

Elektromagnetische Wechselwirkung, Fortsetzung**A) Die Maxwellsche Ergänzung: Der zweite Fall der elektromagnetischen Wechselwirkung**

Ein elektrischer Strom umgibt sich mit einem magnetischen Ringfeld. Maxwell erkannte, dass ein sich änderndes elektrisches *Feld* dasselbe bewirkt. Es gibt also Magnetismus ohne Strom: Schließt man einen Kondensator der Kapazität C an eine Spannungsquelle mit der festen Spannung U_0 an, so werden die Platten mit den Ladungen $Q_{\pm} = \pm C \cdot U_0$ aufgeladen. Regelt man nun die Spannung gemäß $U(t) = k \cdot t$ langsam linear hoch, so wächst die Plattenladung entsprechend linear an. Zum Zeitpunkt t betragen die Plattenladungen dann $Q_{\pm}(t) = \pm C \cdot U(t) = \pm C \cdot k \cdot t$.

Die Ladungszunahme kann nur mittels *Stromfluss* durch die Anschlussadern erfolgen. Für den Ladestrom gilt aber $I_{\pm} = \dot{Q}_{\pm}$. Also fließt ein *konstanter* Strom der Stärke $I = \dot{Q}(t) = C \cdot \dot{U}(t) = C \cdot k$ durch die beiden Adern. Ein konstanter Strom umgibt sich aber nach den Korkenzieher-Regeln mit einem *konstanten* ringförmigen Magnetfeld. Zunächst erwartet man, dass die B -Linien *nur* die Leiter bis zu den Kondensatorplatten umschließen, denn der Ladestrom fließt ja *nur* dort.

Zwischen den Platten sollte eine „ B -Lücke“ herrschen. Zur Kontrolle bringt man eine Kompassnadel zwischen die Platten. Die Messung zeigt, dass es *keine* „ B -Lücke“ gibt. Im Gegenteil, das B -Feld setzt sich zwischen den Platten fort, als flösse auch hier exakt der volle Ladestrom I . Jetzt könnte man meinen, dass sich das Magnetfeld von den Plattenanschlüssen der Leiter, welche ja gerade noch stromführend sind, in die Lücke hineinwölbt. Dann müsste aber in der Plattenmitte eine „Magnetfelddelle“ sein, was nicht stimmt. Selbst ein großer Plattenabstand spielt keine Rolle. Da der konstante Ladestrom und somit das B -Feld *am Leiter* aber *nur* bei *Spannungsvergrößerung* auftritt und diese mit einer *Vergrößerung* der elektrischen Feldstärke E zwischen den Platten einhergeht, schlussfolgert man, dass die *Änderung* des elektrischen Feldes zwischen den

Platten für die Erzeugung des Magnetfeldes im Plattenbereich verantwortlich sein muss.

Das wird durch viele weitere Experimente bestätigt.

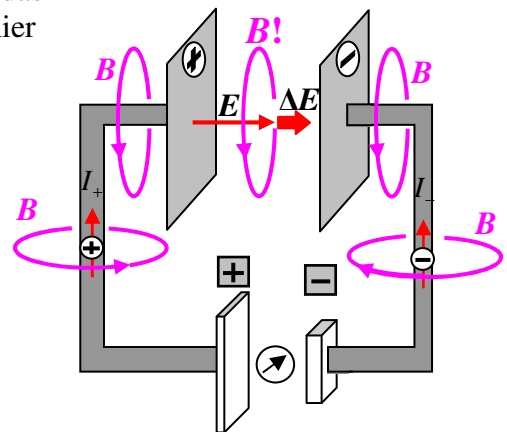
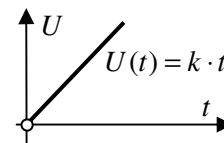
Die Flussdichte um einen *stromführenden* Leiter beträgt im Abstand r bekanntl. $B = \frac{\mu_0}{2\pi r} \cdot I_{\text{err}}$.

Messungen zeigen, dass die durch \dot{E} hervorgerufene Flussdichte $B = \frac{\mu_0}{2\pi r} \cdot (\epsilon_0 \cdot A \cdot \dot{E})$ beträgt,

wobei r der Abstand zur Plattenachse ist. Wegen der Ähnlichkeit der beiden B -Ausdrücke, erhält der Term $\epsilon_0 \cdot A \cdot \dot{E}$ ebenfalls den Namen „Strom“, nämlich *Verschiebungsstrom*, zumal der Term $\epsilon_0 \cdot A \cdot \dot{E}$ auch die Maßeinheit „Ampere“ hat.

Ergebnis: Ein *zunehmendes* elektrisches Feld ($\Delta E > 0$) umgibt sich mit *positiv* orientierten geschlossenen magnetischen Feldlinien B . Die Vorzeichen sind hier also *gleich*.

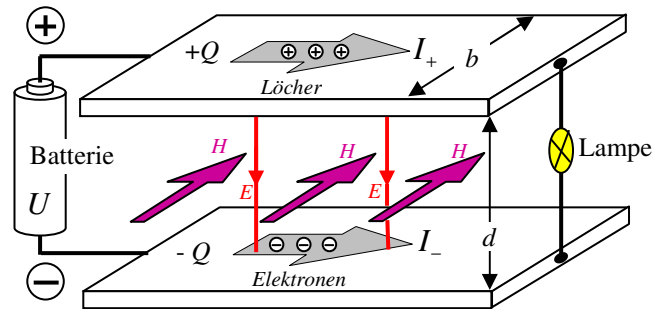
Bemerkung: Während der „echte“ Strom bewegte Ladungsträger benötigt und deshalb auf gute Leiter, wie z.B. Kupfer oder Silber angewiesen ist, läuft der Verschiebungsstrom $\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot \dot{E}$ bevorzugt über Isolatoren mit großem ϵ_r , ja er läuft sogar durchs Vakuum. In der Anfangsphase der Elektrizitätswirtschaft gab es daher die Hoffnung, elektromagnetische Energie im großen Stile auch ohne die üblichen Fernleitungen mit Metalladern übertragen zu können.



B) Energietransport durch Felder

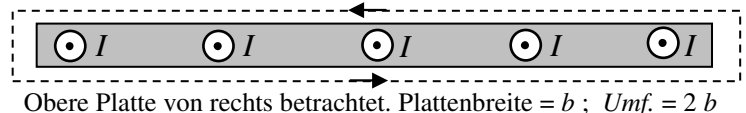
Jetzt wird gezeigt, dass der Energietransport im Stromkreis von der Spannungsquelle zum Verbrauch auf **zweierlei Art** verstehbar ist:

- Per Ladungsträgern: Ladungsträger bewegen sich *innerhalb* der Metalladern von der Spannungsquelle zum Verbraucher.
- Per Feldern: Ein gekreuztes elektromagnetisches Feld bewegt sich *zwischen* den Adern von der Spannungsquelle zum Verbraucher.



In der obigen Abb. sind die beiden Adern nicht, wie sonst üblich, als runde Drähte, sondern als dünne, große Metallplatten ausgebildet. An der oberen Platte liegt der Plus- und an die unteren der Minuspol der Spannungsquelle. Die Spannungsquelle trennt die Ladungen. Die untere Platte wird dann mit einem Überschuss an frei beweglichen Elektronen negativ aufgeladen. Der oberen Platte fehlen die Elektronen, so dass sie mit frei beweglichen Löchern positiv geladen wird. Zwischen den beiden Platten entsteht dann ein homogenes elektrisches Feld der Feldstärke $E = U / d$ ($d =$ Plattenabstand), während der Außenraum ober- und unterhalb der Platten, *feldfrei* bleibt.

Wird ein Verbraucher eingefügt, so rekombinieren dort die getrennten Ladungen. Doch weil die Spannungsquelle ebenso viele Ladungen neu trennt, wie im Verbraucher rekombinieren, bleibt der Ladungszustand der Platten und somit das elektrische Feld zwischen ihnen auch bei dem Stromfluss erhalten. Der Strom erzeugt nun aber nach der Korkezieherregel ein Magnetfeld. Für die obere Platte nehmen wir die rechte Hand, für die untere die linke. Beide mal zeigen die Finger *zwischen* den Platten nach hinten (in die Papierebene). *Außerhalb* der Platten sind die Magnetfelder der oberen und unteren Platte gegenläufig und *heben sich auf*. Somit sind beide Felder nur zwischen den Platten von null verschieden. Beim linearen Leiter gilt für die magnetische Feldstärke $H = I / 2\pi r$. Bei einer Leiterplatte muss der Kreisumfang $Umf = 2\pi r$ durch den Umfang eines Rechteckes ersetzt werden, welches die Platte der Breite nach umschließt. Vernachlässigt man die Plattendicke, so beträgt der Rechteckumfang $Umf = 2 \cdot b$.



Die Formel $H = I / 2\pi r$ wird damit durch $H = I / 2 \cdot b$ ersetzt.

Im Äußeren löschen sich die Magnetfelder der beiden Platten aus. Doch im Inneren ergibt die Überlagerung der Felder beiden Platten Verdopplung. Also gilt zwischen den Platten $H = I / b$.

Jetzt untersuchen wir, wie sich die Leistung P und der Widerstand R im Feldbild darstellen.

In beiden Ausdrücken kommt sowohl die Spannung U als auch die Stromstärke I vor. Deshalb stellen wir $E = U / d$ nach U und $H = I / b$ nach I um und erhalten $U = E \cdot d$ bzw. $I = H \cdot b$.

- Die Leistung P ist die übertragene Energie pro Zeit $P = \Delta W / \Delta t$. Im Stromkreis wird daraus $P = U \cdot I$. Einsetzen ergibt $P = (E \cdot d) \cdot (H \cdot b) = E \cdot H \cdot d \cdot b$. Das Produkt $d \cdot b$ ist aber gerade der Flächeninhalt A der Querschnittsfläche zwischen den Platten. Also gilt $P = E \cdot H \cdot A$.

Bei Schall, Licht und auch bei der Radioaktivität verwendet man den Begriff „Strahlungsintensität“. Der Buchstabe ist J . Die Strahlungsintensität ist die übertragene Energie pro Zeit und Fläche, durch welche die Strahlung hindurch tritt. Also $J = \Delta W / (\Delta t \cdot \Delta A)$ bzw. $J = \Delta P / \Delta A$. Weil die Felder hier homogen sind, folgt $J = P / A$. Also kann die Energieübertragung im Stromkreis auch als eine elektromagnetische Strahlung der Intensität $J = E \cdot H$ angesehen werden kann.

- Das Ohmsche Gesetz lautet $U = R \cdot I$ bzw. $I = U / R$. Einsetzen von $U = E \cdot d$ und $I = H \cdot b$ ergibt $H \cdot b = \frac{E \cdot d}{R}$. Betrachten wir einen Übertragungskanal mit quadratischer Querschnittsfläche, so kürzen sich d und b wegen $d = b$ heraus und das Ohmsche Gesetz lautet $H = E / R$.

Was bedeutet das?

Von der Spannungsquelle der Spannung U wird Energie zum Verbraucher transportiert. Dieser Energietransport kann auf zweierlei Weise verstanden werden.

(1) *Innerhalb* der Adern fließt Strom der Stärke I . Es gilt $P = U \cdot I$ und $R = U / I$.

(2) *Zwischen* den Adern besteht ein gekreuztes elektromagnetisches Feld $H \perp E$.

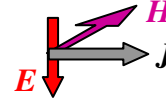
- Die Energieübertragung erfolgt als elektromagnetische Strahlung der Intensität $J = E \cdot H$.

- Der Strahlung stellt sich der Widerstand $R = E / H$ entgegen. Die Feldstärken sind also nicht unabhängig, sie sind über den Ohmschen Widerstand gemäß $H = E / R$ gekoppelt.

- Die Richtung des Energietransportes durch Felder ergibt sich durch die rechte 3-Finger-Regel
Daumen in Richtung des elektrischen Feldes.

Zeigefinger in Richtung des magnetischen Feldes.

Der Mittelfinger zeigt dann in die Richtung des Energieflusses.



Eine Unterbrechung des Energieflusses versteht man im „Strombild“ genauso wie im „Feldbild“.

- Geht der Verbraucherwiderstand gegen null, so hat man „Kurzschluss“. Es fließt ein riesiger Strom, wodurch das Magnetfeld zwischen den Adern sogar sehr groß wird.

Aber die Ladungstrennung in der Spannungsquelle kann die Rekombination im Verbraucher nicht mehr ausgleichen. Die Adern entladen sich, Spannung und Feldstärke sinken auf den Wert null.

Die Voraussetzung dafür, dass die bewegte Ladung Energie transportiert ist aber $U \neq 0$ bzw. $E \neq 0$.

Bei Kurzschluss ist diese Voraussetzung nicht mehr gegeben. Also: Bei Kurzschluss wird ...

im „Strombild“ $P = U \cdot I = 0 \cdot I = \underline{0}$ und im „Feldbild“ $P = J \cdot A = (E \cdot H) \cdot A = (0 \cdot H) \cdot A = \underline{0}$.

Beide Bilder zeigen gleichermaßen, dass bei Kurzschluss keine Energie übertragen wird.

- Als Gegenteil vom Kurzschluss haben wir mit einem Verbraucherwiderstand gegen unendlich.

Dafür nimmt man den Verbraucher einfach aus der Schaltung heraus. Dann entfällt die Rekombination und es fließt kein Strom. Ohne Strom wird auch das Magnetfeld H null.

Erneut sind die Produkte $P = U \cdot I = U \cdot 0 = \underline{0}$ bzw. $P = (E \cdot H) \cdot A = (E \cdot 0) \cdot A = \underline{0}$ gleich null. Ohne

Verbraucher gibt es also erneut weder Energieübertragung durch die Adern noch durch die Felder.

C) Ist das richtig? „Das Netz fungiert als Speicher“, ... als Strom- bzw. als Energiespeicher.

Politiker sind selten Fachleute. Trotzdem machen sie sich Gedanken zu Fragen der Energiewende.

In einer künftigen Abituraufgabe im Fach Physik soll folgende Aussage bewertet werden.

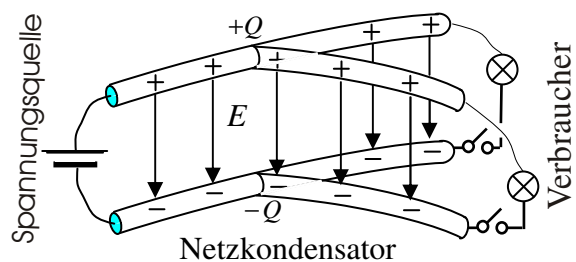
Abituraufgabe: „Das Netz fungiert als Speicher“. Bewerten Sie diese Politikeraussage.

Bearbeitung:

(1) Der Begriff „Stromspeicher“ ist ungeeignet, denn nur ein Supraleiter kann einen Ringstrom dauerhaft am Laufen halten. Das deutsche Stromnetz arbeitet aber nicht mit Supraleitung.

(2) Die Voraussetzung für den Energietransport durch bewegte Ladungsträger, also durch elektrischen Strom, ist eine Spannung U bzw. ein elektrisches Feld E zwischen den Adern. Auch ohne Stromfluss, bei abgeschaltetem Verbraucher, müssen die Adern vorab aufgeladen werden.

(3) Zwei einander gegenüberstehende Metallteile stellen generell einen Kondensator dar. So ist es auch mit den beiden einander gegenüberstehenden Adern eines Kabels. Diese beiden Adern bilden den *Netzkondensator*. Der Netzkondensator muss also vom Netzbetreiber vorab als „Vorleistung“ für die anschließende Energieübertragung aufgeladen werden. Das elektrische Feld zwischen den Adern stellt eine Energieform dar. Ein mit der Spannung U geladener Kondensator der Kapazität C hat den

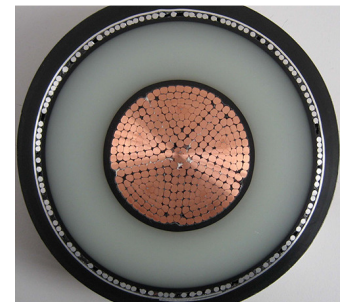


Energieinhalt $W = \frac{1}{2} C \cdot U^2$. Wir gehen davon aus, dass diese Energieform als „Speichergröße“ durch das Netz in der Politikeraussage gemeint ist, denn diese Energie steckt als fester Wert vor der Energieübertragung im Netz und ist im Prinzip verfügbar. *Es ist jedoch zu bemerken*, dass diese Energie nicht wirklich verfügbar ist. Zieht man sie ab, so entlädt man den Netzkondensator und *beseitigt* damit die *Voraussetzung* für die eigentliche Aufgabe des Stromnetzes, nämlich die Energieübertragung per Strom. Dennoch soll dieser Energiebeitrag unten berechnet werden.

(4) Sobald der Schalter umgelegt ist, fließt Strom und dem elektrischen Feld überlagert sich zusätzlich ein magnetisches Feld, welches eine weitere Energieform des Netzes darstellt. Doch diese Energie wird beim Abschalten per Induktion nach der Lenzschen Regel schlagartig frei. Deshalb gehen wir davon aus, dass die magnetische Feldenergie des stromdurchflossenen Netzes nicht als Speichergröße in der Politikeraussage gemeint sein kann.

(5) Das deutsche Netz hat die Gesamtlänge von 1,8 Millionen km. Davon sind 1 170 000 km Niederspannungsnetz mit ca. 400 V, 514 000 km Mittelspannungsnetz mit ca. 20 kV, 80 000 km Hochspannungsnetz mit ca. 100 kV und 35 000 km Höchstspannungsnetz mit ca. 600 kV. Wegen des Quadrates von U in der Formel für die Feldenergie, dominiert das Höchstspannungsnetz, sodass nur die Feldenergie des Höchstspannungsnetzes berechnet werden muss. Um Blindströme zu vermeiden, wird das moderne Höchstspannungsnetz mit Koaxial-Gleichstrom-Kabeln betrieben.

Ein Koaxialkondensator hat $C = 2\pi \epsilon_0 \cdot l / (\ln r_1 - \ln r_2)$ als Kapazität. Dabei ist l die Kondensator(Kabel)länge und r_1, r_2 sind Innen- und Außenradius. Mit $l = 35 \cdot 10^6 m$, $r_1 = 0,08 m$ und $r_2 = 0,15 m$ ergibt sich $C \approx 3 mF$. Mit $U = 600 kV$ folgt dann für die elektrische Feldenergie $W_{el} = 540 \cdot 10^6 J = 540 \cdot 10^6 / 3,6 \cdot 10^6 kWh = 150 kWh$.



(6) Im Jahre 2019 betrug der elektrische „Nettostromverbrauch“ in Deutschland 512 Terawattstunden = $512 \cdot 10^{12}$ Wattstunden = $512 \cdot 10^9 kWh$.

Das Jahr hat $n = 365,25 \cdot 24 \cdot 3600 s = 31,56 \cdot 10^6$ Sekunden. In einer Sekunde wurden im Jahre 2019 daher durchschnittlich $512 \cdot 10^9 kWh / 31,56 \cdot 10^6 = 16 200 kWh$ verbraucht. Das Netz speichert aber nur $150 kWh$. Also ist die „Netzenergie“ *erstens* in etwa 9,2 Millisekunden aufgebraucht und *zweitens* wird dem regulären Energietransport durch die Netzkondensatorentladung die Grundlage entzogen.

(7) Resümee: Die Politikeraussage zeugt von mangelhafter Fachkompetenz.