

# Induktion

## Induktion durch Flächenänderung

Bewegt man eine Leiterschleife in einem Magnetfeld entsteht eine Induktionsspannung (genauer: tritt an den Enden der Schleife eine Spannung auf). Diese ist proportional zur Änderung der vom Magnetfeld durchsetzten Fläche („wirksame Fläche“  $A_s$ ), der Stärke des Magnetfeldes  $B$  und der

Anzahl der Wicklungen „ $n$ “:  $|U_{ind}| = n \cdot B \cdot \frac{\Delta A_s}{\Delta t} = n \cdot B \cdot \dot{A}_s$ . Der Punkt über dem Buchstaben symbolisiert die Ableitung nach  $t$  (also der Zeit). Begründet werden kann dies durch die Lorentzkraft.

## Induktion durch Feldänderung

Auch bei der Änderung des Feldes beobachtet man eine Induktionsspannung. Diese kann nicht mehr unmittelbar durch die Lorentzkraft begründet werden. Offensichtlich reicht die

„Relativgeschwindigkeit“...:  $|U_{ind}| = n \cdot A \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} = n \cdot A \cdot \dot{B}_s$ . Offensichtlich können sich auch beide

Größen ändern! Man definiert deshalb den „**magnetischen Fluss**“. Für ein homogenes magnetisches Feld gilt:  $\Phi = B \cdot A_s = B \cdot A \cdot \cos \alpha$ . Er ist also das Produkt aus der magnetischen Flussdichte und der Fläche, durch die es tritt. Diese beiden Beziehungen fasst man im Induktionsgesetz zusammen.

## Induktionsgesetz

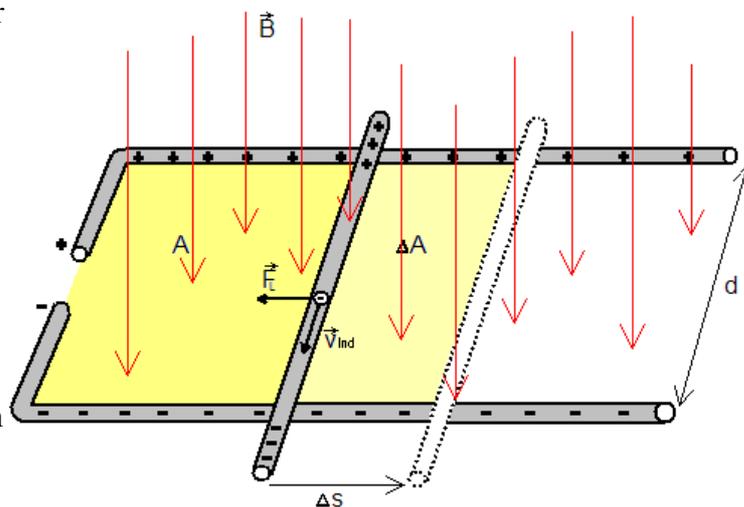
Bisher haben wir uns um das Vorzeichen der Induktionsspannung noch keine Gedanken gemacht,

also eigentlich nur über ihren Betrag gesprochen:  $|U_{ind}| = n \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ .

Wir werden finden, dass ohne die Betragsstriche gilt:  $U_{ind} = -n \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ . Wo kommt das Vorzeichen her und welche Bedeutung hat es?

## Leiter im Magnetfeld die Zweite

Bei der Herleitung des Induktionsgesetzes haben wir die Bewegung eines Leiters in einem Magnetfeld betrachtet. Durch diese Bewegung tritt die Lorentzkraft auf, die die Ladungstrennung bewirkt. Es kommt also zu einer zusätzlichen Bewegung der Ladungen, nämlich durch ihre Trennung! Diese zweite Lorentzkraft ist gerade der Bewegung entgegen gerichtet! Sie muss also „überwunden“ werden, um den Leiter zu bewegen. Dies ist auch im Sinne der Energieerhaltung: eine Ladungstrennung kostet Energie, diese wird dem System in Form von mechanischer



Energie zugeführt, indem der Stab gegen den Widerstand der Lorentzkraft bewegt werden muss. Diese Beobachtung wird als Lenz'sche Regel bezeichnet:

## Lenz'sche Regel

*Die induzierte Spannung bzw. die induzierte elektrische Feldstärke sind bei elektromagnetischen Induktionsvorgängen so gerichtet, dass sie ihrer Ursache entgegenwirken.*

Warum soll deshalb aber das Induktionsgesetz ein Minuszeichen bekommen? Stellen wir uns dazu vor, dass an den Enden des U-förmigen Leiters eine Spannung angelegt wird (etwa „unten“ Minus und „oben“ plus). Jetzt kommt es zu einer Bewegung der Ladungen „nach oben“ und dadurch einer Lorentzkraft nach rechts. Die freie Bewegung nach rechts bewirkt jedoch – wie eingezeichnet – einen Ladungstransport nach unten – also gemäß einer entgegengesetzten Spannung! Dies wird durch das Minuszeichen ausgedrückt!

## Wirbelströme

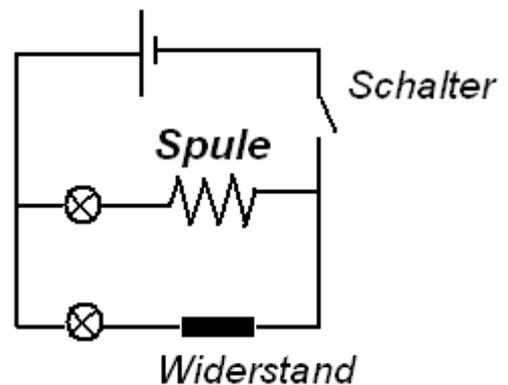
Ein elektrisch leitender aber nicht-magnetischer Aluminiumring wird über den vorstehenden Kern einer Spule gehängt („Thomson'scher Ringversuch“). Beim Einschalten des Spulenstromes bewegt sich der Ring mit einem kurzen Ruck von der Spule weg, beim Ausschalten zur Spule hin. Die Erklärung lautet: das sich ändernde Feld induziert eine Spannung, diese führt zu einem Induktionsstrom im Ring („Wirbelstrom“). Dieser erzeugt aber ein Magnetfeld, dass dem Spulenfeld entgegengesetzt ist! Wieder ein Fall für das Lenz'sche Gesetz: die Induktion ist ihrer Ursache entgegengesetzt. Hier, genauer, die Richtung des Stroms bzw. des Magnetfeldes. Es gibt zahlreiche Anwendungen:

- Wirbelstrombremsen bei Achterbahnen oder dem ICE
- Wirbelstrombremsen bei Ergometern
- Wirbelströme zur Erwärmung von Kochgut im Induktionsherd

## Selbstinduktion

Bisher hatten wir in der Regel zwei Spulen: Feldspule zur Erzeugung des Magnetfeldes und Induktionsspule (bzw. „Leiterschleife=Spule mit einer Wicklung“) indem die Induktion auftritt. Bei nebenstehendem Schaltplan leuchtet das Lämpchen im Spulenzweig der Parallelschaltung beim Anschalten verzögert auf. Warum? Beim Anschalten ändert sich der magnetische Fluss in der Spule ( $\dot{\Phi} \neq 0$ ).

Dadurch tritt eine Induktionsspannung auf. Diese ist ihrer Ursache entgegengerichtet – vermindert also die Spannung! Dieser Effekt klingt jedoch ab, da die Flussänderung nur kurzzeitig ist! Feld- und Induktionsspule sind hier identisch. Man spricht deshalb von „Selbstinduktion“.



Wie groß ist das magnetische Feld? Wir kennen bereits das Feld einer langen Spule:  $B = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{n}{l} \cdot I$

, mit der **magnetischen Feldkonstante**  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-7} \frac{Tm}{A}$ ,  $l$  der Länge der Spule und  $n$  den

Wicklungen. Das andere  $\mu_r$  bezeichnet die sog. **Permeabilität**, eine Materialkonstante für das Material des Spulenkerns. Jetzt kann alles zusammengesetzt werden:

$$\begin{aligned}
 U_{ind} &= -n \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \\
 &= -n \cdot A \cdot \dot{B} \\
 &= -n \cdot A \cdot \frac{\Delta (\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{n}{l} I)}{\Delta t} \\
 &= -\mu_0 \mu_r A \frac{n^2}{l} \dot{I} \\
 &= -L \cdot \dot{I}
 \end{aligned}$$

Der ganze Vorfaktor vor der Änderung der Stromstärke wird als „ $L$ “ abgekürzt. Man nennt diese Größe „Induktivität“. Ihre Einheit wird Henry  $1H = \frac{Vs}{A}$  genannt. Eine Spule hat die Induktivität  $1H$ , wenn die Stromstärkenänderung von  $1A$  pro Sekunde eine Spannung von  $1V$  induziert.

### Energie des Magnetfeldes einer Spule

Wir haben gesehen, dass bei Ein- und Ausschaltvorgängen die Spule „verzögert“ reagiert. Die Untere Abbildung zeigt etwa, wie die Stromstärke nur langsam abfällt. Dann fällt aber das Produkt

aus  $U$  und  $I$  ebenfalls langsam – also die elektrische Leistung. Das Integral in einem Leistungs-Zeitdiagramm ist aber die Energie – hier also die Energie, die in der Spule gespeichert war. Das ist aber gerade die Energie des Magnetfeldes! Die Rechnung ergibt

$E_{mag} = \frac{1}{2} LI^2$ . Das sieht natürlich ziemlich nach der Gleichung

$E_{kin} = \frac{1}{2} mv^2$  aus. Die Induktivität

entspricht also der „Trägheit“. Das scheint passend – ist sie doch tatsächlich dafür verantwortlich, dass Strom und Spannungsanstieg verlangsamt werden.

Eine wichtige Anwendung der Selbstinduktion einer Spule stellt der sog. „Schwingkreis“ dar. Mehr dazu im zweiten Teil der Zusammenfassung!

