Betrag der Induktionsspannung, welche entsteht, wenn man den rechten vertikalen Teil mit $v = 5 \text{ m/s}$ nach rechts bewegt und den linken mit $v = 5 \text{ m/s}$ nach links bewegt?
- Mit welcher Kraft muß man die vertikalen Teile ziehen, wenn es keine Reibung gibt?



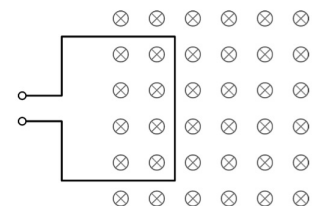
(4.3) Eine Leiterschleife wird senkrecht zu den Feldlinien durch ein räumlich begrenztes Magnetfeld bewegt (siehe zwei "Momentaufnahmen" unten).

Zeichnen Sie jeweils an den entscheidenden Stellen der Leiterschleife den Elektronenüberschuss, den Elektronenmangel sowie die Richtung eines möglichen Induktionsstroms ein.



(4.4) Durch eine Leiterschleife fließt Strom. Sie wird dadurch mit einer Kraft F in ein Magnetfeld hineingezogen.

Ergänzen Sie die Zeichnung mit den Angaben zur Kraftrichtung, der technischen Stromrichtung, sowie Plus- und Minuspol. (Die Feldlinien verlaufen senkrecht zur Leiterschleifenfläche)



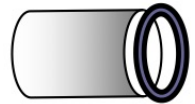
(4.5) a) Wie lautet das Induktionsgesetz?

b) Welche Arten der Flußänderung gibt es? Ist es für das Induktionsgesetz wichtig, auf welche Art der Fluß geändert wird?

(4.6) a) In einer Schleife ändert sich der Fluß dadurch, daß die Fläche kleiner wird. Welche Hand verwenden Sie für die Bestimmung der Richtung des Induktionsstroms?

b) Angenommen, das Magnetfeld durch eine Schleife wird stärker und die Fläche der Schleife bleibt konstant. Welche Hand verwenden Sie für die Bestimmung der Richtung des Induktionsstroms?

- (4.7) a) Was muß man tun, um in einer Leiterschleife einen Induktionsstrom zu erzeugen?
b) Wie lautet die Regel von Lenz?
- (4.8) a) Was entsteht in einer Spule, wenn ihr Strom ansteigt? Wie heißt diese Erscheinung?
b) Was entsteht in einer Spule, wenn ihr Strom absinkt?
- (4.9) Die gegenseitige Induktivität zwischen zwei Spulen beträgt ${}_1L_2 = 0,04$ H. In Spule 1 wird der Strom eingeschaltet. Er steigt dabei in 50 Millisekunden gleichförmig von Null auf 7 A.
a) Welche Spannung entsteht in der Spule 2?
b) Was passiert in Spule 2, wenn nun der Strom in Spule 1 konstant bleibt?
c) Beim Ausschalten des Stromes I_1 sinkt dieser innerhalb von 100 Millisekunden auf Null zurück. Was geschieht in Spule 2?
- (4.10) In Spule 1 lassen wir einen Strom gleichförmig innerhalb von 3 Sekunden von Null auf 24 A ansteigen. Dabei entsteht in Spule 2 eine Gegenspannung von $-1,6$ V. Was geschieht in Spule 2, wenn wir in Spule 1 den Strom gleichförmig innerhalb von 5 Sekunden wieder auf Null absinken lassen?
- (4.11) Spule 1 hat die Länge l_1 , den Radius r und N_1 Windungen. Gleich neben dieser Spule ist ein Metallring mit demselben Radius. Spule und Ring haben dieselbe Achse, sind nicht miteinander verbunden und befinden sich im Vakuum. Bestimmen Sie die gegenseitige Induktivität!



5 Der Wechselstrom

5.1 Allgemeines

Bisher hatten wir uns nur mit Gleichstrom (englisch: DC = direct current) beschäftigt. Er hat immer dieselbe Richtung und wechselt nur langsam seine Stärke. Gleichstrom kommt meist aus einer "chemischen" Batterie.

Wechselstrom (englisch: AC = alternating current) ist im Gegensatz dazu ein Strom, der periodisch seine Richtung und Stärke ändert. Wechselstrom kommt aus der Steckdose.

Es gibt viele Arten, wie sich ein Strom periodisch ändern kann.

Rechteckförmiger Strom (oben): Ein halbe Periode fließt der Strom mit Stärke I in eine Richtung, die nächste halbe Periode mit derselben Stärke in die Gegenrichtung. (Ein ganz genauer Rechteckstrom ist allerdings unmöglich.)

Sägezahnförmiger Strom (Dreiecksstrom) (mitte): Dieser Strom ändert nicht nur seine Richtung, sondern auch seine Stärke und zwar innerhalb einer halben Periode gleichförmig.

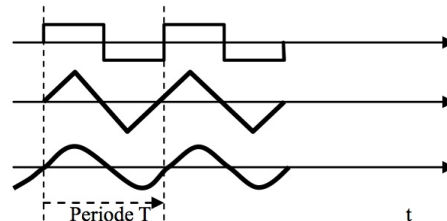
Sinusförmiger Strom (unten): Dieser Strom ändert Richtung und Stärke so wie die Elongation einer harmonischen Schwingung. Der zeitliche Verlauf hat die Form einer Sinuskurve. Er ist am leichtesten herzustellen.

Meist ist der Wechselstrom sinusförmig und wird beschrieben durch

$$I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (5.1)$$

wobei I_0 der Maximalwert (Scheitelwert) des Stromes, $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f$ die Kreisfrequenz, $f = \frac{1}{T}$ die Frequenz und T die Periode ist.

Das öffentliche Stromnetz in Österreich liefert einen ungefähr sinusförmigen Strom mit der Frequenz $f = 50$ Hz. Der Strom wechselt pro Sekunde 100 mal seine Richtung. Eine Periode dauert $T = \frac{1}{50} = 0,02$ Sekunden.



5.2 Der Wechselstromgenerator

5.2.1 Grundlage

Der Generator ist das Gegenstück zum Motor: es wird hier aus Bewegungsenergie elektrische Energie erzeugt. Dazu verwendet man das Induktionsgesetz. Das Induktionsgesetz sagt: Wenn sich der magnetische Fluß Φ durch eine Leiterschleife ändert, so entsteht in der Schleife eine Induktionsspannung

$$U_{\text{ind}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (5.2)$$

Wenn nun mehrere Schleifen hintereinander gewickelt sind, so spricht man von einer Spule mit der Windungszahl N . Die Induktionsspannung in der Spule beträgt

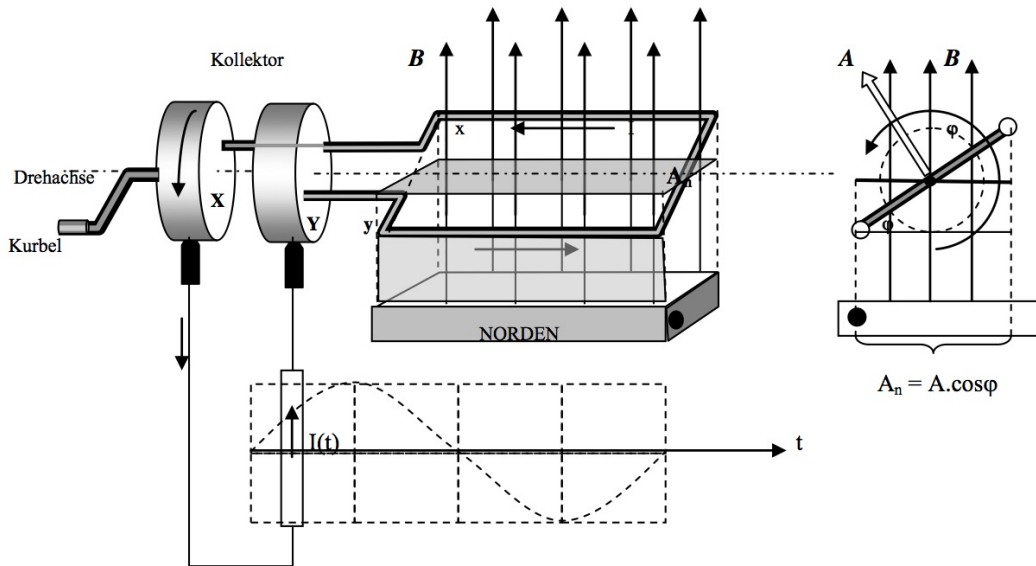
$$U_{\text{ind}} = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (5.3)$$

Man kann den magnetischen Fluss auf drei Arten ändern:

1. man ändert das Magnetfeld
2. man ändert die Fläche der Schleife
3. man dreht die Schleife

5.2.2 Aufbau des Generators

Beim Generator wird der magnetische Fluss durch Drehen der Schleife geändert.



Eine rechteckige isolierte Leiterschleife ist um eine Achse drehbar. Das eine Ende y der Schleife ist leitend mit dem Rad Y verbunden, das andere Ende x führt durch ein Loch im Rad Y (= Kollektor) hindurch und ist mit einem zweiten Rad X (= Kollektor) verbunden. Der Strom kann wegen der Isolation nicht vom Ende x auf das Rad Y fließen. Mit einer Kurbel kann das ganze System in einem konstanten Magnetfeld B gedreht werden.

Durch die Drehung der Schleife ändert sich der magnetische Fluß durch die Schleife und es entsteht eine Induktionsspannung U_{ind} , die sich periodisch ändert. Man nennt sie Wechselspannung. Es fließt ein Wechselstrom, der sich genauso wie die Spannung mit der Periode der Schleifendrehung ändert. Er wird über zwei Kohlekontakte, welche die beiden Räder berühren, in einen Stromkreis "eingespeist". In der Abbildung ist ein Widerstand in diesem Stromkreis eingezeichnet, sowie der zeitliche Verlauf des Stromes $I(t)$.

5.2.3 Berechnung der Wechselspannung

Die Schleife (bzw. Spule) wird mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega = \text{const}$ gedreht. Zum Zeitpunkt t ist der Winkel zwischen dem Magnetfeld \vec{B} und dem Flächenvektor \vec{A} der Schleife gleich $\varphi = \omega \cdot t$. Dann beträgt der magnetische Fluß durch die Spule (mit N Windungen)

$$\Phi = A_n \cdot B = A \cdot B \cdot \cos \varphi = A \cdot B \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (5.4)$$

Das Induktionsgesetz lautet

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (5.5)$$

und die Induktionsspannung kann durch die erste Ableitung berechnet werden

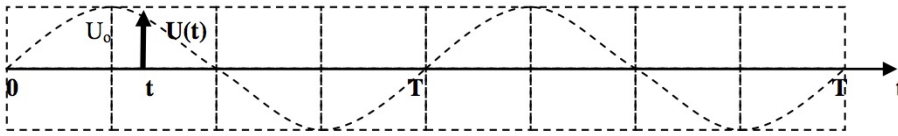
$$U_{\text{ind}} = -N \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t} = N \cdot A \cdot B \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (5.6)$$

Die Größe $U_0 = N \cdot A \cdot B \cdot \omega$ nennt man Scheitelspannung (Amplitude der Spannung) mit N Windungen, A der Fläche der Spule, B dem Magnetfeld und ω der Winkelgeschwindigkeit.

Die Induktionsspannung kann allgemein geschrieben werden als

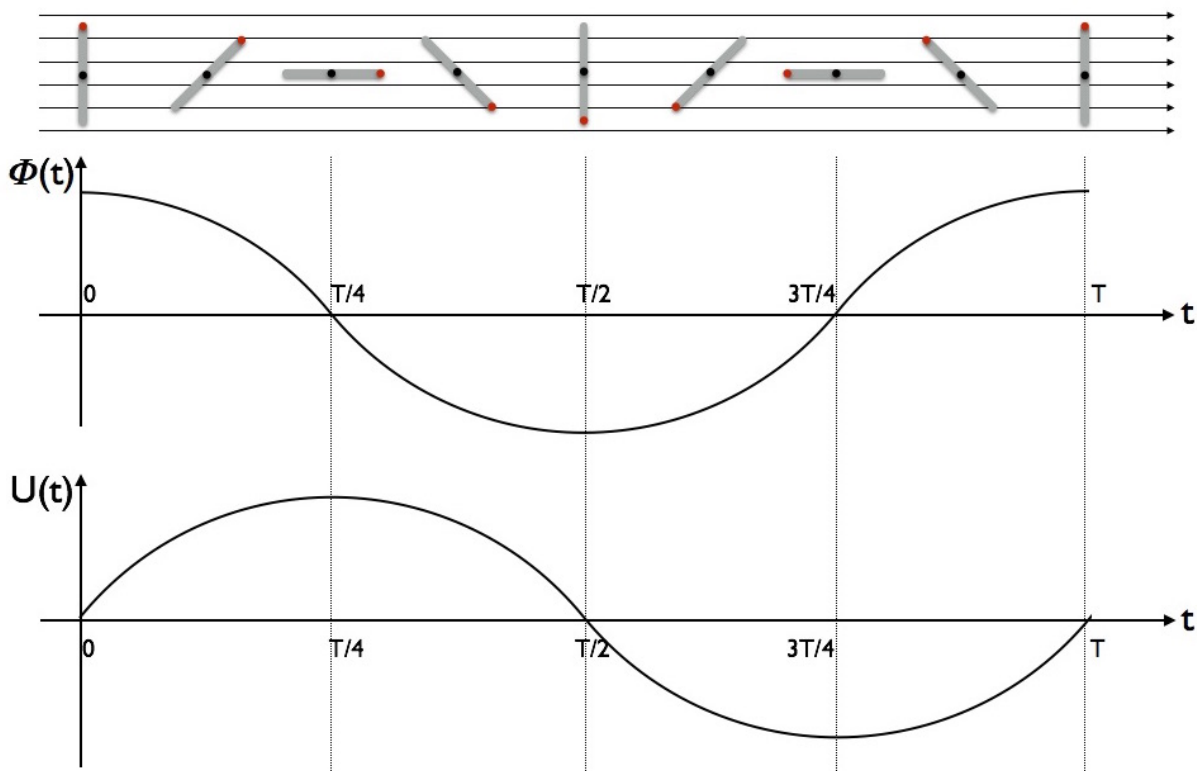
$$U(t) = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (5.7)$$

mit der Periode $T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$. Die Spannung wechselt periodisch zwischen den Werten $\pm U_0$. Die Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der sinusförmigen Wechselspannung $U(t)$.



5.2.4 Die einzelnen Phasen der Rotation

In der folgenden Abbildung ist eine volle Umdrehung einer Leiterschleife im Magnetfeld eingezeichnet. Die Schleife wird immer von der Seite betrachtet, zur besseren Orientierung ist ein Punkt am Rand rot markiert. Im Diagramm darunter ist der magnetische Fluss $\Phi(t)$ durch die Schleife eingezeichnet. Immer wenn die Schleife parallel zum Feld ist, ist der Fluss gleich Null. Bei der senkrechten Stellung ist der Fluss maximal. Im letzten Diagramm ist die Induktionsspannung $U(t)$ eingezeichnet, die sich mathematisch aus der (negativen) Ableitung des Flusses ergibt.



Man kann sich merken: Immer wenn der Fluss seine maximale Größe erreicht hat, ist seine Änderung nur sehr klein oder sogar gleich Null. Wenn der Fluss selbst Null ist, so ist seine Änderung immer sehr groß.

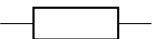


5.2.5 Zusammenfassung

- Wechselstromgeneratoren bestehen aus Leiterschleifen, die sich in einem konstanten Magnetfeld drehen

- Durch die Drehung ändert sich der magnetische Fluß und zwar periodisch.
- Dadurch wird eine Spannung induziert, die periodisch ihre Richtung und ihre Stärke ändert, man nennt sie Wechselspannung.
- Der zeitliche Verlauf dieser Spannung ist eine sogenannte Sinuskurve. Die Amplitude heißt Scheitelspannung U_0 .

5.3 Wechselstromwiderstände

Es gibt drei Arten von Widerständen in einem Wechselstromkreis:

- der rein ohm'sche Widerstand R : das ist ein gewöhnlicher Widerstand, wie wir ihn auch vom Gleichstrom kennen. 
- der Induktive Widerstand L : das ist eine Spule oder sonst ein Element, in dem auf Grund des Induktionsgesetzes zusätzliche Ströme induziert werden. 
- der kapazitive Widerstand C : das ist meist ein Kondensator oder etwas ähnliches. 

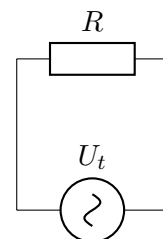
5.3.1 Wechselstromkreis mit rein Ohm'schem Widerstand

Der Stromkreis besteht aus einer Wechselstromquelle und einem rein Ohm'schem Widerstand. Der Wechselstromgenerator erzeugt eine sinusförmige Wechselspannung

$$U_t = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (5.8)$$

Im Stromkreis fließt ein Wechselstrom

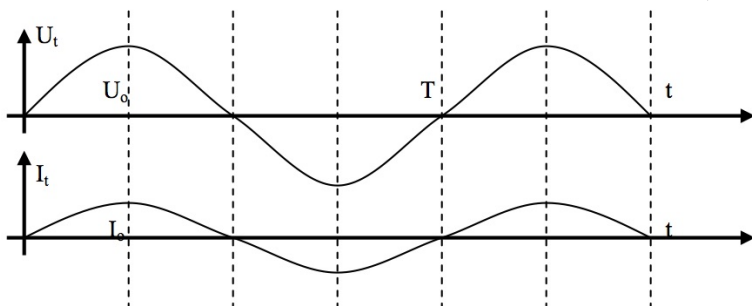
$$I_t = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad (5.9)$$



mit der Phasenverschiebung $\varphi = 0$, das heißt Strom und Spannung sind nicht phasenverschoben bzw. bewegen sich in Phase. Nach dem Ohm'schen Gesetz $I_t = \frac{U_t}{R}$ ergibt sich der Scheitelwert des Stromes durch

$$I_0 = \frac{U_0}{R} \quad (5.10)$$

Spannung und Strom sind gleichphasig (Wenn die Spannung Null ist, ist auch der Strom Null, wenn die Spannung ein Maximum hat, hat es auch der Strom).

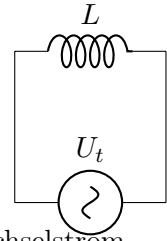


5.3.2 Wechselstromkreis mit rein induktivem Widerstand

Der Stromkreis besteht aus einer Wechselstromquelle und einem induktiven Widerstand (z.B. einer Spule). Der Wechselstromgenerator erzeugt eine sinusförmige Wechselspannung

$$U_t = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (5.11)$$

In der Spule entsteht eine zusätzliche Induktionsspannung U_{ind} . Wenn U_t steigt, so entsteht ein Gegenstrom in der Spule, wenn U_t sinkt, entsteht ein Strom in die ursprüngliche Richtung. Deswegen läuft der Strom nicht gleichphasig mit der Spannung, sondern ist verzögert bzw. phasenverschoben. Im Stromkreis fließt ein Wechselstrom

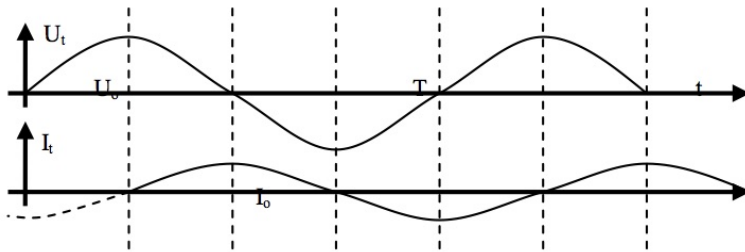


$$I_t = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad (5.12)$$

mit der Phasenverschiebung $\varphi = +\frac{\pi}{2} = +90^\circ$, was einer Viertelperiode entspricht $\Delta t = +\frac{T}{4}$. Das heißt der Strom läuft hinter der Spannung. Nach dem Ohm'schen Gesetz $I_t = \frac{U_t}{R}$ ergibt sich der Scheitelwert des Stromes durch

$$I_0 = \frac{U_0}{R_L} = \frac{U_0}{\omega \cdot L} \quad (5.13)$$

wobei $R_L = \omega \cdot L$ der induktive Widerstand ist, der in der Einheit Ohm gemessen wird. Spannung und Strom sind nicht gleichphasig. Der Strom läuft eine Viertelperiode hinter der Spannung, die Phasenverschiebung beträgt $\varphi = +90^\circ$. (Wenn die Spannung ein Maximum hat, ist der Strom gleich Null. Wenn die Spannung auf Null absinkt, hat der Strom ein Maximum.)



Im folgenden wird mathematisch gezeigt, wie man auf den obigen Zusammenhang kommt. In der Leiterschleife gilt: Die Spannung der Spannungsquelle und die zusätzliche Induktionsspannung, die in der Spule entsteht, sind zusammen gleich Null (geschlossenen Schleife)

$$\begin{aligned} U_{ges} = U_t + U_{\text{ind}} &= 0 \\ U_t &= -U_{\text{ind}} \\ U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) &= -(-L \cdot \frac{\Delta I_t}{\Delta t}) \\ \frac{\Delta I_t}{\Delta t} &= \frac{U_0}{L} \cdot \sin(\omega \cdot t) \end{aligned}$$

Durch Integration ergibt sich schließlich die Form des Stromes

$$I_t = -\frac{U_0}{L \cdot \omega} \cdot \cos(\omega \cdot t) = \frac{U_0}{R_L} \cdot \sin(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}) \quad (5.14)$$

aus der man den Scheitelwert $I_0 = \frac{U_0}{R_L}$ und die Phasenverschiebung $\varphi = +\frac{\pi}{2}$ ablesen kann.

5.3.3 Wechselstromkreis mit rein kapazitivem Widerstand

Der Stromkreis besteht aus einer Wechselstromquelle und einem kapazitiven Widerstand (z.B. einem Kondensator). Der Wechselstromgenerator erzeugt eine sinusförmige Wechselspannung

$$U_t = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (5.15)$$

Zwischen den Platten können keine Ladungen fließen, daher kann auf Dauer kein Gleichstrom fließen. Beim Wechselstrom ist das anders, denn er wechselt periodisch seine Richtung. Die Ladungen werden nur kurzfristig auf den Kondensator aufgebracht und in der nächsten halben Periode wieder heruntergezogen. Es ist also möglich, daß im Stromkreis, der durch einen Kondensator unterbrochen wird, ein Wechselstrom fließt. Der Strom läuft nicht gleichphasig mit der Spannung, sondern ist phasenverschoben. Im Stromkreis fließt ein Wechselstrom

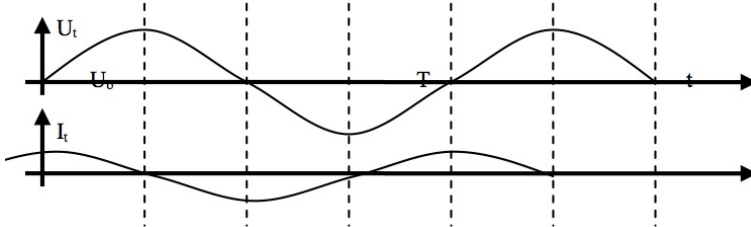
$$I_t = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad (5.16)$$

mit der Phasenverschiebung $\varphi = -\frac{\pi}{2} = -90^\circ$, was einer Viertelperiode entspricht $\Delta t = -\frac{T}{4}$. Das heißt der Strom läuft vor der Spannung. Nach dem Ohm'schen Gesetz $I_t = \frac{U_t}{R}$ ergibt sich der Scheitelwert des Stromes durch

$$I_0 = \frac{U_0}{R_C} = U_0 \cdot \omega \cdot C \quad (5.17)$$

wobei $R_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ der kapazitive Widerstand ist, der in der Einheit Ohm gemessen wird.

Spannung und Strom sind nicht gleichphasig. Der Strom läuft eine Viertelperiode vor der Spannung, die Phasenverschiebung beträgt $\varphi = -90^\circ$. (Wenn die Spannung ein Maximum hat, ist der Strom gleich Null. Wenn die Spannung auf Null absinkt, hat der Strom ein (negatives) Maximum.)



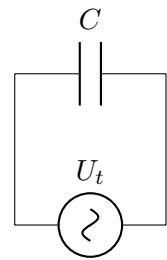
Im folgenden wird mathematisch gezeigt, wie man auf den obigen Zusammenhang kommt. Die Spannung am Kondensator ist gleich der Spannung der Quelle:

$$\begin{aligned} U_C &= U_t \\ \frac{Q_t}{C} &= U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ Q_t &= U_0 \cdot C \cdot \sin(\omega \cdot t) \end{aligned}$$

Der Strom ist die Änderung der Ladung und kann durch differenzieren berechnet werden

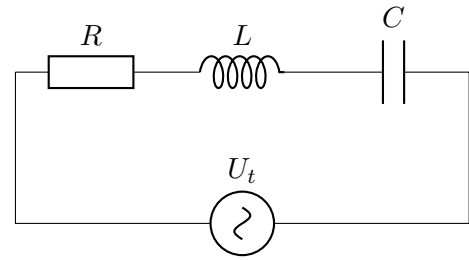
$$I_t = \frac{\Delta Q_t}{\Delta t} = U_0 \cdot C \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) = \frac{U_0}{R_C} \cdot \sin(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}) \quad (5.18)$$

aus der man den Scheitelwert $I_0 = \frac{U_0}{R_C}$ und die Phasenverschiebung $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ ablesen kann.



5.3.4 Wechselstromwiderstände in Serienschaltung

Die einzelnen Wechselstromwiderstände bewirken jeweils eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, die man berücksichtigen muss. Als sehr nützlich hat sich hier das sogenannte Zeigerdiagramm oder auch Vektordiagramm erwiesen. Dabei werden die Widerstände als Pfeile gezeichnet, deren Länge ihrer Größe in Ohm entspricht mit dem entsprechenden Phasenwinkel.



Wir fassen die einzelnen Größen, ihre Phasenverschiebungen und die Lage ihrer Pfeile zusammen:

Widerstand	Größe	Phasenverschiebung	Lage des Pfeiles
Ohm'scher Widerstand	R	$\varphi = 0$	horizontaler nach rechts
induktiver Widerstand	$R_L = \omega L$	$\varphi = +90^\circ$	vertikal nach oben
kapazitiver Widerstand	$R_C = \frac{1}{\omega C}$	$\varphi = -90^\circ$	vertikal nach unten

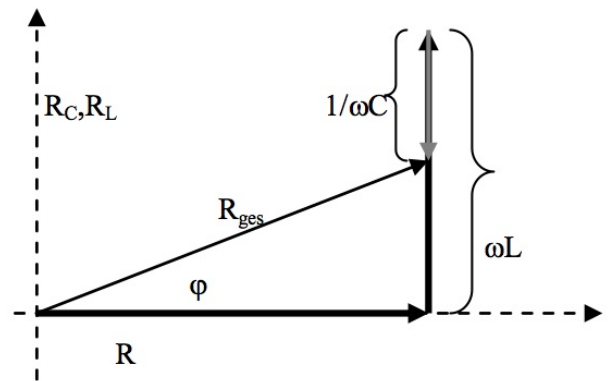
Wenn die Widerstände in Serie geschaltet sind, so ist ihr Gesamtwiderstand gleich der Vektorsumme der Einzelwiderstände. Graphisch bedeutet dies, dass man jeden folgenden Pfeil an die Spitze des Vorgängers zeichnet. Der Summenvektor zeigt dann vom Anfang des ersten Vektors zur Spitze des letzten Vektors.

Die Länge des Gesamtwiderstandes ergibt sich als

$$R_{ges} = \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2} \quad (5.19)$$

Die Phasenverschiebung φ wird berechnet durch

$$\sin \varphi = \frac{R_L - R_C}{R_{ges}} \quad (5.20)$$



Die gegebene Wechselspannung

$$U_t = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (5.21)$$

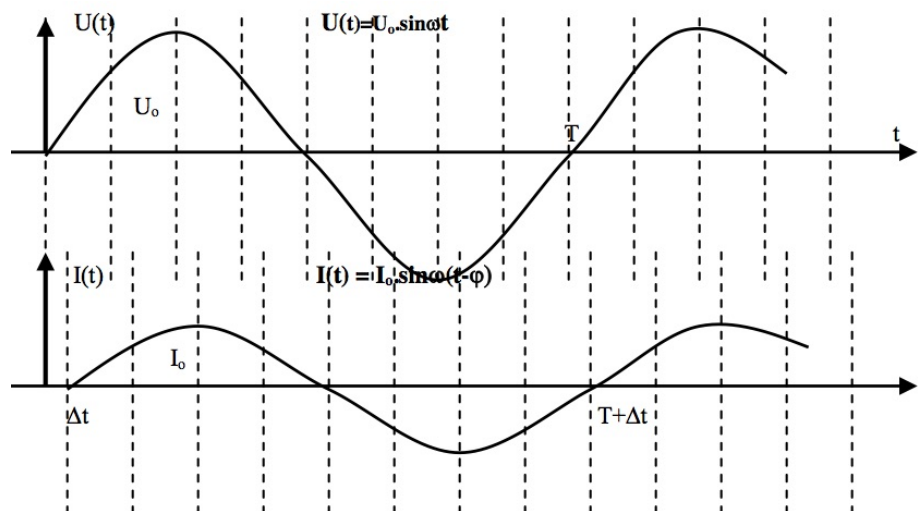
führt zu einem Wechselstrom mit derselben Frequenz, der um die Phase φ verschoben ist

$$I_t = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad (5.22)$$

wobei der Scheitelwert des Stromes gegen ist durch

$$I_0 = \frac{U_0}{R_{ges}} \quad (5.23)$$

Der Phasenunterschied kann leicht in einen Zeitunterschied Δt umgerechnet werden ($T = \frac{2\pi}{\omega}$)



$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{\varphi}{360^\circ} \quad \text{in Grad} \qquad \frac{\Delta t}{T} = \frac{\varphi}{2\pi} \quad \text{in Rad} \quad (5.24)$$

5.4 Leistung im Wechselstromkreis

5.4.1 Momentante Leistung und mittlere Leistung

Die (momentane) Leistung im Wechselstromkreis ist

$$P_t = U_t \cdot I_t \quad (5.25)$$

und hängt von der Zeit ab. Die Multiplikation wird für jeden Zeitpunkt t durchgeführt. Da Strom und Spannung dieselbe Periode haben, ist auch die Kurve für die Leistung periodisch. Die Leistung kann auch manchmal negativ sein, nämlich genau dann, wenn Spannung und Strom verschiedenes Vorzeichen haben. Daher ist es sinnvoll die mittlere Leistung einzuführen

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} U_0 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi \quad (5.26)$$

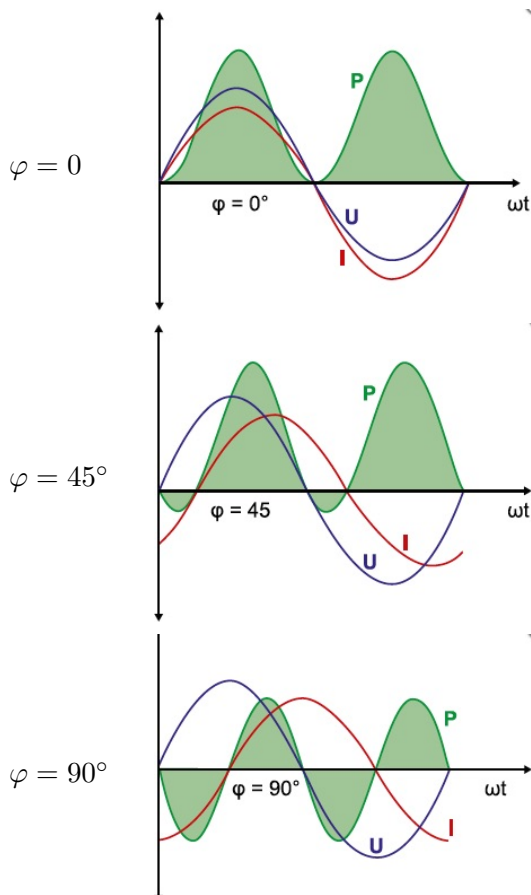
wobei die Effektivspannung $U_{\text{eff}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$ und der Effektivstrom $I_{\text{eff}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$ sind. Der Ausdruck $\cos \varphi$ wird auch als Leistungsfaktor bezeichnet.

Beispiel (5.1)

Die Spannung, die für das öffentliche Stromnetz angegeben wird, ist eigentlich der Effektivwert: $U_{\text{eff}} = 230 \text{ V}$. Damit ist der Scheitelwert $U_0 = \sqrt{2} \cdot U_{\text{eff}} = 325 \text{ V}$. Das heißt die Spannung im Netz schwankt zwischen $\pm 325 \text{ V}$.

5.4.2 Leistung und Phasenwinkel

Die Leistung hängt vom Phasenwinkel φ zwischen Strom und Spannung ab.



Ist der Strom genau in Phase mit der Spannung (rein Ohm'scher Verbraucher), so ergibt die Leistung immer positive Werte. Das nennt man Wirkleistung. Nur die Wirkleistung kann Arbeit verrichten und wird auch von einem Stromzähler gezählt und muß bezahlt werden. Stromzähler sind also reine Wirkleistungszähler.

Bei einem Phasenwinkel zwischen 0 und 90° ist ein Teil der Leistung negativ. Man spricht hier allgemein von Scheinleistung. Sie setzt sich aus Wirkleistung und Blindleistung zusammen.

Bei einem Phasenwinkel von 90° ergibt die Leistung im Mittel genau Null (die positiven und negativen Teile der Leistung sind gleich groß und gleichen sich aus). Deshalb wird auch keine echte Leistung verbraucht. Man spricht hier von der sogenannten Blindleistung.

In den Flächen oberhalb der Nullachse wird Energie vom Stromnetz geliefert, in den Flächen unterhalb der Nullachse wird Energie an das Netz zurück gegeben.

Die Blindleistung ist nicht erwünscht, weil sie nur unnötig das Stromnetz belastet (der Strom fließt ja wirklich). Sie kann aber zum Teil kompensiert werden.

Bei Motoren wird oft der Leistungsfaktor angegeben, der ist gleich dem Verhältnis Wirkleistung zu Scheinleistung, $\cos \varphi = \frac{\text{Wirkleistung}}{\text{Scheinleistung}}$. Bei reiner Wirkleistung ist der Leistungsfaktor gleich 1, bei reiner Blindleistung ist er gleich 0.

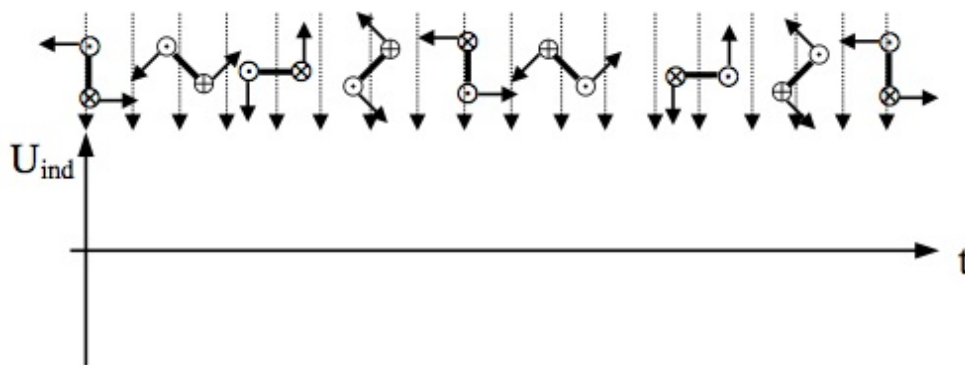
5.4.3 Einheiten

Um die verschiedenen Arten der Leistung zu kennzeichnen, haben sich verschiedene Einheiten eingebürgert.

Physikalische Größe	Formelzeichen	Einheit	Abkürzung
Wirkleistung	P	Watt	W
Blindleistung	Q	Volt-Ampere-reactif	Var
Scheinleistung	S	Volt-Ampere	VA

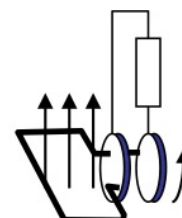
5.5 Aufgaben

- (5.1) a) Die Netz-Wechselspannung hat eine Frequenz von $f = 50$ Hz. Bestimmen Sie die Periodendauer und die Kreisfrequenz!
 b) Mit Hilfe eines Oszilloskopes wird die Periodendauer einer sinusförmigen Wechselspannung mit $T = 200 \mu\text{s}$ gemessen. Wie groß ist die Frequenz f der Spannung?
- (5.2) a) Die Netz-Wechselspannung hat einen Effektivwert von $U_{\text{eff}} = 230$ V. Wie groß ist der Scheitelwert U_0 ?
 b) Mit Hilfe eines Oszilloskopes wird der Spitze-Spitze-Wert einer sinusförmigen Wechselspannung mit $U_0 = 30$ V gemessen. Wie groß ist der Effektivwert U_{eff} der Spannung?
- (5.3) Eine sinusförmige Wechselspannung ist durch $U_t = U_0 \cdot \sin(\omega t)$ gegeben. ($U_0 = 12$ V, $f = 50$ Hz)
 a) Welche Spannung herrscht zur Zeit $t_1 = 5$ ms?
 b) Zu welchen Zeiten ist $U_t = -12$ V, zu welchen Zeiten ist $U_t = 0$ V?
 c) Zu welchen Zeiten ist $U_t = 10$ V?
- (5.4) Die Leiterschleife eines Wechselstromgenerators dreht sich 120 Mal in der Minute und erzeugt eine Scheitelspannung von 30 V.
 a) Berechnen Sie die Frequenz f und ω , sowie T ! Skizzieren Sie den zeitlichen Verlauf der Spannung!
 b) Wie groß ist die Spannung in den Zeitpunkten: $t_1 = 0,6$ s, $t_2 = 0,8$ s, $t_3 = 1,125$ s und $t_4 = 1,25$ s?
 Hinweis: Vergessen Sie nicht den Taschenrechner für die SIN-Berechnungen auf RAD umzuschalten ;-)
- (5.5) Eine Leiterschleife ($A = 50 \text{ cm}^2$) rotiert mit der Frequenz $f = 10$ Hz im Magnetfeld $B = 2$ T.
 a) Bestimmen Sie den Wert der Scheitelspannung und die Induktionsspannung als Sinusfunktion!
 b) Wird die Scheitelspannung größer, wenn man die Schleife eines Generators schneller dreht?
- (5.6) a) Skizzieren Sie den Verlauf der Induktionsspannung U_{ind} passend zur Stellung der Leitschleife in das Diagramm. Das Magnetfeld B läuft von oben nach unten und die Drehrichtung der Schleife ist gegen den Uhrzeigersinn.
 Hinweis: Überlegen Sie zuerst den Verlauf des magnetischen Flusses!

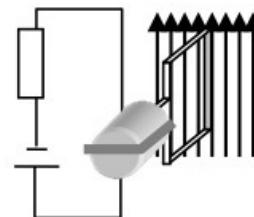


b) Wie groß ist die maximale Induktionsspannung U_0 , die eine Spule mit der Querschnittsfläche $A = 20 \text{ cm}^2$ und 100 Windungen in einem Magnetfeld $B = 0,1 \text{ T}$ bei einer Drehfrequenz von $f = 50 \text{ Hz}$ erzeugt?

- (5.7) a) Mit welcher Art von Feld (elektrisch oder magnetisch) arbeitet das abgebildete Gerät?
 b) Wird hier ein Gleichstrom, ein Wechselstrom, eine Drehbewegung oder ein Feld erzeugt? Erklären Sie das Prinzip davon!
 c) Zeichnen Sie die momentane Stromrichtung in der Schleife und im Widerstand ein!



- (5.8) Die Abbildung zeigt ein elektrisches Gerät zu einem bestimmten Zeitpunkt.
 a) Wie heißt dieses Gerät?
 b) Kann man damit eine Drehbewegung oder einen Strom erzeugen? Erklären Sie das Prinzip davon!
 c) Zeichnen Sie die Stromrichtung in der Schleife, das magnetische Dipolmoment und die Drehrichtung der Schleife ein!



- (5.9) Ergänzen Sie die Sätze:
 a) Der Strom in einer Induktivität hat eine Phasenverschiebung von _____ und ist daher _____ (vor/nach) der Spannung.
 b) Der Strom in einer Kapazität hat eine Phasenverschiebung von _____ und ist daher _____ (vor/nach) der Spannung.
 c) Je größer die Frequenz ist, desto _____ (größer/kleiner) ist der Wechselstromwiderstand einer Induktivität.
 d) Je größer die Frequenz ist, desto _____ (größer/kleiner) ist der Wechselstromwiderstand einer Kapazität.

(5.10) Wie groß ist der Strom I in einer Induktivität mit $L = 10 \text{ H}$, die an eine Wechselspannung von $U = 12 \text{ V}$ mit einer Frequenz von $f = 50 \text{ Hz}$ angeschlossen ist?

(5.11) Bei welcher Frequenz f hat ein Kondensator mit einer Kapazität von $C = 1 \mu\text{F}$ einen Wechselstromwiderstand von $R_C = 318 \Omega$?

(5.12) Ein Wechselstromkreis mit Frequenz $f = 50 \text{ Hz}$ und Scheitelspannung 100 V enthält die Widerstände $R = 314 \Omega$, $L = 2 \text{ H}$ und $C = 10 \text{ mF}$ in Serienschaltung.

- a) Bestimmen Sie den Gesamtwiderstand!
 b) Bestimmen Sie die Stromstärke!

- c) Bestimmen Sie den Phasen- und Zeitunterschied zwischen Strom und Spannung!
d) Zeichnen Sie den zeitlichen Verlauf von Strom und Spannung über zwei Perioden!
- (5.13) Ein Wechselstromkreis mit Frequenz $f = 50$ Hz und Scheitelspannung 10 V enthält die Widerstände $R = 628 \Omega$, $L = 1$ H in Serienschaltung.
a) Bestimmen Sie den Gesamtwiderstand!
b) Bestimmen Sie die Stromstärke!
c) Bestimmen Sie den Phasen- und Zeitunterschied zwischen Strom und Spannung!
d) Zeichnen Sie den zeitlichen Verlauf von Strom und Spannung im Zeitintervall $[0|0,06s]$!
- (5.14) Ein Wechselstromkreis mit Frequenz $f = 5$ Hz und Scheitelspannung 10 V enthält die Widerstände $R = 94,2 \Omega$ und $C = 0,32$ mF in Serienschaltung.
a) Bestimmen Sie den Gesamtwiderstand!
b) Bestimmen Sie die Stromstärke!
c) Bestimmen Sie den Phasen- und Zeitunterschied zwischen Strom und Spannung!
d) Zeichnen Sie den zeitlichen Verlauf von Strom und Spannung im Zeitintervall $[-0,1|0,2]$
- (5.15) In einem Wechselstromkreis ($f = 50$ Hz) ist ein Kondensator ($C = 1 \mu\text{F}$) und der Ohm'sche Widerstand $R = 3140 \Omega$ hintereinander geschaltet. Die Scheitelspannung beträgt $U_0 = 10$ V.
a) Bestimmen Sie: Gesamtwiderstand, Scheitelstrom, Phasenverschiebung, mittlere Leistung!
b) Skizzieren Sie den zeitlichen Verlauf von Spannung und Strom!
- (5.16) In einem Wechselstromkreis ist ein Ohm'scher Widerstand $R = 628 \Omega$ und eine Spule mit der Induktivität $L = 2$ H in Serie geschaltet! Die Spannungsquelle liefert eine Scheitelspannung von 220 V und 50 Hz.
a) Berechnen Sie: Gesamtwiderstand, Scheitelstrom, Phasenverschiebung, mittlere Leistung!
b) Skizzieren Sie den zeitlichen Verlauf von Spannung und Strom!
- (5.17) a) Um die Induktivität L einer Spule zu ermitteln, wird eine Gleichspannung von $U_{\text{DC}} = 4$ V angelegt und ein Strom von $I_{\text{DC}} = 0,1$ A gemessen. Bestimmen Sie daraus den Ohm'schen Widerstand R der Spule!
b) Beim Anlegen einer Wechselspannung ($f = 50$ Hz) mit $U_0 = 12$ V sinkt die Stromstärke auf $I_0 = 0,03$ A. Berechnen Sie den induktiven Widerstand R_L der Spule!
c) Skizzieren Sie den zeitlichen Verlauf von $U(t)$ und $I(t)$! Wie groß ist die Phasenverschiebung?
- (5.18) In einem Wechselstromkreis ($f = 50$ Hz, $U_0 = 310$ V, $I_0 = 30$ A) befindet sich ein Elektromotor für einen Kran. Dieser soll die Masse $m = 100$ kg mit der Geschwindigkeit $v = \text{const.}$ vertikal nach oben heben (Reibung und andere Verluste sind gleich 0). Die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung beträgt 30° .
a) Berechnen Sie die Effektivspannung, den Effektivstrom und die mittlere Leistung!
b) Mit welcher Geschwindigkeit $v = \text{const.}$ kann der Kran die Masse heben?
- (5.19) Eine reale Spule mit der Induktivität L und mit dem Wicklungswiderstand R bewirkt zwischen Strom und Spannung eine Phasenverschiebung von 30° . Durch Serienschaltung eines Kondensators von $C = 20 \mu\text{F}$ wird der Phasenwinkel auf 5° verkleinert.
Wie groß sind R und L der Spule?

6 Materie im Magnetfeld

6.1 Wiederholung: Materie im elektrischen Feld

Wir hatten zwei wichtige Erkenntnisse gewonnen:

- In jedem Stoff (insbesondere in einem Dielektrikum) ist das E-Feld kleiner als im Vakuum.

$$E_r = \frac{E_0}{\varepsilon_r} \quad (6.1)$$

wobei E_r das E-Feld im Dielektrikum, E_0 das E-Feld im Vakuum und ε_r die relative Dielektrizitätskonstante ist. Sie gibt an, wieviel mal kleiner das E-Feld im Stoff ist verglichen mit dem Vakuum.

- Im Inneren eines Leiters (oder eines Raumes, der von Leitern umgeben ist) ist das E-Feld gleich Null.

6.2 Materie im Magnetfeld

Wir können im magnetischen Fall einen ähnlichen Zusammenhang zwischen dem B-Feld B_r im Material und dem B-Feld B_0 im Vakuum herstellen

$$B_r = \mu_r \cdot B_0 \quad (6.2)$$

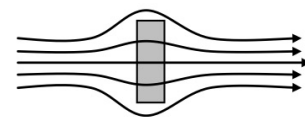
wobei μ_r die relative Permeabilitätskonstante ist. Sie gibt an, um wie viel sich das B-Feld im Stoff ändert verglichen mit dem Vakuum.

Wir unterscheiden hier drei Arten von Stoffen.

6.2.1 Diamagnetische Stoffe

Eigenschaften:

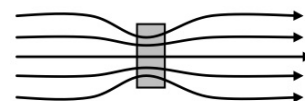
- Feldlinien werden aus dem Material gedrängt
- Magnetfeld ist im Inneren kleiner als im Vakuum
- Stoff wird von Magneten abgestoßen
- $\mu_r < 1$
- Beispiele: Wismuth (Bi), Kupfer, Stickstoff, Wasser, Reingold



6.2.2 Paramagnetische Stoffe

Eigenschaften:

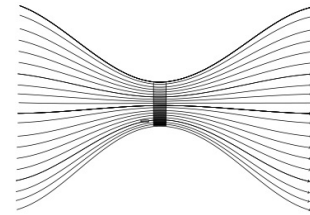
- Feldlinien werden im dem Material konzentriert
- Magnetfeld ist im Inneren größer als im Vakuum
- Stoff wird von Magneten angezogen
- $\mu_r > 1$
- Beispiele: Sauerstoff, Aluminium, Platin, Wolfram



6.2.3 Ferromagnetische Stoffe

Eigenschaften:

- Feldlinien werden im dem Material stark konzentriert
- Magnetfeld ist im Inneren viel größer als im Vakuum
- Stoff wird von Magneten stark angezogen
- $\mu_r \gg 1$ (nicht konstant, hängt vom äußeren Feld ab!!)
- Beispiele: Eisen, Nickel(Ni), Kobalt(Co)



6.3 Der Transformator

Ein Transformator ist ein Gerät, mit dem eine gegebene Wechselspannung verändert (transformiert) werden kann.

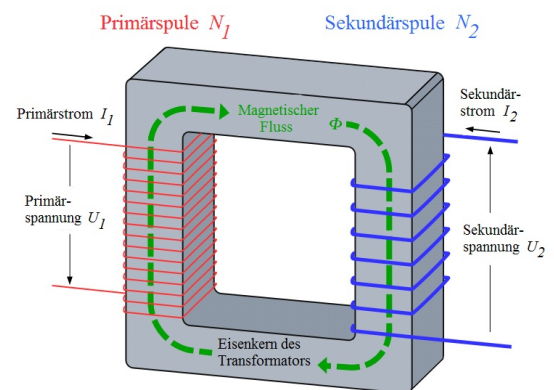
6.3.1 Aufbau und Funktionsweise

Aufbau

Der Transformator besteht aus zwei Spulen:

- Die Primärspule mit N_1 Windungen ist mit der Spannungsquelle verbunden. Dieser Stromkreis heißt Primärkreis.
- Die Sekundärspule mit N_2 Windungen ist mit einem beliebigen Verbraucher (=Widerstand) verbunden. Dieser Stromkreis heißt Sekundärkreis.

Die beiden Spulen sind auf einen gemeinsamen Eisenkern gewickelt. Es kann kein Strom von einer Spule zur anderen fließen, aber der gesamte Fluss, der von der einen Spule erzeugt wird, fließt auch durch die zweite Spule.



Funktionsweise

An den Primärkreis wird eine Wechselspannung U_1 angelegt, die einen Wechselstrom I_1 erzeugt. Dieser Wechselstrom erzeugt in der Primärspule ein magnetisches Wechselfeld und einen zeitlich veränderlichen magnetischen Fluss Φ . Da (fast) alle Feldlinien im Eisenkern konzentriert sind, erzeugt dieser veränderliche Fluss in der Sekundärspule ebenfalls eine Wechselspannung U_2 und einen Wechselstrom I_2 mit derselben Frequenz (Induktionsgesetz).

Aus dem oben Gesagten geht hervor, dass ein Transformator nur mit Wechselspannung funktionieren kann. Würde man an die Primärseite eine Gleichspannung anlegen, so käme es zu keiner Magnetfeldänderung und somit würde keine Sekundärspannung entstehen.

Transformatorgleichungen

Es gilt für einen unbelasteten und idealen Transformator

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{und} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (6.3)$$

Mit einem Transformator kann man Spannungen

- hinauftransformieren ($U_1 < U_2$): wenn $N_1 < N_2$ (mehr Windungen im Sekundärkreis)
- hinuntertransformieren ($U_1 > U_2$): wenn $N_1 > N_2$ (weniger Windungen im Sekundärkreis)

6.3.2 Transformatorverluste

Für den idealen Transformator ist die Leistung auf der Primärseite gleich der Leistung auf der Sekundärseite, $P_1 = P_2$, das heißt es gibt keine Verluste und keine Energie geht verloren. Ein realer Transformator ist aber immer mit Verlusten behaftet und es gilt $P_2 = \eta \cdot P_1$, wobei η der Wirkungsgrad ist, der angibt, wie groß die Verluste sind.

Es können folgende Verluste am Transformator auftreten:

1. Ohm'scher Widerstand:
Die Spulen haben einen Widerstand. Dabei geht ein wenig Energie verloren.
2. Magnetischer Fluß:
Obwohl der Eisenkern fast alle Feldlinien konzentriert, tritt doch ein Teil des Magnetfeldes nach außen und wird für die Energieübertragung nicht wirksam.
3. Wirbelstromverluste:
Die periodische Änderung des magnetischen Flusses erzeugt nicht nur in den Spulen einen Induktionsstrom sondern auch im Eisenkern. Hier entstehen unzählige größere und kleinere kreisförmige Ströme, sogenannte "Wirbelströme". Durch einen Eisenkern, der aus Lamellen (dünnen Schichten, die gegeneinander isoliert sind) aufgebaut ist, vermeidet man größere Wirbelströme.
4. Magnetisierungsverluste:
Wechselströme ändern periodisch ihre Richtung. Daher ändert auch der magnetische Fluss im Eisenkern periodisch seine Richtung. Der Eisenkern wird also periodisch in eine Richtung magnetisiert, wieder entmagnetisiert, in die Gegenrichtung magnetisiert und wieder entmagnetisiert. Das kostet viel Energie.

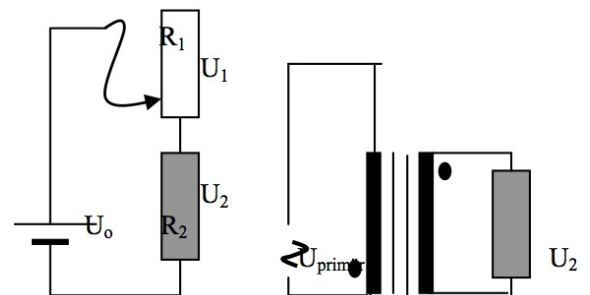
Wirbelströme und periodisch Magnetisierung führen zu einer starken Erwärmung des Transformators. Jeder großer Transformator muß daher gekühlt werden.

6.3.3 Verkleinerung einer Spannung

Potentiometerschaltung

Mit der Potentiometerschaltung ist es möglich eine gegene Spannung U_0 (z.B. Netzspannung) auf eine kleinere Verbraucherspannung U_{ger} (Gerätespannung, z.B. Radio) zu verkleinern.

Die Potentiometerschaltung besteht aus einer Spannungsquelle U_0 , sowie einem variablen Vorwiderstand R_{vor} und einem fixen Gerätewiderstand R_{ger} in Serie geschaltet. Der Vorwiderstand kann durch Verschieben seines Eingangs (Pfeil) vergrößert und verkleinert werden. Am Vorwiderstand fällt die Spannung U_{vor} ab, am Gerät selbst die Gerätespannung U_{ger} .



Die Frage ist jetzt, wie groß muß der Vorwiderstand gewählt werden, damit die gewünschte Geräte-
spannung erzeugt wird?

Wir berechnen den Vorwiderstand in folgender Art:

$$U_0 = U_{\text{vor}} + U_{\text{ger}} \quad \longrightarrow \quad U_{\text{vor}} = U_0 - U_{\text{ger}}$$

$$\frac{U_{\text{vor}}}{U_{\text{ger}}} = \frac{R_{\text{vor}}}{R_{\text{ger}}} = \frac{U_0 - U_{\text{ger}}}{U_{\text{ger}}} \quad \longrightarrow \quad R_{\text{vor}} = \frac{U_0 - U_{\text{ger}}}{U_{\text{ger}}} \cdot R_{\text{ger}}$$

Um nun abzuschätzen, wie effektiv die Potentiometerschaltung ist, kann man den Verlust V an elek-
trischer Energie durch den Vorwiderstand berechnen. Der Verlust ist das Verhältnis der Leistungen

$$V = \frac{P_{\text{vor}}}{P_{\text{ges}}} = \frac{U_{\text{vor}}}{U_0} = \frac{U_0 - U_{\text{ger}}}{U_0} \quad (6.4)$$

Beispiel (6.1)

Eine Spannungsquelle liefert eine Spannung von $U_0 = 230$ V. Für den Betrieb eines Radiogerätes
sind aber nur 20 V erforderlich.

Berechnen Sie die Größe des Vorwiderstands und den Verlust an Energie, wenn eine Potentiome-
terschaltung für die Spannungsreduktion verwendet wird!

Lösung

Der Vorwiderstand hat die Größe $R_{\text{vor}} = \frac{U_0 - U_{\text{ger}}}{U_{\text{ger}}} \cdot R_{\text{ger}} = \frac{230 - 20}{20} \cdot R_{\text{ger}} = 10,5 \cdot R_{\text{ger}}$. Der
Vorwiderstand muß 10,5 mal so groß sein, wie der Widerstand des Radiogerätes.

Der Verlust ergibt sich als $V = \frac{U_0 - U_{\text{ger}}}{U_0} = \frac{230 - 20}{230} = 0,913 = 91,3\%$ und ist eigentlich sehr hoch.
Nur 8,7% der Energie werden für den Betrieb des Radios verwendet.

Beispiel (6.2)

Eine Spannungsquelle liefert eine Spannung von $U_0 = 230$ V. Für den Betrieb eines Radiogerätes
sind aber nur 20 V erforderlich.

Verwenden Sie einen Transformator für die Spannungsreduktion und berechnen Sie die Anzahl
der Sekundärwindungen, wenn die Primärspule $N_1 = 460$ Windungen hat!

Lösung

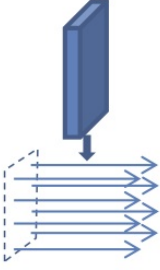
Es gilt $\frac{U_0}{U_{\text{ger}}} = \frac{N_1}{N_2} \quad \longrightarrow \quad N_2 = \frac{N_1 \cdot U_{\text{ger}}}{U_0} = \frac{460 \cdot 20}{230} = 40$.

Die Sekundärspule braucht 40 Windungen.

Vergleich: Potentiometerschaltung und Transformator

Potentiometerschaltung	Transformator
<ul style="list-style-type: none"> • arbeitet mit Gleich- und Wechselstrom • Spannung nur verkleinern • Verluste sind die Voraussetzung für die klei- nere Spannung 	<ul style="list-style-type: none"> • arbeitet nur mit Wechselstrom • Spannung verkleinern und auch vergrößern • Verluste sind nicht Voraussetzung für seine Funktion

6.4 Aufgaben

- (6.1) Geben Sie einen kurzen Überblick über diamagnetische, paramagnetische und ferromagnetische Stoffe. Nennen Sie die wichtigsten Eigenschaften und Beispiele!
- (6.2) Durch die gestrichelte Fläche $A = 0,1 \text{ m}^2$ läuft ein Feld. Wir bringen einen Körper (abgebildeter Quader) in das Feld. Für diesen Körper gilt: $\epsilon_r = 5$, $\mu_r = 1,005$.
- a) Berechnen Sie die Feldstärke im Vakuum!
- b) Berechnen Sie die Feldstärke E_r im Körper für den Fall, dass das Feld ein elektrisches Feld E ist!
- c) Berechnen Sie die Feldstärke B_r im Körper für den Fall, dass das Feld ein elektrisches Feld B ist! Ist der Körper aus dia-, para- oder ferromagnetischem Material?
- 
- (6.3) a) Wie groß ist die magnetische Flussdichte in einer 60 cm langen, mit Luft gefüllten Spule mit 1000 Windungen beim Erregerstrom 0,2 A?
- b) Wie groß wird sie, wenn man die Spule mit Eisen (relative Dielektrizitätszahl = 1000) ausfüllt?
- (6.4) Ein Transformator, der in einem Radio verwendet wird, reduziert einen Wechselstrom von 230 V auf einen Wechselstrom von 9 V. Die Sekundärspule besitzt 30 Windungen und das Radio braucht 400 mA Strom.
- a) Berechnen Sie die Anzahl der Windungen in der Primärspule!
- b) Berechnen Sie den Strom in der Primärspule!
- c) Wie hoch ist die transformierte Leistung?
- (6.5) Der Betrieb eines elektrischen Gerätes erfordert eine Wechselspannung von 5 V und 50 Hz. Es steht nur die Netzspannung von 230 V zur Verfügung.
- a) Womit kann man die Netzspannung reduzieren?
- (i) mit einem Transformator (ii) mit einem Vorwiderstand (Potentiometerschaltung)
- (iii) mit beiden Möglichkeiten (iv) mit keiner der beiden Möglichkeiten.
- Begründen Sie ihre Antwort und zeichnen Sie die Schaltungen für beide Möglichkeiten!
- b) Angenommen man könnte einen Transformator verwenden, der 1000 Primärwindungen hat. Wie viele Sekundärwindungen muss er haben und welche Verluste gibt es dabei?
- c) Angenommen man könnte einen Vorwiderstand verwenden. Zeichnen Sie die Schaltung! Wie groß muss der Vorwiderstand sein? Wie groß ist der Verlust am Vorwiderstand?
- (6.6) Die Stromstärke in der Primärspule eines Trafos in 0,3 A, die Spannung an den Enden der Spule 230 V. Die Stromstärke in der Sekundärspule beträgt 4,8 A, die Spannung an der Spule 12 V. Wie groß ist der Wirkungsgrad dieses Transformators?
- (6.7) Ein Transformator nimmt 55 W Leistung auf und bildet bei einem Wirkungsgrad von 92% ausgangseitig eine Spannung von 16V. Wie groß ist der Sekundärstrom?
- (6.8) Eine Glühlampe hat die Anschlusswerte 6 V und 5 W. Um sie an einer 12 V-Spannungsquelle betreiben zu können, ist ein Vorwiderstand nötig.
- a) Zeichnen Sie einen entsprechenden Schaltplan!
- b) Berechnen Sie den benötigten Vorwiderstand!

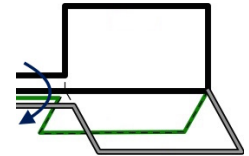
7 Energieversorgung mit elektrischem Strom

7.1 Drehstrom (Dreiphasenstrom)

Der Drehstrom ist ein Wechselstrom mit drei Phasen (stromführende Leitungen). Drehstrom kann im Haushalt zum Beispiel beim Kochherd vorkommen und Motoren mit grösserer Leistung arbeiten ebenfalls mit Drehstrom.

7.1.1 Allgemeines Prinzip

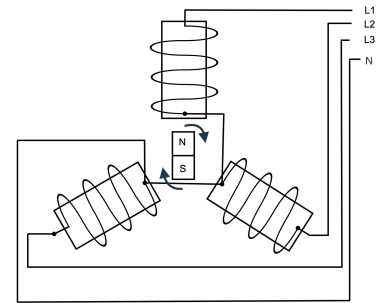
Der Begriff Drehstrom leitet sich von der Erzeugung ab. Man ordnet drei Leiter-schleifen im Winkel von je 120° an, die dann in einem Magnetfeld gedreht werden. Ein gemeinsames Leiterstück bildet die Drehachse und heisst Mittelpunktsleiter oder Neutralleiter. Durch die Drehung im Magnetfeld entsteht in jeder Leiter-schleife ein Wechselstrom. Die drei Ströme sind gegeneinander phasenverschoben.



Man nennt die drei entstehenden Wechselströme auch Phasen. Im Mittelpunktsleiter fließt zu keiner Zeit ein Strom, da sich die drei Spannungen dort zu jedem Zeitpunkt zu Null addieren.

7.1.2 Reale Ausführung

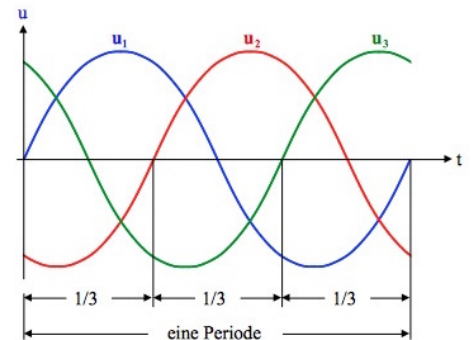
Beim realen Drehstromgenerator werden drei Spulen im 120° -Winkel rund um ein sich drehendes Magnetfeld angeordnet, denn für die Induktion ist es egal, ob der Leiter oder das Feld bewegt wird. Dadurch entstehen durch Induktion drei um 120° phasenverschobene sinusförmige Wechselspannungen. Die Phasenverschiebung von 120° entspricht jeweils einem Drittel der Periode.



Beim Drehstrom werden vom Erzeuger drei Phasen geliefert, mit einer Spannung von 230 V (Effektivwert) gegenüber dem neutralen Leiter N . Diese Spannungen werden als Sternspannung bezeichnet $U_{\text{stern}} = 230 \text{ V}$. Die Phasen werden mit L_1 , L_2 und L_3 bezeichnet.

Der Effektivwert der Spannung zwischen zwei Phasen (Dreieckspannung) beträgt $U_{\text{dreieck}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{stern}} = 400 \text{ V}$.

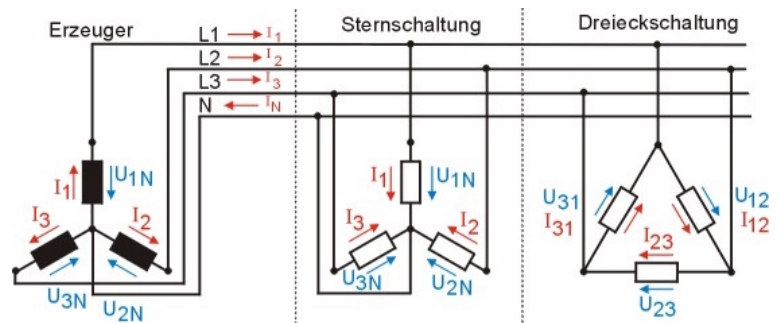
Es gibt nun verschieden Arten, wie Verbraucher mit den drei Phasen L_1 , L_2 , L_3 und dem Neutralleiter N verbunden werden.



7.1.3 Sternschaltung

Wenn drei Verbraucher jeweils mit einer Phase und mit dem Neutralleiter verbunden werden, spricht man von einer Sternschaltung. Jeder Verbraucher hat dann eine Effektivspannung von $U_{\text{eff}} = 230 \text{ V}$. Der Neutralleiter wird bei dieser symmetrischen Situation nicht mit Strom belastet, da sich dort die Ströme der drei Verbraucher gegenseitig aufheben.

Die Sternschaltung wird für den Anlauf eines Motors verwendet. Die Leistung welche in der Sternschaltung erbracht werden kann ist geringer als in der Dreieck-Schaltung.

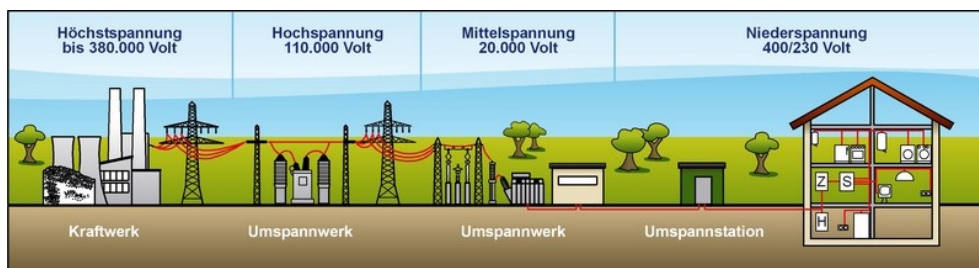


7.1.4 Dreieckschaltung

Eine Dreieckschaltung bedeutet, dass drei Verbraucher jeweils mit zwei Phasen (und nicht mit dem Neutralleiter) verbunden werden. Jeder Verbraucher bekommt damit die Effektivspannung von 400 V, so dass die Gesamtleistung bei gleicher Stromstärke in den Verbrauchern um den Faktor $\sqrt{3}$ höher ist. Die Dreieckschaltung wird für den laufenden Betrieb eines Motors verwendet. Der Motor kann in der Dreieckschaltung seine volle Kraft entwickeln.

7.2 Der Weg des Stromes vom Kraftwerk zum Verbraucher

Die Versorgung der Haushalte und der Industrie mit elektrischer Energie erfolgt im Allgemeinen mit Wechselstrom der Frequenz mit $f = 50$ Hz, außerhalb der Haushalte meist in der Form von Dreiphasen-Wechselstrom (Drehstrom). Die Eisenbahn bildet hier eine Ausnahme, denn sie wird mit 16,7 Hz betrieben. Drehstrom kann man gut transformieren. Drehstrommotoren arbeiten ebenfalls sehr effizient. Straßenbahn und U-Bahn fahren allerdings meist mit Gleichstrom, da Gleichstrommotoren besser beschleunigen können.



7.2.1 Energieerzeugung durch Kraftwerke

Im Kraftwerk wird der Strom erzeugt. Im Kraftwerk befindet sich ein Drehstromgenerator, der entweder von einer Dampfmaschine, von Wasserkraft oder von einem Dieselmotor angetrieben wird.

Es gibt verschieden Arten von Kraftwerken:

Wasserkraftwerke: Ein Wasserkraftwerk erzeugt durch die Energie des Wassers Strom.

Man unterscheidet Laufkraftwerke und Speicherkraftwerke. Laufkraftwerke benutzen die Wasserkraft eines Flusses, sie sind immer in Betrieb, weil das Wasser des Flusses immer in Bewegung ist. Sie werden daher bevorzugt für die Erzeugung einer elektrischen Dauerleistung verwendet, d.h., für eine Leistung, die in einem bestimmten Gebiet immer unabhängig von Tages- oder Jahreszeit benötigt wird. Es wäre unsinnig, sie abzuschalten.

Speicherkraftwerke benutzen die potentielle Energie, die im Wasser eines Stausees gespeichert ist. Man kann sie leicht anschalten, wenn man sie braucht und ausschalten, wenn man sie nicht braucht. Sie werden daher gerne für den Spitzenbedarf (das ist der sehr hohe Stromverbrauch zu bestimmten Zeiten, z.B.: in der Früh oder zu Mittags) betrieben.

Man baut oft zwei oder mehrere (tiefer gelegene und höher gelegene) Speicherkraftwerke in einem Tal. Wenn zuviel Strom aus den Laufkraftwerken der Flüsse zur Verfügung steht (meist im Sommer), werden mit dieser Energie die höheren Stauseen wieder gefüllt, indem man das Wasser von den tieferen Seen hinauf pumpt.

Wärme- und Dampfkraftwerke: Bei einem Wärmekraftwerk wird Wärme in elektrische Energie umgewandelt. Zunächst wird die Wärme in kinetische Energie umgewandelt und erzeugt dann durch den Generator elektrischen Strom. Bei einem Dampfkraftwerk wird Energie durch eine Dampfturbine erzeugt, die mithilfe von Wasserdampf angetrieben wird. Im Kohlekraftwerk oder Ölkraftwerk wird Wärmeenergie durch Verbrennung der wertvollen Rohstoffe Kohle oder Erdöl erzeugt.

Diese Wärmeenergie wird zur Erzeugung von Wasserdampf verwendet, der dann die Turbine in einem Generator antreibt.

Atomkraftwerke: Bei einem Kernkraftwerk wird die für die Dampferzeugung benötigte Wärme nicht durch fossile Brennstoffe (Öl, Gas, Kohle) erzeugt, sondern durch die im Kernreaktor ablaufenden Kernspaltungen der radioaktiven Elemente Uran oder Plutonium bereitgestellt. Das Grundprinzip basiert darauf, dass die bei Kernspaltungen (schwere Atomkerne spalten sich in zwei Teile) freiwerdende Energie größtenteils als Wärme abgegeben wird, welche über die Dampferzeugung in elektrische Energie umgesetzt werden kann.

Windkraftwerke: Bei der Energieerzeugung aus Windkraft handelt es sich gewissermaßen um eine kostenfreie Energie, da ihre Nutzung keinerlei externen Energieträgern wie Kohle, Öl oder Gas bedarf. Somit stellt die Windenergie eine umweltschonende Alternative der künftigen Energiegewinnung dar.

Die kinetische Energie der Windströmung wirkt auf die Rotorblätter und führt so zu einer Drehbewegung des Rotors. Aus dieser Rotationsenergie wird ein Generator gespeist, der elektrische Energie erzeugt.

Gezeitenkraftwerke: Ein Gezeitenkraftwerk nutzt die Energie des sich ändernden Wasserspiegels bei Ebbe und Flut und erzeugt durch deren Strömung über Turbinen Strom.

Gezeitenkraftwerke funktionieren mithilfe von einfließendem und ausströmendem Meerwasser, je nachdem ob gerade Ebbe oder Flut herrscht. Die Meeresbucht wird von dem Meer getrennt, so dass nun auf einer Seite der Wasserspiegel niedriger ist als auf der anderen Seite. Das Wasser fließt nun von dem höheren in den niedrigeren Bereich und durch die dabei entstehende Strömung werden Turbinen angetrieben.

Die Nachteile allerdings liegen darin, dass Ebbe und Flut nur etwa alle 12 Stunden auftreten und dass das Salzwasser die Turbinen sehr stark angreift, weswegen diese regelmäßig ausgetauscht werden müssen.

Solkraftwerke: Das Solarkraftwerk ist ein Kraftwerk, welches durch die Energie der Sonne Strom oder Wärme erzeugt.

Thermische Solaranlagen: Die thermischen Solaranlagen dienen nicht der Stromerzeugung, sondern der Erzeugung von Wärme für z.B. Heizungen oder Trinkwasser. Auf speziell beschichtete Kollektoren scheint die Sonne und erwärmt diese. In diesen Kollektoren befinden sich Rohre mit einer Flüssigkeit oder einem Gas, welches durch die Sonneneinstrahlung erhitzt wird.

Photovoltaikanlagen: In diesen Anlagen wird direkt aus der elektromagnetischen Energie der Sonne Strom erzeugt. Dies geschieht in hauchdünnen Schichten, die halbleitend sind. Innerhalb dieser Schichten werden negative und positive Ladungen getrennt und durch eine elektrisch leitende Verbindung kann nun Strom fließen.

Thermische Solarkraftwerke: Hier wird mithilfe der Sonne indirekt Strom erzeugt. Die Sonne scheint dabei auf große Spiegel und erwärmt eine Flüssigkeit, welche eine Turbine antreibt, die über einen angeschlossenen Generator Strom erzeugt.

Strom aus der Sonne zu gewinnen ist eine grossartige Variante. Die Sonne produziert soviel Energie, dass solche Kraftwerke immer genug Strom oder Wärme erzeugen können, ohne in Knappheit zu geraten.

Atomkraftwerke und Dampfkraftwerke brauchen eine längere Zeit bis sie eingeschaltet werden können.

7.2.2 Energietransport durch Leitungen

Die elektrische Energie muß vom Kraftwerk zu den Verbrauchern transportiert werden. Dazu werden Überlandleitungen verwendet. Die meisten Hochspannungsleitungen sind Freileitungen mit an hohen Masten aufgehängten Leitern. Es gibt aber auch Hochspannungs-Erdkabel, die im Boden verlegt werden, sowie Seekabel für den Einsatz am Meeresboden.

Man unterscheidet:

- Höchstspannung von 220 kV, 380 kV, 500 kV, 700 kV, 1150 kV
Großraumversorgung, Verbundnetzen zum überregionalen Energieaustausch, Anschluss von Großkraftwerken
- Hochspannung von 60 kV, 110 kV
Versorgung kleinerer Städte und die Überlandversorgung, Anschluss kleinerer Kraftwerke
- Mittelspannung von 3 kV, 6 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV, 30 kV
Versorgung von einzelnen Stadtteilen oder mehreren Ortschaften und bei Großabnehmern wie Industriebetrieben
- Niederspannung von 230 V, 400 V
Versorgung von Haushalten

Hochspannungsleitungen werden zur Übertragung elektrischer Energie über große Entfernungen eingesetzt. Sie werden mit besonders hohen elektrischen Spannungen betrieben.

So kann eine hohe elektrische Leistung trotz moderater Stromstärke übertragen werden, und dies wiederum erlaubt die Verwendung dünnerer Kabel bei trotzdem nicht allzu hohen Energieverlusten. Tendenziell wird die Spannung umso höher gewählt, je höher die übertragene Leistung und die länger die Leitung ist.

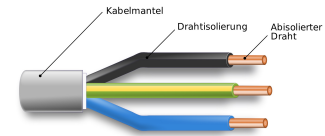
Warum braucht man hohe Spannungen?

Die elektrische Leistung, die vom Kraftwerk zur Verfügung gestellt wird, soll möglichst ohne Verluste beim Verbraucher ankommen. Die Leistung ist $P = U \cdot I$. Für große Leistung kann man entweder den Strom I groß machen: Je größer die Stromstärke I , desto dickere Leitungen braucht man, damit mehr Ladungen fließen können und desto größer sind auch die Wärmeverluste durch die Reibung der bewegten Ladungen. Das ist nicht sehr gut. Oder man kann die Spannung U groß machen: Je größer die Spannung, desto kleiner wird der Strom I und desto kleiner werden diese Reibungsverluste. Deswegen werden alle Ströme nach dem Kraftwerk auf Hochspannung hinauf-transformiert. In der Hochspannungsleitung fließen dann sehr schwache Ströme bei sehr hohen Spannungen (bis 400 kV) über das Land zu den Städten. Dort werden sie in mehreren Stufen wieder zurück transformiert.

Die Versorgung der Häuser erfolgt mit 400 V Drehstrom. In jedem Haus gibt es Verteilerkästen. In diesen werden für drei Verbraucherhaushalte je 230 V Wechselstrom abgegriffen.

7.2.3 Energieverbrauch im Haushalt

Für Strom im Haushalt werden gewöhnlich 230 V benötigt. Dafür reicht eine Phase der vom Kraftwerk ankommenden Leitungen aus. Alle Kabel im Haushalt bestehen daher aus drei Drähten



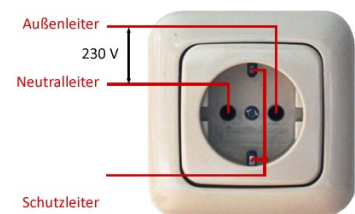
- schwarzes (braunes, graues) Kabel: stromführende Phase (L_1 , L_2 oder L_3)
- blaues Kabel: Neutralleiter (manchmal auch Nullleiter genannt) N
- grün-gelbes Kabel: Erdung

Alle Geräte und Verbraucher im Haushalt sind parallel geschaltet.

Die Steckdose

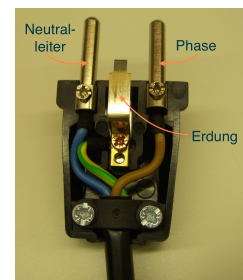
Die Steckdose hat drei verschiedene Kontakte:

- Die Phase (Außenleiter) ist mit dem Stromgenerator verbunden.
- Der Neutralleiter leitet den Strom zum Generator zurück.
- Die Erdung (Schutzleiter) ist mit der Erde verbunden und leitet fehlerhafte Ströme ab.



Der Stecker

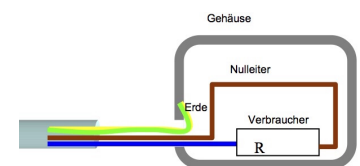
Die meisten Stecker sind sogenannte Schuko-Stecker (Schutz-Kontakt Stecker). Dieser Stecker besitzt zwei runde Kontaktstift für die Phase (Außenleiter, braun), den Neutralleiter (blau) und einen Schutzkontakt für die Erdung (gelb-grün). Der Schutzkontakt soll Fehlerströme ableiten, daher muss die Verbindung mit dem Schutzkontakt zuerst erfolgen. Beim Schuko-Stecker wird dies über Kontaktflächen an der Steckerseite und die zugehörigen Kontaktfedern der Dose gewährleistet.



Der Verbraucher

Ein elektrischer Verbraucher ist ein elektrisches Bauelement oder ein Elektrogerät, in der elektrische Energie in andere Energieformen umgewandelt wird. Der elektrische Strom wird dabei jedoch nicht verbraucht, denn er fließt in einem Stromkreis zurück zum Stromerzeuger. Es wird die die Energie verbraucht, die im Strom steckt.

Der Verbraucher ist einfach ein Widerstand R in einem Stromkreis, der mit einer Phase und dem Neutralleiter verbunden ist. Das Gehäuse des Gerätes ist mit der Erdung verbunden. Diese kann fast beliebig viele Ladungen aufnehmen und an die Erde abgeben.



Die Erdung

Sie verbindet das Gehäuse eines elektrischen Gerätes (Verbrauchers) mit der Erde (dem Erdreich). Wenn die Phase durch einen Schaden des Gerätes mit dem Gehäuse in Kontakt kommt, wird der Strom vom Gehäuse sofort über die Erde abgeleitet und kann nicht durch einen Menschen oder auf einem anderen unerwünschten Weg fließen. Sie schützt also bei elektrischen Anlagen und Geräten bei Auftreten eines Fehlers Personen und Tiere vor gefährlich hohen Berührungsspannungen.

Die Blitzschutzterdung soll den Blitzstrom sicher ins Erdreich abführen, um Gebäude zu schützen.



Der Kurzschluß

Das ist die Verbindung zweier Punkte mit verschiedenem Potential durch einen Leiter mit fast keinem Widerstand, $R \approx 0$. Im Haushalt versteht man darunter die Verbindung von Phase und Neutralleiter mit einem sehr kleinen Widerstand. Bei einem Kurzschluss fließt sehr viel Strom, welcher zu einer starken Erhitzung und damit zur Zerstörung des Systems (z.B. durch Brand) führen kann.

Ein Kurzschluss kann entstehen, wenn:

- man die beiden Polen einer elektrischen Quelle direkt miteinander verbindet (Verbindung von Phase und Nulleiter der Steckdose durch ein Stück Metall)
- die Isolierung von Kabeln oder einzelnen Leitungen schadhaf ist und sich die elektrischen Leiter berühren
- eine Überbrückung in einem Gerät auftritt
- Wasser in ein Gerät gelangt (z.B. in einem schadhafem Geschirrspüler)

Ein Kurzschluß bei einer Batterie ist nicht gefährlich, da die Ströme eher gering sind. Allerdings wird die Batterie innerhalb kurzer Zeit entladen, wodurch sie wertlos geworden ist.

Die Sicherung

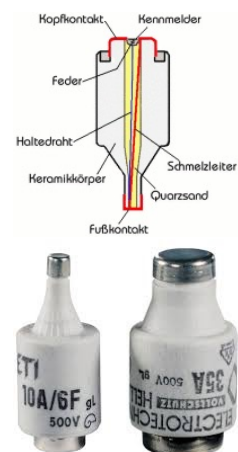
Grundsätzlich sollte man natürlich Kurzschlüsse vermeiden. In der Praxis geschehen Kurzschlüsse jedoch immer mal wieder. Um zu große Ströme und damit Schäden zu vermeiden, werden in Stromkreise Sicherungen eingebaut. Starke Ströme entstehen entweder durch zu viele Verbraucher, durch Verbraucher mit zu kleinem Widerstand oder durch Kurzschlüsse. Sie können die Kabel erhitzen. Es können Brände entstehen oder die Isolation von Leitern zerstört werden, was zu neuerlichen Kurzschlüssen oder gesundheitlichen Gefahren führt. Sicherungen sollen den Stromkreis bei zu starken Strömen unterbrechen. Es gibt Sicherungen bis 10 A, 16 A, 20 A, 25 A, und 35 A.

Es gibt folgende Sicherungstypen:

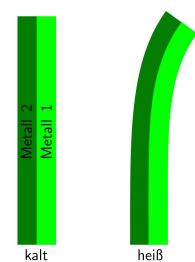
- Schmelzsicherungen:
Das sind Widerstände aus einem sehr dünnen Draht mit niedrigem Schmelzpunkt in einem Keramikgehäuse. Bei zu starkem Strom schmilzt der Draht und der Stromkreis ist unterbrochen. Es gibt Sicherungen, die bei verschiedenen Stromstärken schmelzen.

Beim Aufbau des Stromkreises wird eine kurze Stelle im Stromkreis eingefügt, die bei hohem Strom schnell durchbrennt. So soll verhindert werden, dass ein Verbraucher (Fernseher, Lampe etc.) zerstört wird.

Der Nachteil: Ist die Sicherung durchgebrannt, muss eine neue eingebaut werden.



- Bimetallsicherungen:
Sie bestehen aus zwei Metallen mit verschieden starker Wärmeausdehnung. Bei Erwärmung dehnt sich eine der beiden Metallschichten stärker aus als die andere. Dadurch verbiegt sich der Leiter und unterbricht den Stromkreis.

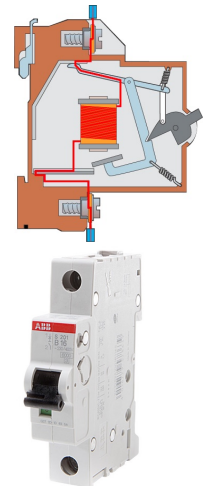


- Sicherungsautomaten:

Schmelzsicherungen werden immer mehr von Sicherungsautomaten verdrängt, bei denen man lediglich einen Hebel umlegen oder einen Knopf drücken muss, wenn sie herausgesprungen sind.

Ein Sicherungsautomat hat zwei die Sicherung auslösende Elemente: Bei kurzzeitigen zu großen Strömen löst ein Elektromagnet den am Kippschalter aus und unterbricht dadurch den Stromkreislauf (Magnetsicherung). Bei geringfügiger aber dauerhafter Überschreitung der Nennstromstärke löst das Bimetall den Kippschalter aus und unterbricht ebenfalls den Stromkreis (Bimetallsicherung).

Der Vorteil: Nach dem die Sicherung "raus geflogen" ist, kann diese wieder eingelegt werden und muss nicht durch eine neue Sicherung ersetzt werden.



WICHTIG:

Nach dem Auslösen einer Sicherung: Immer zuerst den Fehler suchen und beseitigen! Dann die (neue) Sicherung einbauen.

Der Fehlerstrom-Schutzschalter

Fehlerstrom-Schutzschalter (RCD, von engl. Residual-Current Device) wurden früher auch als FI-Schalter bezeichnet ("F" für Fehler und "I" für den elektrischen Strom).

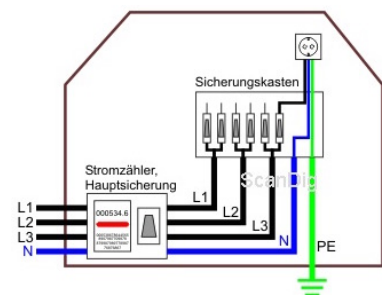
Der Fehlerstrom-Schutzschalter löst bei Überschreitung eines bestimmten Fehler-/Differenzstroms aus und schaltet den betroffenen Stromkreis ab. Differenzströme treten auf, wenn durch den menschlichen Körper oder über eine schadhafte Isolierung ein Fehlerstrom fließt. Dazu vergleicht der Fehlerstrom-Schutzschalter die Höhe des hin- mit der des zurückfließenden Stromes. Der Strom, der zum Verbraucher fließt, muss genauso groß sein wie der Strom, der vom Verbraucher zurückfließt. Ist dies nicht der Fall, so schaltet der Schutzschalter den Strom ab.

Im Gegensatz dazu dienen Sicherungen hauptsächlich dem Schutz von Geräten und Installationen und bieten deshalb keinen hinreichenden Schutz vor Stromschlag. Die Sicherung schützt die Leitung, die Fehlerstrom-Schutzeinrichtung den Menschen.

Das Haus und die Sicherungen

Ein Hausanschluss besteht typischerweise aus 4 Leitungen, den drei Phasen L_1 , L_2 und L_3 sowie dem Neutraleiter N . Die drei Leiter kann man als Stromquellen bezeichnen, während der Nullleiter eine Art Abfluss darstellt.

Im Keller oder vor dem Haus befindet sich der Elektroanschluss. Ein Stromzähler zählt den Strom, der von den drei Phasen L_1 , L_2 und L_3 kommt, durch die Verbraucher im Haus durchfließt und über den Neutraleiter zurückfließt. Der Hauptsicherungsautomat schützt die gesamte Elektroinstallation des Hauses. Nachdem der Strom den Hauptzähler und die Hauptsicherung durchlaufen hat, gelangen die drei Stromphasen in den Sicherungskasten, wo die drei SZuleitungen" L_1 , L_2 und L_3 gleichmäßig auf die einzelnen Räume und Verbraucher aufgeteilt werden. Einzelne Sicherungsautomaten sichern die einzelnen Stromkreise in einem Haus gegen höhere Stromstärken ab.



WICHTIG:

Lebensgefährlich sind für den menschlichen Körper Ströme ab etwa 50 mA (Herzkammerflimmern). Der menschliche Körper hat einen Widerstand (von Hand zu Hand oder von Hand zu Fuss) von ca. 1 k Ω . Daraus ergibt sich, dass Spannungen ab 50 V lebensgefährlich sind!

Beispiel (7.1)

Ein Stromkreis hat eine Spannung von 230 V. Es sind angeschlossen: 2 Glühlampen je 100 W, 3 Glühlampen je 40 W, 1 Radio 70 W, 1 Fernsehgerät 260 W, 1 Bügeleisen 1000 W.
Mit welcher Sicherung muss der Stromkreis abgesichert werden?

Lösung

Die Gesamtleistung ist $P_{\text{ges}} = 1650 \text{ W}$
Der fließende Strom ergibt sich zu $I = 7,2 \text{ A}$
Damit braucht man als Absicherung eine 10 A-Sicherung.

Beispiel (7.2)

Eine Hausfrau erhält einen Bügelautomaten mit 2,2 kW Leistungsaufnahme. Es wird festgestellt, dass außer diesem Gerät noch eine Lampe mit 100 W, drei Lampen mit je 60 W und ein Radio mit 80 W im gleichen Stromkreis liegen. Der Stromkreis ist mit 10 A bei 230 V Spannung abgesichert. Dürfen alle Geräte gleichzeitig eingeschaltet werden?

Lösung

Gesamtleistung $P = 2560 \text{ W}$
Wenn alle Verbraucher gleichzeitig angeschlossen sind, fließen 11,13 A, daher ist der Stromkreis überlastet und es dürfen nicht alle Geräte gleichzeitig betrieben werden.

7.3 Aufgaben

- (7.1) a) Mit welcher Stromart werden Österreichs Haushalte versorgt?
b) Jemand möchte in seiner Wohnung einen Drehstrommotor mit 400 V betreiben. Ist dies in Österreich technisch möglich?
- (7.2) a) Was hat der Transport von elektrischer Energie mit Leistung zu tun?
b) Warum werden beim Energietransport sehr hohe Spannungen benutzt?
- (7.3) a) Welche Kraftwerke verwendet man für sogenannte Spitzenleistungen?
b) Welche Form der Energie benutzen Speicherkraftwerke?
c) Warum bestehen Speicherkraftwerke meist aus einer Kette von mehreren Stauseen?
- (7.4) a) Was haben Kernkraftwerke und Dampfkraftwerke in Bezug auf die Energieumwandlung gemeinsam?
b) Was ist der wesentliche Unterschied zwischen Fluß- und Speicherkraftwerken?
- (7.5) In einem Kohlekraftwerk werden pro Stunde 200 t Steinkohle verbrannt. Das entspricht einer thermischen Energie von $W_{th} = 1600 \text{ kWh}$. Die in den Generatoren erzeugte elektrische Energie beträgt $W_{el} = 640 \text{ kWh}$.
Berechnen Sie den Wirkungsgrad des Kraftwerks!
- (7.6) Warum verwendet man außerhalb der Haushalte Drehstrom und nicht gewöhnlichen Wechselstrom?

(7.7) In einem Haushalt sind vier Stromkreise eingebaut.

Erster Stromkreis (230 V): 5 Glühlampen je 60 W, 3 Glühlampen je 100 W, 1 Heizofen 600 W, 1 Rundfunkgerät 44 W

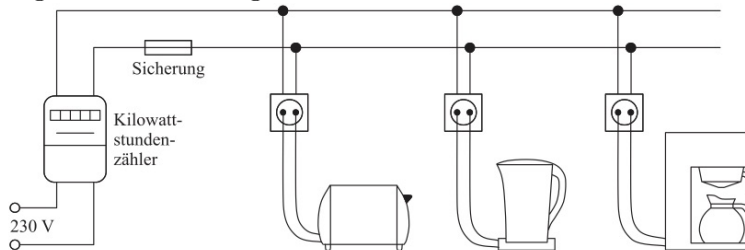
Zweiter Stromkreis (230 V): 1 Waschmaschine 3,2 kW

Dritter Stromkreis (230 V): 1 Heißwasserspeicher 6 kW

Vierter Stromkreis (230 V): 1 Geschirrspülmaschine 2,9 kW

Berechnen Sie, mit welchen Sicherungen die einzelnen Stromkreise abgesichert sein müssen!

(7.8) In einer Küche werden ein Toaster, ein Wasserkocher und eine Kaffeemaschine entsprechend der folgenden Abbildung betrieben.



a) Begründen Sie, warum an jedem Gerät die gleiche Spannung anliegt!

b) Welche Aufgabe hat die Sicherung im Stromkreis?

c) Geben Sie an, welche physikalische Größe mithilfe des Kilowattstundenzählers gemessen wird!

(7.9) Die Geräte haben folgende Typenschilder:

Toaster	Wasserkocher	Kaffeemaschine
Typ: Röstmich	Typ: Kochmich	Typ: Brühmich
230 V, 50 Hz	230 V, 50 Hz	230 V, 50 Hz
850 W	1000 W	850 W

Der Stromkreis ist mit 16 A abgesichert. Nach Rücksprache mit einem Elektroinstallateur erfährt der Wohnungsinhaber, dass eine Mikrowelle mit einer Leistung von 1200 W nicht gleichzeitig mit den anderen Geräten betrieben werden kann.

Begründen Sie diese Aussage rechnerisch!

(7.10) a) Zeichnen Sie eine Steckdose, nennen Sie die drei Kontakte und geben Sie an, womit diese verbunden sind!

b) Was geschieht, wenn Sie bei ihrer Steckdose mit einer Nadel in den Neutralleiter stechen?