

## Ergänzungen zum Kapitel „Elektrizität und Magnetismus“

### 4.7.7 Gefährdung durch Elektrizität

Wie ernst ein Stromschlag zu nehmen ist, hängt davon ab, wie groß die durch den Körper fließende Stromstärke ist, durch welche Körperteile sie fließt und wie lang die Einwirkdauer beträgt. Man kann Ströme von  $\approx 1 \text{ mA}$  spüren, während einige mA schon schmerzhaft sind. Starke Muskelkontraktionen und Herzkammerflimmern treten auf für Stromstärken, die größer als  $10 \text{ mA}$  sind. Wer mit elektrischen Geräten hantiert, sollte für eine trockene Haut sorgen. Ihr Ohmscher Widerstand beträgt zwischen  $10^4$  und  $10^6 \Omega$ . Dicke Socken und Schuhe mit einer dicken isolierenden Sohle sind auch anzuraten. Nasse Haut hingegen ( $\approx 10^3 \Omega$ ) ist einem gefährlichen Stromschlag dienlich (vermeiden Sie daher, Fön, Stereoanlage oder Toaster mit in die Badewanne zu nehmen).

Betrachten wir Abbildung 1, wo jemand barfuß und mit feuchter Hand zufällig an einen Draht gerät, dessen elektrisches Potential um  $230 \text{ V}$  höher als das Potential der Erde liegt. Der Stromkreis ist über die Person geschlossen. Mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes können wir den Strom durch dieses Opfer abschätzen:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{230 \text{ V}}{1000 \Omega} = 230 \text{ mA}.$$

Diese Stromstärke kann tödlich sein.

Um vor Stromschlägen zu schützen, dient der sogenannte Schutzkontakt. In Abbildung 2 ist die Funktionsweise illustriert. Ein elektrisches Gerät ohne Schutzkontakt ist harmlos, so lange der Strom durch den nicht defekten Stromkreis fließt (Abbildung 2, links). Sollte ein stromführender Draht jedoch in Kontakt mit dem Gehäuse kommen (dies kann beispielsweise durch eine beschädigte Isolierung geschehen), dann liegt zwischen dem Gerät und der Erde nach dem Einschalten eine Spannung, die, wie schon weiter oben gezeigt, beim Berühren zu einem gefährlichen Stromschlag führen kann (Abbildung 2, Mitte). Der Schutzkontakt ist eine leitende Verbindung des Gehäuses mit der Erde. Nach dem Einschalten fließt der Strom direkt über das Gehäuse zur Erde und stellt keine Gefahr mehr dar. Typischerweise springt beim Einschalten eines mit einem Schutzkontakt ausgestatteten defekten Gerätes die Sicherung heraus.

### 4.11.4 Kondensator im Wechselstromkreis

Legen Sie einen Kondensator in einen Gleichstromkreis, dann gibt es einen kurzen Stromstoß bis der Kondensator geladen ist; danach fließt kein Strom mehr. Die Situation ändert sich erheblich, schalten sie einen Kondensator in einen Wechselstromkreis. Jetzt werden die Platten des Kondensators im Takt der Wechselspannung ständig umgeladen, und in den Leitungen fließt der Umladestrom. Mit anderen Worten: Der Kondensator gibt die beim Aufbau seines elektrischen Feldes aufgenommene Energie beim Abbau wieder her.

Betrachten wir einen Kondensator in einem Wechselstromkreis, dessen Leitungen wir als widerstandsfrei annehmen (siehe Abbildung 3a). Die Wechselspannung möge die Form  $U(t) = U_0 \sin(\omega t)$  haben. Abbildung 3b zeigt Ihnen die zugehörigen Graphen von  $U(t)$  und  $I(t)$ . Eine wichtige Erkenntnis können wir direkt ablesen: Legt man eine sinusförmige Wechselspannung  $U(t)$  an einen Kondensator, so ist der Auf- und Entladestrom  $I(t)$  ebenfalls sinusförmig. Wir erkennen außerdem, dass die Graphen von  $U(t)$  und  $I(t)$  nicht deckungsgleich sind; insbesondere

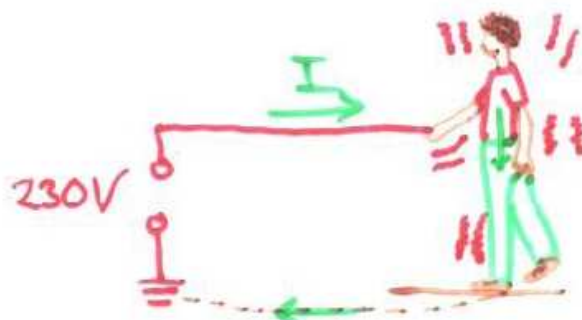


Abbildung 1: Eine Person erhält einen Stromschlag, wenn der Stromkreis über die Person geschlossen wird.

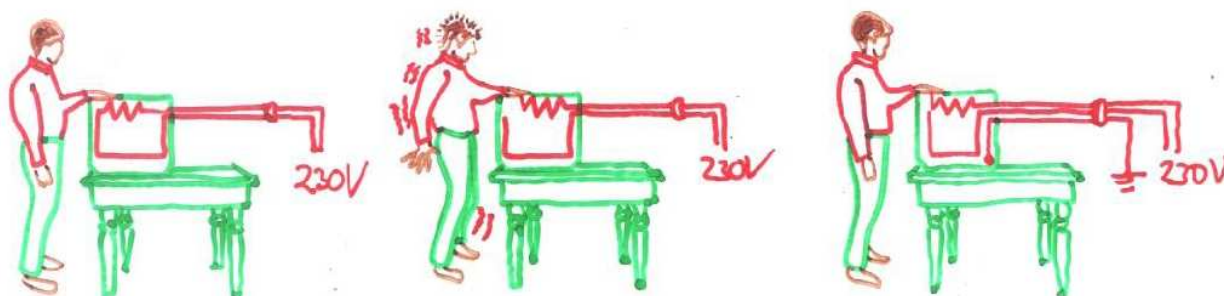


Abbildung 2: Illustration des Schutzkontakts in elektrischen Geräten.

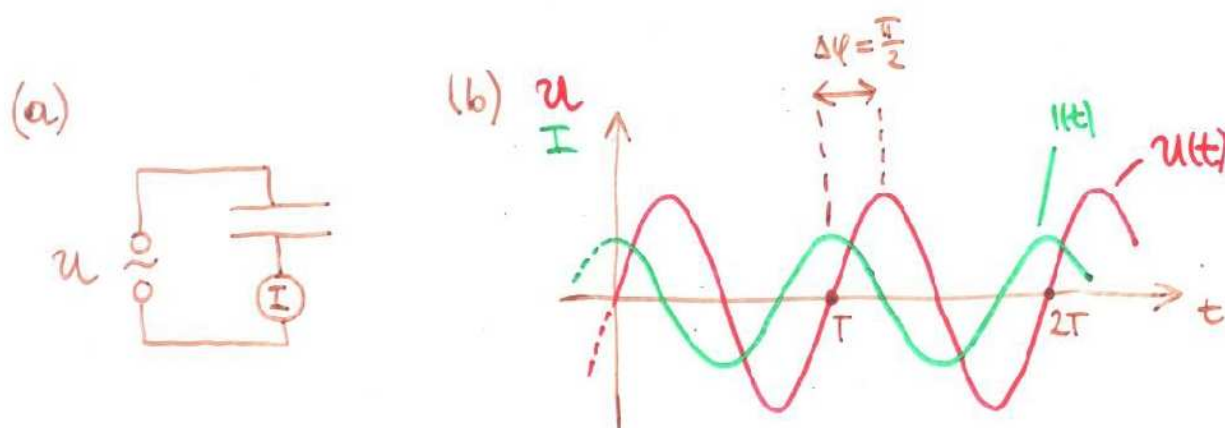


Abbildung 3: (a) Kondensator im Wechselstromkreis. (b) Spannungs- und Stromkurve: Der Strom eilt der Spannung um  $90^\circ$  in der Phase vor.

sind sie phasenverschoben. Wir wollen uns diese Phasenverschiebung plausibel machen: Bevor zwischen den Platten des Kondensators eine maximale Spannung herrscht, muss der Kondensator über einen Strom geladen werden. Im Augenblick maximaler Ladung auf den Platten (und damit maximaler Spannung zwischen den Platten), kann kein Strom fließen. Wie groß ist nun die Phasenverschiebung genau? Für die Ladung auf den Platten lässt sich schreiben:

$$Q(t) = CU(t) = CU_0 \sin(\omega t). \quad (1)$$

Damit folgt für den Strom:

$$I(t) = \dot{Q}(t) = \omega CU_0 \cos(\omega t) = I_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (2)$$

wobei die Amplitude des Stroms

$$I_0 = \omega CU_0 \quad (3)$$

ist. Hieraus schließen wir, dass der Strom der Spannung um  $90^\circ$  in der Phase voran geht oder „Kapazität: Spannung zu spät“.

Man definiert weiter den kapazitiven Blindwiderstand  $X_C$  über

$$X_C = \frac{U_0}{I_0} = \frac{1}{\omega C}. \quad (4)$$

Beachten Sie, dass  $U(t)$  und  $I(t)$  nicht dem Ohmschen Gesetz gehorchen; nichtsdestotrotz kann man aber (wie oben angegeben) den Widerstand eines Kondensators definieren. Man nennt ihn Blindwiderstand, weil die mittlere Leistung  $\langle P \rangle$  am Kondensator verschwindet: Ein Kondensator wird nicht warm. Sie sehen an der Definitionsgleichung, dass  $X_C$  für große Kreisfrequenzen  $\omega$  klein wird, während er für sehr kleine Kreisfrequenzen groß wird. Im Grenzfall verschwindender Kreisfrequenz ( $\omega = 0 \text{ s}^{-1}$ ) ist er sogar unendlich groß. Dies überrascht Sie nicht, da wir dann einen nicht geschlossenen Gleichstromkreis vorliegen haben, durch den kein Strom fließt.

#### 4.11.5 Spule im Wechselstromkreis

Lässt man durch eine Spule einen Wechselstrom fließen (siehe Abbildung ??a), dann findet man, dass der Widerstand der Spule größer ist als ihr Ohmscher Widerstand. Als Ursache hierfür betrachten wir die induzierte Gegenspannung, denn das in der Spule periodisch auf- und abgebaute magnetische Feld bedeutet eine periodische Änderung des Flusses und damit eine induzierte Spannung. Bevor wir den Zusammenhang zwischen Strom und Spannung bei der Spule mathematisch formulieren, machen wir uns den Zusammenhang am Diagramm in Abbildung 4b plausibel.

Wir finden, dass die Stromkurve der Spannungskurve um  $90^\circ$  hinterher hinkt (ganz im Gegensatz zu den Ergebnissen beim Kondensator, siehe oben). Daher merken wir uns: Legt man eine sinusförmige Wechselspannung an eine Spule, so ist der Strom auch sinusförmig. Der Wechselstrom hinkt um  $90^\circ$  der Wechselspannung in der Phase nach, wenn der Ohmsche Widerstand vernachlässigbar ist („Induktivität: Strom zu spät“). Neben der Wechselspannungsquelle ( $U(t)$ ) wirkt im Stromkreis eine weitere elektromotorische Kraft, nämlich die der induzierten Spannung ( $U_{\text{ind}}(t)$ ). Letztere ist nach dem Lenzschen Gesetz so gepolt, dass sie durch ihren Strom ihrer Ursache entgegen wirkt. Dies bedeutet beispielsweise, dass ein durch die äussere Wechselspannungsquelle im Aufbau begriffenes magnetisches Feld einen Strom induziert, der diesem Aufbau

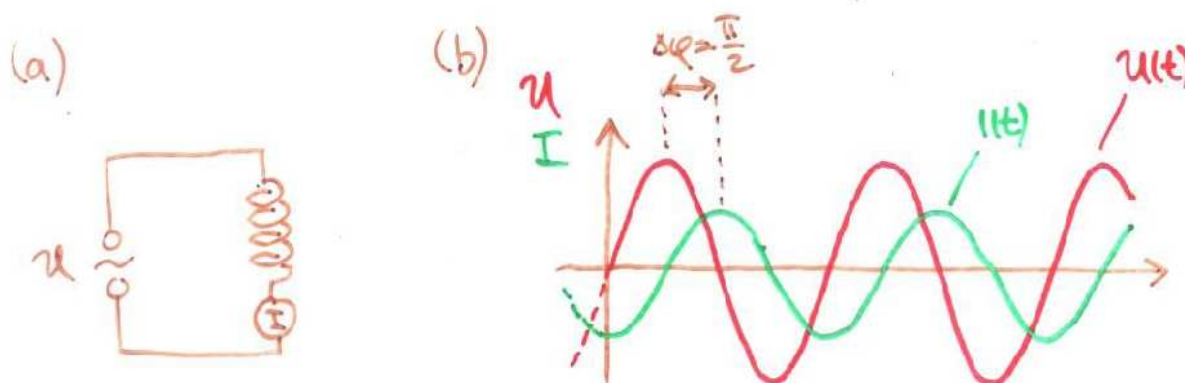


Abbildung 4: (a) Spule im Wechselstromkreis. (b) Spannungs- und Stromkurve: Der Strom hinkt der Spannung um  $90^\circ$  in der Phase nach.

entgegen wirkt. Aus diesem Grund ist eine wachsende positive Spannung mit einem wachsenden negativen Strom verbunden.

Zum Verständnis dieser Vorgänge schreiben wir den Strom im Stromkreis zu

$$I(t) = \frac{U(t) + U_{\text{ind}}(t)}{R} \Leftrightarrow RI(t) = U(t) + U_{\text{ind}}(t) \quad (5)$$

auf. Idealisierend setzen wir  $R = 0$ , da wir ausschließlich die induktiven Eigenschaften der Spule untersuchen wollen. Dann erhalten wir mit  $U_{\text{ind}} = -L\dot{I}$ :

$$0 = U(t) - L\dot{I}(t) \Leftrightarrow \dot{I}(t) = \frac{U(t)}{L}. \quad (6)$$

Setzen wir wie beim Kondensator  $U(t) = U_0 \sin(\omega t)$ , dann erhalten wir  $I(t)$  durch eine einfache Integration:

$$I(t) = \int \frac{U(t)}{L} dt = \frac{U_0}{L} \int \sin(\omega t) dt = -\frac{U_0}{\omega L} \cos(\omega t) + c, \quad (7)$$

wobei  $c$  eine Integrationskonstante ist. Schreiben wir noch  $-\cos(\omega t) = \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$ , dann sehen Sie, dass die Kurven in Abbildung 4b richtig wiedergegeben werden.

Abschließend interessieren wir uns für die Stromamplitude, die (siehe oben) gegeben ist durch

$$I_0 = \frac{U_0}{\omega L}. \quad (8)$$

Dies gibt Anlass zur Definition des induktiven Blindwiderstands:

$$X_L = \frac{U_0}{I_0} = \omega L. \quad (9)$$

Auch im induktiven Blindwiderstand entsteht keine Wärme.

## Ferromagnetismus

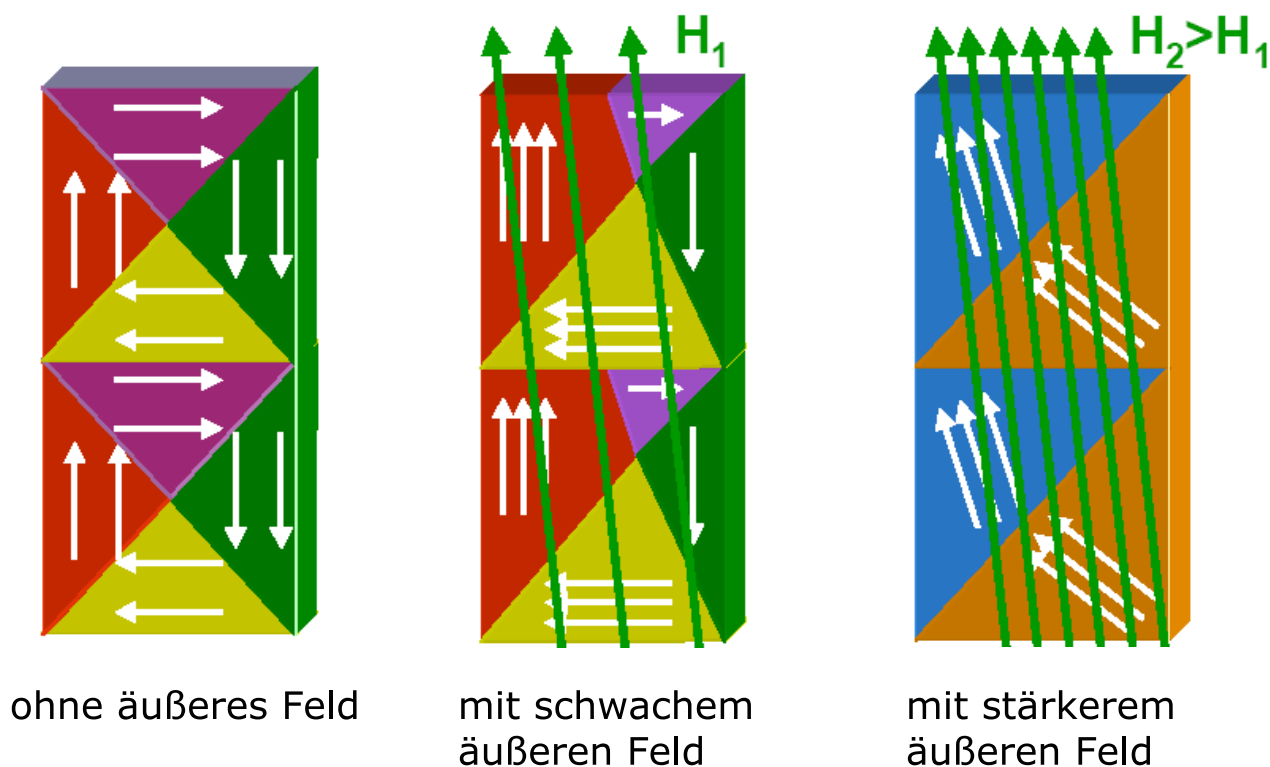


Abbildung 5: Domänen eines Ferromagneten in einem äußeren magnetischen Feld unterschiedlicher Stärke.

### 4.9.4 Magnetische Materialien

Man findet, dass man das magnetische Feld beispielsweise einer stromdurchflossenen Spule verstärken kann, wenn man sie mit einem Eisenkern füllt. Die Stärke des Feldes steigt um einen Faktor  $\mu_r$  an:

$$B = \mu_r \mu_0 n I. \quad (10)$$

Dieser Faktor heißt Permeabilitätszahl und beschreibt eine Materialeigenschaft. Wir beschränken uns in diesem Abschnitt auf die Diskussion dreier Sorten von Magnetismus und beginnen mit dem

#### Ferromagnetismus

Ferromagnetische Materialien zeichnen sich durch sogenannte Domänen aus, bei denen jede einzelne wie ein winziger Magnet wirkt. In Abbildung 5 sind links die Domänen eines Ferromagneten gezeigt, der sich nicht in einem äußeren Feld befindet. Die Pfeile geben die Richtung der Magnetisierung der Domänen an. Wie man sieht, heben sich die Magnetisierungsrichtungen

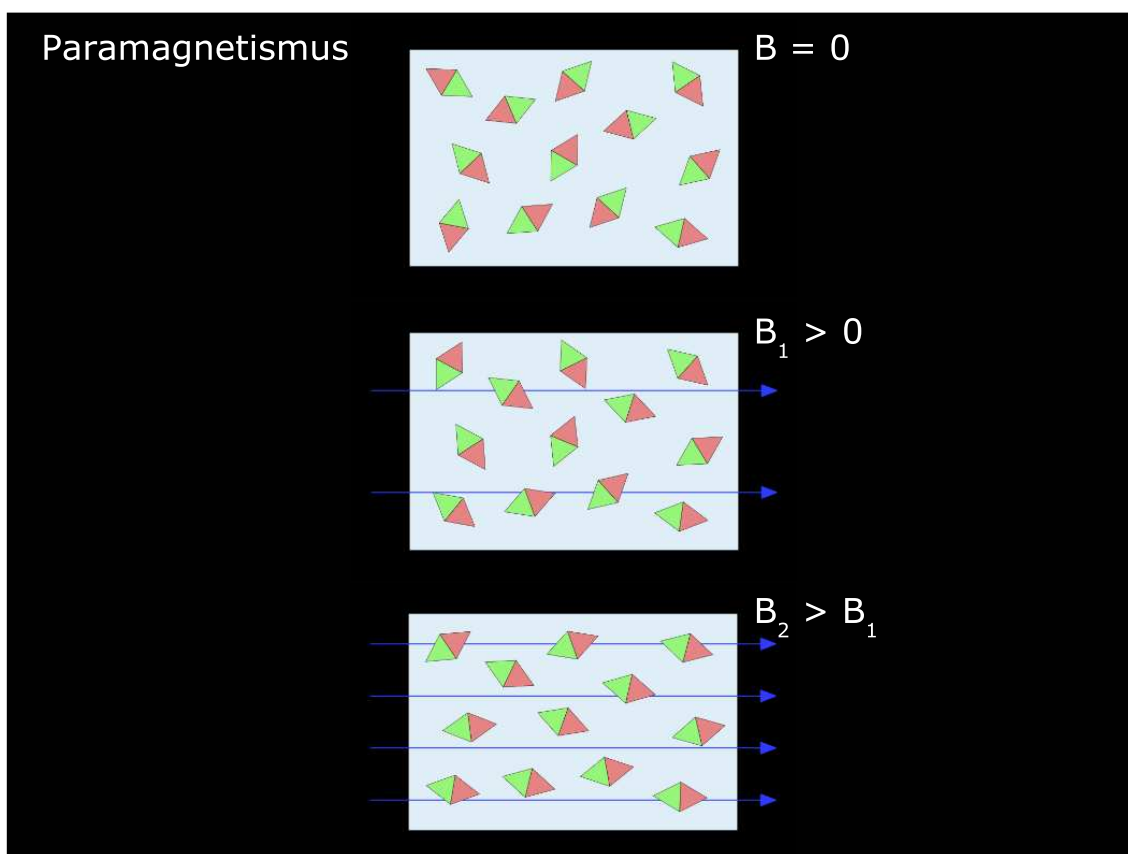


Abbildung 6: Die atomaren Magnete eines Paramagneten orientieren sich im äußeren Feld.

der Domänen im räumlichen Mittel auf – der Ferromagnet ist unmagnetisiert. Legt man nun ein äußeres magnetisches Feld an, dann orientiert sich die Magnetisierung der Domänen entlang der äußeren Feldrichtung. Domänen mit gleicher Richtung werden größer, andere Domänen werden kleiner – der Ferromagnet wird magnetisiert. Auch nach Ausschalten des äußeren Feldes bleibt die Magnetisierung des Ferromagneten erhalten. Sie kann zerstört werden durch starke mechanische Erschütterung oder durch Erhitzen über eine charakteristische Temperatur, die man die Curie-Temperatur nennt. Typische Ferromagneten sind Eisen, Cobalt und Nickel. Die Permeabilitätszahl von Ferromagneten ist viel größer als 1 ( $\mu_r \gg 1$ ).

### Paramagnetismus

Paramagneten weisen eine permanente atomare Magnetisierung auf. Im Unterschied zu Ferromagneten existieren also keine Domänen. Wie Abbildung 6 zeigt, richten sich die atomaren Magnete in einem äußeren Feld aus. Allerdings verschwindet diese Ausrichtung sofort, wenn das äußere magnetische Feld ausgeschaltet wird. Man findet für Paramagneten, dass  $\mu_r > 1$  ist. Ein typischer Paramagnet ist beispielsweise Aluminium.

## Diamagnetismus

Ein weiterer Nicht-Ferromagnet ist durch den Diamagnetismus gegeben. Hier besitzen die Atome im Gegensatz zum Paramagneten keine permanente Magnetisierung. Ein äußeres magnetisches Feld erzeugt eine atomare Magnetisierung, die dem äußeren Feld entgegengesetzt ist und somit das externe Feld abschwächt ( $\mu_r < 1$ ). Die noch zu besprechende Lenzsche Regel (siehe Abschnitt über Induktion) kann dieses Verhalten plausibel machen. Diamagnetismus ist in allen Materialien vorhanden. Sehr stark ausgeprägt ist er bei Wismuth.