

# Elektromagnetismus (2)

In diesem Teil des Beitrags lernen Sie eine wichtige physikalische Größe kennen, die magnetische Flussdichte  $B$ . Sie gibt an, wie stark ein Magnetfeld an einem bestimmten Punkt ist.

## Kurze Wiederholung

Wie in Teil 1 beschrieben, wirkt auf einen Strom durchflossenen Leiter im Magnetfeld eine Kraft. Früher wurde diese Kraft mit einer Stromwaage erfasst. Die Masse  $m$  erzeugt dabei eine Gegenkraft zur elektromagnetischen Kraft, die auf den Leiter wirkt. Im Falle eines waagerechten Hebelarms liegt ein Kräftegleichgewicht vor, und die elektromagnetisch entwickelte Kraft  $F$  ist genau so groß wie die Gewichtskraft  $G$ . Heute gibt es wesentlich bessere Methoden zur Messung der Kraft auf einen Strom durchflossenen Leiter als die Stromwaage, aber das Prinzip wird hier sehr deutlich. Messreihen mit der Stromwaage ergeben, dass sich die Kraft  $F$  proportional zum Strom  $I$  und zur Leiterlänge  $l$  verhält – vorausgesetzt, die gesamte Leiterlänge ist dem Magnetfeld aktiv ausgesetzt. Es gilt:

Kraft  $\sim$  Strom  $\cdot$  Leiterlänge  
im Magnetfeld

Es drängt sich an dieser Stelle die Frage auf, ob nicht auch die Intensität des Magnetfeldes relevant ist für die entstehende Kraft. Diese Vermutung lässt sich durch Versuche mit verschie-

Dipl.-Ing. (FH) Christiane Decker,

denen Magneten bestätigen – starke Magnete verursachen eine höhere Kraft als schwache.

## Die magnetische Flussdichte $B$

Die Aussage »starker Magnet« oder »schwacher Magnet« bezieht sich normalerweise darauf, mit welcher Kraft ein Magnet z. B. ein Eisenstück anzieht. Diese Definition ist auch sehr sinnvoll, und soll nun präzisiert werden. Hier hilft wieder die Stromwaage. Das Verhältnis von elektromagnetisch entwickelter Kraft einerseits und das Produkt aus Strom und Leiterlänge andererseits ergibt eine physikalische Größe, die über die Stärke eines Magneten eine wichtige Aussage liefert. Bei bestimmtem Strom und fester Leiterlänge verursacht



**Bild 5: An einer Kupplung installierte Hallensoren erfassen z. B. Lage und Drehzahl**

- ein starkes Magnetfeld eine hohe Kraft und
- ein schwaches Magnetfeld eine geringe Kraft.

Gar kein Magnetfeld ergibt somit auch keine Kraft.

Diesen Sachverhalt bezeichnet man als magnetische Flussdichte  $B$ . Sie ist also die Proportionalitätskonstante im Zusammenhang zwischen der Kraft  $F$  und dem Produkt aus Strom  $I$  und Leiterlänge  $l$ . Die magnetische Flussdichte wird gelegentlich auch (insbesondere auf dem Gebiet der elektrischen Maschinen) mit magnetischer Induktion bezeichnet.

Damit folgt aus dem proportionalen Zusammenhang

$$F \sim I \cdot l$$

mit Berücksichtigung der magnetischen Flussdichte

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (1)$$

Stellt man Gl. (1) nach  $B$  um

$$B = \frac{F}{I \cdot l}$$

lässt sich die Einheit für die magnetische Flussdichte erkennen:

$$\begin{aligned} [B] & \text{ in } \frac{N}{A \cdot m} \Rightarrow \frac{N}{A \cdot m} \cdot \frac{m}{m} \\ & \Rightarrow \frac{Ws}{A \cdot m^2} \Rightarrow \frac{VA \cdot s}{A \cdot m^2} \Rightarrow \frac{Vs}{m^2} \end{aligned}$$

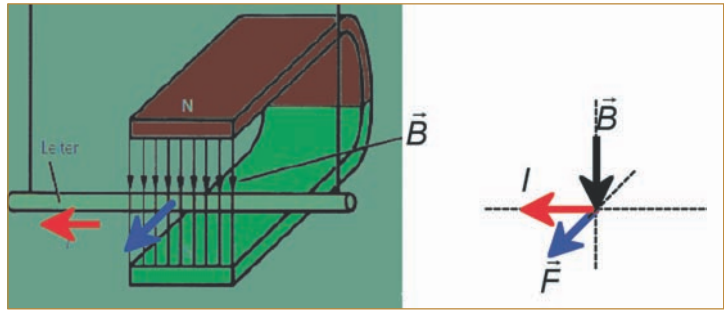
Die Einheit  $\frac{Vs}{m^2}$  wird mit Tesla (siehe **Kasten**). Heute

gibt es in der elektrischen Messtechnik Sensoren, mit denen sich die magnetische Flussdichte sehr genau bestimmen lässt. Beispiele hierfür sind die so genannten Feldplatten oder Hall-Sensoren.

Feldplatten, auch Magnetic Dependent Resistor (MDR), sind aus Halbleitern aufgebaute Sensoren, die ihren elektrischen Widerstand im Einflussbereich eines Magnetfeldes ändern.

Wenn kein Magnetfeld vorhanden ist, hat die Feldplatte einen bestimmten (materialabhängigen) Grundwiderstand. Die Elektronen durchdringen die Platte bei angelegter Spannung annähernd geradlinig. Wirkt nun von außen ein Magnetfeld ein, so werden die Elektronen abgelenkt und es kommt zu einer Wegänderung und damit zu einer Widerstandserhöhung.

Ein Hall-Sensor (nach Edwin Hall, amerikanischer Physiker, 1855 bis 1938) nutzt den so genannten Hall-Effekt zur Messung von Magnetfeldern, z. B. zur Lageerfassung rotierender Teile (Bild 5). Ein Hall-Sensor generiert eine Ausgangsspannung, wenn er von einem Messstrom durchflossen und in ein senkrecht dazu verlaufendes Magnetfeld gebracht wird. Diese Spannung ist proportional vom Produkt aus magnetischer Feldstärke und dem Strom abhängig. Der entscheidende Vorteil im Vergleich zu einer Tachomaschine aus Magnet und Spule ist, dass der Hall-Sensor auch dann eine Spannung erzeugt, wenn das Magnetfeld konstant ist. Wird hingegen bei dem Tacho der Magnet nicht bewegt, ist



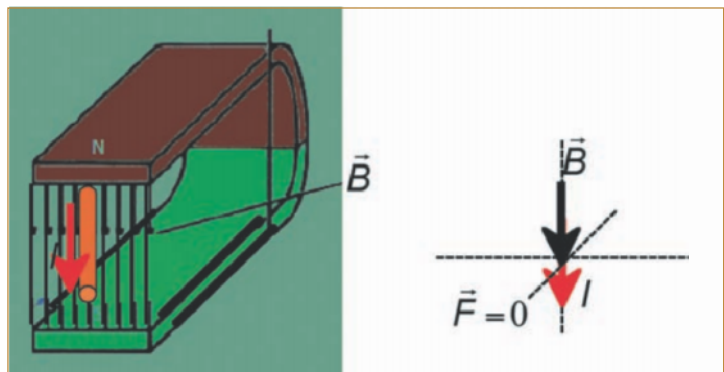
**Bild 6: Kraftwirkung eines Magnetfeldes auf einen beweglich angeordneten Stromleiter**

die in der Spule induzierte Spannung null.

Betrachten Sie nun die Anordnung in Bild 6: Ein Hufeisenmagnet erzeugt an den Polen ein magnetisches Feld. Dieses Feld hat eine Richtung, nämlich von Nord nach Süd. Pfeile deuten das in Bild 6 an.

Auch die magnetische Flussdichte  $B$  stellt einen Vektor dar, der, wie alle Vektoren, durch Betrag und Richtung im Raum charakterisiert ist. Die magnetische Flussdichte kann im allgemeinen Fall in jedem Punkt im Raum sowohl nach Betrag als auch in der Richtung verschieden sein. Ist das Feld in einem

bestimmten Bereich nach Betrag und Richtung konstant, so spricht man von einem homogenen Feld, ansonsten von einem inhomogenen Feld. Übrigens benutzt man immer dann den Begriff »Feld«, wenn eine physikalische Größe im Raum auftritt, d. h., wenn eine räumliche Verteilung vorhanden ist. Typische Feldgrößen sind das elektrische Feld, die magnetische Flussdichte sowie die Stromdichte. Zurück zu der Anordnung in Bild 6. Zwischen den Polen befindet sich ein elektrischer Leiter, der von einem Strom durchflossen wird. Der Strom lässt sich beispielsweise über eine variable



**Bild 7: Leiter gegenüber Bild 6 um 90° gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Magnetfeld und Leiter verlaufen parallel**

Spannung in seiner Größe verändern. Da der Leiter praktisch wie eine Schaukel aufgehängt ist, kann man im Experiment feststellen, dass der Auslenkungswinkel und somit die entwickelte Kraft und das auf den Leiter wirkende Drehmoment umso größer wird, je höher der Strom ist. In einem Zahlenbeispiel soll die elektromagnetische Kraft  $F$  berechnet werden. Das zwischen den Polen homogene Magnetfeld beträgt im Bereich der Pole  $B = 100 \text{ mT}$ . Von dem 10 cm langen Leiter befinden sich nur 5 cm im Bereich des Magneten, d. h., nur dieser Teil des Leiters ist dem Magnetfeld ausgesetzt. Demzufolge wirkt auch nur auf diesen Teil des Leiters ( $l = 5 \text{ cm}$ ) eine Kraft. Auf den restlichen Teil des Leiters, d. h.

den überstehenden Teil, wirkt keine elektromagnetische Kraft.

**Frage:**

Wie hoch ist die Kraft  $F$  bei einem Strom von 5 A?

**Lösung:**

Mit Gl. (1) folgt:

$$F = B \cdot I \cdot l$$

$$F = 0,1\text{T} \cdot 5\text{A} \cdot 0,05\text{m} = 25\text{mN}$$

**Winkel zwischen Leiter und Magnetfeld**

Bei Gl. (1) kommt allerdings noch ein Sachverhalt hinzu, der bislang keine Berücksichtigung fand. Er hängt mit der Frage zusammen, ob die Kraft  $F$  vom Winkel zwischen dem Magnetfeld  $B$  und dem stromdurchflossenen Leiter abhängt. Sowohl in

der Anordnung in Bild 6 als auch bei der Stromwaage herrschte immer ein rechter Winkel zwischen dem Magnetfeld und dem Leiter. Dies verdeutlichen die Pfeile in Bild 6. Ein Versuch zeigt, dass bei einem um  $90^\circ$  verdrehten Leiter, der parallel zu den Feldlinien verläuft (**Bild 7**), keine Kraft mehr wirksam ist.

Experimentiert man weiter und ändert den Winkel kontinuierlich zwischen  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  gelangt man zu folgender Erkenntnis:

Die Kraft auf einen Strom durchflossenen Leiter im homogenen Magnetfeld steht senkrecht auf der Ebene, die durch den  $B$ -Vektor und den Leiter aufgespannt wird. Der Betrag der Kraft lässt sich allgemein berechnen über:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

Gl. (2) ist die allgemeine Formel für die Kraft auf einen Strom durchflossenen Leiter im homogenen Magnetfeld bei beliebiger Lage. Die Sinusfunktion schwankt je nach Winkel zwischen den Maximalwerten  $+1$  (bei  $\alpha = 90^\circ$ ) und  $-1$  (bei  $\alpha = 270^\circ$ ). In der Anordnung nach Bild 6 existiert ein rechter Winkel zwischen Magnetfeld und Leiter, d. h.  $\alpha = 90^\circ$ . Da  $\sin 90^\circ = 1$  ist, reduziert (vereinfacht) sich die obige Formel zu:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin 90^\circ = B \cdot I \cdot l$$

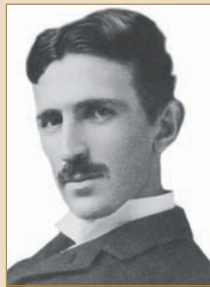
und wir erhalten den Zusammenhang, den wir mit Gl. (1) kennen gelernt haben.

**2. Frage**

Ein zweites Beispiel bei einem Winkel  $\alpha = 45^\circ$  soll die Auswirkung verdeutlichen:

$$B = 0,8 \text{ T}, I = 20 \text{ A}, l = 0,25 \text{ m.}$$

**Nikola Tesla** (\* 10. Juli 1856 in Smiljan; † 7. Januar 1943 in New York, USA) war Erfinder und Elektro-Ingenieur. Er besuchte zunächst das Gymnasium. Nach seiner Ausbildung 1876 bis 1878 an der Technischen Universität Graz und der Universität von Prag entwickelte er die Idee, Wechselstrom zur Energieübertragung zu nutzen und dafür unter anderem geeignete Elektromotoren zu bauen. 1882 zog Tesla nach Paris, um dort für den europäischen Ableger der Unternehmen von Thomas Edison zu arbeiten. 1884 siedelte er nach New York um, wo er erneut Arbeit bei Edison fand. Später widmete sich Tesla – anders als Edison – der Nutzung des Wechselstroms und arbeitete mit Edisons Konkurrenz-



ten Westinghouse zusammen. Auf der Weltausstellung 1893 in Chicago bewies Teslas System, dass die Drehstromübertragung im großen Stil eingesetzt werden konnte und weniger Leistungsverluste als Gleichstrom hatte. Während dieses Wettbewerbs um das bessere System wurde von den Befürwortern des Gleichstromes zu Demonstrationszwecken der elektrische Stuhl mit Wechselstrom betrieben, um jedem die Gefährlichkeit dieses Systemes vor Augen zu führen. Tesla war Miterfinder des heutigen Dreiphasenwechselstrom-Systems. Allein in den USA konnte er in etwa 50 Berufsjahren 112 Patente anmelden.

ten Wettbewerbs um das bessere System wurde von den Befürwortern des Gleichstromes zu Demonstrationszwecken der elektrische Stuhl mit Wechselstrom betrieben, um jedem die Gefährlichkeit dieses Systemes vor Augen zu führen. Tesla war Miterfinder des heutigen Dreiphasenwechselstrom-Systems. Allein in den USA konnte er in etwa 50 Berufsjahren 112 Patente anmelden.

**Lösung:**

Mit Gl. (2) folgt:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin 45^\circ$$

$$F = 0,8\text{T} \cdot 20\text{A} \cdot 0,25\text{m} \cdot \sin 45^\circ$$

$$F = 0,8\text{T} \cdot 20\text{A} \cdot 0,25\text{m} \cdot 0,707$$

$$F = 2,83\text{N}$$