

## Aus Kapitel 34

### Aufgaben

**34.1 •** Welche Felder wirken auf ruhende Ladungsträger und welche auf bewegte?

**Resultat:** Das elektrische Feld wirkt immer, das magnetische nur, wenn sich der Ladungsträger senkrecht zum Magnetfeld bewegt.

**Ausführliche Lösung:** Die Wirkung eines elektrischen Feldes ist durch die Coulomb-Kraft gegeben. Diese Kraft hängt nicht von der Geschwindigkeit ab, wirkt also immer. Die Wirkung eines Magnetfeldes ist durch die Lorentz-Kraft gegeben. Diese Kraft ist proportional zum Kreuzprodukt aus dem Magnetfeld und der Geschwindigkeit,  $\mathbf{B} \times \mathbf{v}$ . Sie verschwindet daher, wenn der Ladungsträger in Ruhe ist oder sich entlang einer Magnetfeldlinie bewegt.

**34.2 ••** In einem Forschungsinstitut wurde einmal eine mit elektronischen Schaltungen volle Metallhütte zur Erde hin isoliert und relativ zur Erde auf ein Potenzial von  $V = 10.000 \text{ V}$  angehoben. Wie ändert sich die Funktion der elektrischen Schaltungen in der Hütte durch diese Maßnahme?

**Resultat:** Das Verhalten ändert sich nicht.

**Ausführliche Lösung:** Nur, wenn sich die elektrischen Kräfte ändern, ändert sich auch das Verhalten. Wegen  $E = \nabla U$  ändert sich gar nichts, wenn überall ein konstantes Potenzial hinzuaddiert wird. Denn es fällt beim Differenzieren heraus.

Wichtig ist nur, dass keine leitende Verbindung zum Erdpotenzial geschaffen wird: ein Fuß in der Hütte und einer auf der Erde wäre ein im wörtlichen Sinne einmaliges Erlebnis.

**34.3 ••** In der Elektrotechnik wird der Begriff *Strom* verwendet. Welchem (mechanischen) Begriff in der Strömungslehre entspricht er am ehesten?

**Resultat:** Der Massendurchsatz entspricht am ehesten dem elektrischen Strom.

**Ausführliche Lösung:** Spricht man von einem Meeres- oder Luftstrom, dann ist damit das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit, manchmal auch das Produkt aus Teilchenzahl und Geschwindigkeit gemeint. Der elektrische Strom beinhaltet dagegen keine Geschwindigkeit. Er gibt vielmehr, einer Bilanz ähnlich, die zeitliche Änderung der Ladung an. Dies hat er mit dem Massen-

durchsatz gemein. Ersetzt man die Ladung  $Q$  durch die Masse  $m$ , so wird aus  $I = \frac{dQ}{dt}$  der Massendurchsatz  $\frac{dm}{dt}$ .

**34.4 •••** Gibt es quellenfreie elektrische Felder, und wenn ja, woher kommen sie und was bewirken sie?

**Resultat:** Quellenfreie elektrische Felder sind die Rotationsfelder, welche durch die Änderungen von Magnetfeldern entstehen. Sie erzeugen Induktionsspannungen und zeitlich veränderliche Magnetfelder.

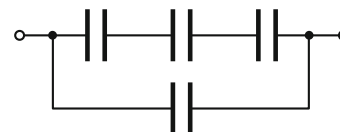
**Ausführliche Lösung:** Die elektrischen Felder der Elektrostatik haben immer Quellen (positive Ladungen) und Senken (negative Ladungen). Sie sind niemals Rotationsfelder. Die Anwesenheit zeitlich veränderlicher Magnetfelder ändert sich die Situation grundsätzlich. Denn nach dem Induktionsgesetz erzeugen diese elektrische Rotationsfelder, die im Allgemeinen die statischen Quellenfelder überlagern.

Man stelle sich eine geschlossene Leiterschleife genau auf der Linie der geschlossenen elektrischen Feldlinie eines Rotationsfeldes vor: In dieser Leiterschleife wirkt auf deren Ladungsträger eine Kraft, die diese um die Schleife herum treibt. Das Produkt aus der elektrischen Feldstärke und der Länge der Schleife ist die induzierte Spannung.

Nach dem zweiten Induktionsgesetz erzeugt das zeitlich wechselnde elektrische Feld wieder ein zeitlich veränderliches Feld, dieses ein elektrisches Feld, dieses ein ... und so weiter. Es entstehen elektromagnetische Wellen. Wenn man das Licht von Sternen betrachtet, stellt man fest: Dieses Abwechseln von  $E$ -Feld und  $B$ -Feld läuft seit Milliarden von Jahren ab.

**34.5 •** Sie brauchen einen  $C = 300 \pm 10 \text{ nF}$  Kondensator, haben aber nur eine Schublade voll mit  $C = 0,22 \mu\text{F}$  Kondensatoren. Was tun Sie?

**Resultat:**



Kombination von vier Kondensatoren

Mit der Anordnung der Abbildung erhält man fast genau  $C = 300 \text{ nF}$ .

**Ausführliche Lösung:** Ein einzelner Kondensator hat etwas zu wenig Kapazität. Daher muss noch ein Kondensator mit  $C = 80 \text{ nF}$  parallel geschaltet werden. Da bei einer Reihenschaltung die Kapazitätskehrwerte addiert werden, kann durch Hintereinanderschaltung von  $n$  Kondensatoren die Kapazität auf ein  $n$ -tel reduziert werden. Drei  $220\text{-nF}$ -Kondensatoren in Reihe verhalten sich wie ein  $73\text{-nF}$ -Kondensator. Nominell ergibt die im Resultat gezeigte Anordnung  $C = 293 \text{ nF}$ , was nur gut 2 % unter dem Wunschresultat liegt.

**34.6 •** Wie groß ist die Flächenleistungsdichte (Leistung pro Fläche, Einheit Watt/Quadratmeter) eines  $A = 4 \text{ cm}^2$  großen Prozessors, welcher bei  $U = 3,3 \text{ V}$  einen Stromverbrauch von  $I = 30 \text{ A}$  hat? Bitte vergleichen Sie das Ergebnis mit der Flächenleistungsdichte einer Herdplatte von  $18 \text{ cm}$  Durchmesser, die  $P = 1,8 \text{ kW}$  verbraucht.

**Resultat:**

$$\frac{P_{\text{Chip}}}{A_{\text{Chip}}} = 82,5 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2},$$

$$\frac{P_{\text{Herd}}}{A_{\text{Herd}}} = 7,07 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}.$$

**Ausführliche Lösung:** Die Flächenleistungsdichte des Chips beträgt  $P_{\text{Chip}}/A_{\text{Chip}} = U_{\text{Chip}} \cdot I_{\text{Chip}}/A_{\text{Chip}}$ . Die der Herdplatte ist  $P_{\text{Herd}}/A_{\text{Herd}} = P_{\text{Herd}}/(\pi r_{\text{Herd}}^2)$ , dabei ist der Radius der halbe Durchmesser. Man sieht an diesem Vergleich einen wesentlichen Grund dafür, dass in den letzten Jahren die Versorgungsspannungen von Prozessoren gesunken sind.

**34.7 ••** Bitte geben Sie die Kapazitäten ab  $C = 1 \mu\text{F}$  bis  $C = 10 \mu\text{F}$  der *E6-Reihe* an, und überlegen Sie sich, welche Fertigungstoleranzen nicht überschritten werden dürfen.

**Resultat:** Die Werte in  $\mu\text{F}$  sind:

$$1,0, \quad 1,5, \quad 2,2, \quad 3,2, \quad 4,6, \quad 6,8.$$

Die Fertigungstoleranzen sollten  $\pm 20\%$  nicht übersteigen.

**Ausführliche Lösung:** Alle benachbarten Kapazitätswerte unterscheiden sich in der *E6-Reihe* um einen Faktor  $f_6$ , also innerhalb einer Dekade relativ zum ersten Wert um die Faktoren  $f_6, f_6^2, f_6^3, \dots$ . Bei  $f_6^6 = 10$  ist die nächste Dekade erreicht, also ist  $f_6 = 10^{1/6} = 1,4678$ . Das führt auf die oben genannten Werte.

Die Fertigungstoleranzen sollten auf keinen Fall so groß sein, dass ein Widerstand dem falschen Normwert zugeordnet wird. Die Grenze wäre in diesem Falle gerade im *harmonischen Mittel* zwischen zwei Werten, also einen Faktor  $f_{12} = 10^{1/(12)} = 1,211$  darüber oder  $1/f_{12} = 0,825$

darunter. Mathematisch ergibt sich so eine Toleranz von 21 % zu höheren Werten und von 17 % zu niedrigen Werten. In technischen Handbüchern wird dies meist als  $\pm 20\%$  angegeben.

**34.8 •••** Kann man zu jeder Spannungsquelle eine Stromquelle mit gleicher Strom-Spannungs-Charakteristik finden.

**Resultat:** Es gelten  $R_I = R_S = R_P$  und  $U_Q = R_I \cdot I_Q$ .

**Ausführliche Lösung:** Die beiden Gleichungen für die realen Quellen lauten  $U = U_Q - R_S \cdot I$  und  $I = I_Q - U/R_P$ . Setzt man nun die beiden Ströme gleich, folgt:

$$U = U_Q - R_S \cdot \left( I_Q - \frac{U}{R_P} \right).$$

Diese Gleichung kann für beliebige Spannungen  $U$  nur dann gültig sein, wenn  $R_S = R_P$  ist. In diesem Fall verschwindet  $U$  aus der Gleichung, und es bleibt  $U_Q = R_I \cdot I_Q$ .

Am Ergebnis ist zu erkennen, dass die Umrechnung mit idealen Quellen nicht funktioniert. Denn eine Spannungsquelle mit  $1/R_S = 0$  liefert keinen Strom, und eine Stromquelle mit  $R_P = 0$  liefert keine Spannung.

**34.9 •** Eine Autobatterie, die eine Ladung  $Q_{\text{voll}} = 60 \text{ Ah}$  speichern kann, wird von einer Lichtmaschine mit einem Strom von  $I = 65 \text{ A}$  versorgt. Die Lichtmaschine hat einen Wirkungsgrad von  $\eta = 70\%$ . Wie lange dauert das vollständige Laden der Batterie, und welche mechanische Zusatzleistung muss der Motor dafür aufbringen?

**Resultat:** Das Laden dauert gut 55 Minuten. Dabei wird der Motor mit  $1,34 \text{ kW}$  mechanisch belastet.

**Ausführliche Lösung:** Die Ladezeit ergibt sich bei konstantem Strom und konstanter Spannung zu  $t_L = Q/I = 0,92 \text{ h} = 55 \text{ min}$ . Die elektrische Leistung ist dabei  $P_{\text{el}} = U_L \cdot I$ . Die Division durch den Wirkungsgrad des Generators ergibt die mechanische Leistungsaufnahme:  $P = P_{\text{el}}/\eta = 1337 \text{ W}$ .

**34.10 ••** Sie haben einen Formel-1-Rennstall gekauft und wollen die Fahrzeuge mit einem *Kinetic Energy Recovering System (KERS)* ausrüsten. Dieses soll fünf Sekunden lang 10 elektrisch erzeugte zusätzliche Pferdestärken auf die Rennstrecke bringen. Die mechanische Anbindung erfolgt über einen Starter-Generator, der einen Wirkungsgrad von  $\eta = 78\%$ , dessen Eingangsspannung mindestens 70 % seines Sollwertes betragen muss, hat.

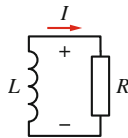
Wie viele Kondensatoren mit jeweils  $C = 1,2 \text{ kF}$  und einer Spannungsfestigkeit  $U_{\text{max}} = 2,33 \text{ V}$  könnten die dafür nötige Energie speichern?

**Resultat:** Man braucht 28 Kondensatoren

**Ausführliche Lösung:** Die zu speichernde Energie ist die zu verbrauchende Energie, dividiert durch den Wirkungsgrad, also  $W = P \cdot t / \eta = 47.150 \text{ Ws}$ . In jedem voll geladenen Kondensator ist eine Energie  $W_C = \frac{1}{2} C U_{\max}^2$  gespeichert, wovon allerdings wegen der vom Generator verlangten Minimalspannung nur  $\Delta W_C = \frac{1}{2} C [U_{\max}^2 - (0,7 U_{\max})^2] = 1661 \text{ Ws}$  genutzt werden können. Die Anzahl der benötigten Kondensatoren beträgt daher  $N = W / (\Delta W_C) = 28,4$ . Da die Kondensatoren im Zweifelsfall zu große Kapazitäten haben, werden 28 Stück reichen.

**34.11 •••** Oft werden parallel zu Spulen sogenannte *Freilaufdioden*, das sind Dioden, durch die im Normalbetrieb kein nennenswerter Strom fließt, geschaltet. Bitte zeigen Sie anhand der zeitlichen Entwicklung einer Schaltung mit dem anfänglichen Strom  $I_0 = I(t=0) \neq 0$ , die nur aus einer Spule und einem Widerstand besteht, dass es ohne Freilaufdioden zu Abschaltproblemen kommen kann.

**Resultat:** Wenn durch Unterbrechung des Stromkreises der Strom in kurzer Zeit auf null gebracht wird, erzeugt die Spule eine der ursprünglichen Spannung entgegengesetzte Induktionsspannung, die sehr hoch sein kann. Die Freilaufdiode begrenzt diese Spannung.



Spule und Widerstand

**Ausführliche Lösung:** Die Abbildung zeigt die Kombination aus einer Spule und einem Widerstand. Ein geöffneter Schalter entspricht dem Grenzwert  $R \rightarrow \infty$ .

Nehmen wir an, zum Zeitpunkt  $t = 0$  fließe ein Strom  $I_0$  in der dargestellten Richtung, d. h. in der Vergangenheit ( $t < 0$ ) muss das höhere Potenzial unten gelegen haben. Der Ladungstransport in der Spule sorgt aber ab  $t = 0$  dafür, dass der Pluspol in Abb. 34.9 oben liegt. Die an der Spule liegende Spannung wechselt das Vorzeichen. Durch den Widerstand fließt nun ein Strom  $I = U/R$ . Die weitere Entwicklung folgt nun aus:

$$-L \cdot \frac{dI}{dt} = R \cdot I \rightarrow \int_0^t dt = -\frac{L}{R} \int_{I_0}^I \frac{dI}{I}$$

mit dem Ergebnis:

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} \rightarrow U = R I_0 e^{-\frac{R}{L}t}.$$

Wenn  $R$  sehr groß wird, dann auch die durch das Abschalten erzeugte Spannung  $U$ . Bei Transformatorspulen kann diese Spannung bis in den Kilovolt-Bereich reichen.