Maß für die Stärke der magnetischen Induktion = Anzahl der magnetischen Induktionslinien (Feldlinien), die eine Flächeneinheit durchsetzt. Formelzeichen der magnetischen Induktion: $\vec{B}$ (vektorielle Größe) (Abb. 1.6).

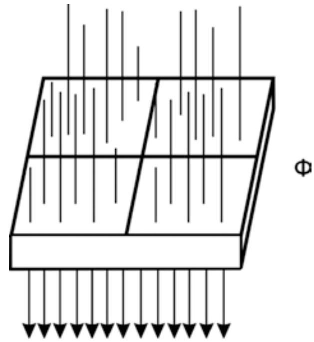

Abb. 1.6 Eisenstück von magnetischen Feldlinien durchsetzt (zur Verdeutlichung des magnetischen Flusses)

Magnetischer Fluss oder Induktionsfluss = Gesamtzahl aller Feldlinien, die eine Fläche durchsetzen. Formelzeichen des magnetischen Flusses: Φ. Zwischen Φ, $\vec{B}$ und der Fläche A_n, durch die der Fluss hindurchtritt, besteht im homogenen Magnetfeld folgender Zusammenhang:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \overrightarrow{A_n} \tag{1.1}$$

Für $\vec{B} \cdot \overrightarrow{A_n}$ gilt: skalares Produkt der Vektoren $\vec{B}$ und $\overrightarrow{A_n}$ (inneres Produkt). Das skalare Produkt zweier Vektoren ist skalar. Es ist gleich dem Produkt aus den beiden Beträgen der beiden Vektoren und dem Cosinus des von beiden Vektoren eingeschlossenen Winkels. [Äußeres Produkt: Das vektorielle Produkt zweier Vektoren ist ein Vektor. Sein Betrag ist gleich dem Produkt aus den Beträgen der beiden Faktoren und dem Betrag des Sinus, des von beiden Vektoren eingeschlossenen Winkels]. A_n ist die Normalfläche, d. h. die Flächenprojektion auf eine Ebene senkrecht zu den Feldlinien.

Beispiel

Spule, die sich in einem homogenen Magnetfeld dreht (Abb. 1.7).

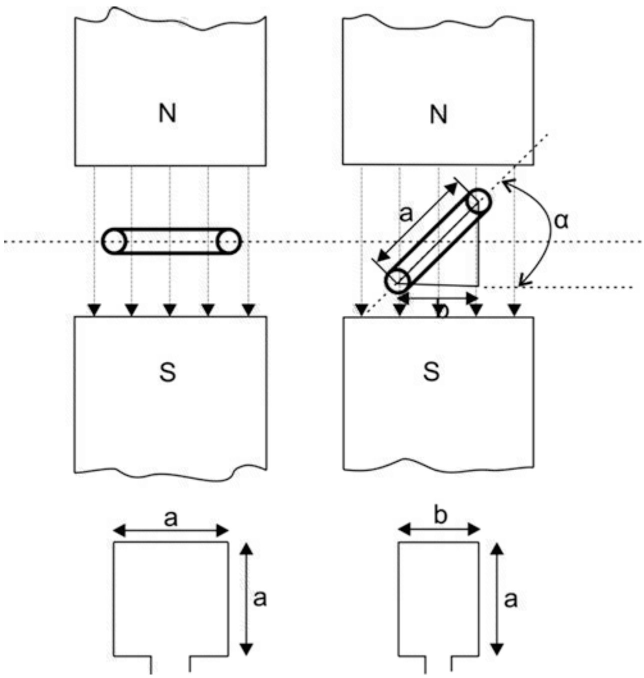

Abb. 1.7 Für die linke Seite gilt: $A_n = a \cdot a = a^2$

$$\cos\alpha = \frac{b}{a}$$

$$b = a \cdot \cos\alpha$$

$$\text{Für die rechte Seite gilt:}\quad A_n = a \cdot b = a \cdot a \cdot \cos\alpha = a^2 \cdot \cos\alpha$$

Für das nichthomogene Magnetfeld lässt sich Φ aus der allgemeinen Gl. (1.2) ermitteln:

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\overrightarrow{A_n} \tag{1.2}$$

Für das magnetische Feld gilt:

1. Der Fluss ist in jedem magnetischen Feld, d. h. in jedem magnetischen Feldlinienkreis konstant. Das gilt nur, wenn die Gesamtheit des Feldes betrachtet wird,
2. Das magnetische Feld ist ein Wirbelfeld, d. h. in jedem magnetischen Feld sind stets alle magnetischen Linien in sich geschlossene Linien ohne Anfang und Ende. ◀

1.3 Das ohmsche Gesetz des magnetischen Kreises (Hopkinsonsches Gesetz)

Wird der Fluss durch eine Spule erzeugt, so ist seine Größe abhängig von der Stromstärke I und der Windungszahl N der Spule. Das Produkt $N \cdot I$ ist die erzeugte Größe des Flusses (Ursache). $N \cdot I$ wird als Durchflutung genannt. Formelzeichen

$$\Theta = N \cdot I \tag{1.3}$$

Wie im elektrischen Kreis gilt auch hier im magnetischen Kreis: Die Wirkung (Fluss Φ) ist der Ursache (Durchflutung Θ) proportional. Es gilt:

$$\Phi = \Lambda \cdot N \cdot I = \Lambda \cdot \Theta \tag{1.4}$$

In Gl. (1.4) ist Λ eine Proportionalitätskonstante, die als **magnetischer Leitwert** bezeichnet wird.

Magnetischer Leitwert $\Lambda = 1$/magnetischer Widerstand

$$\Lambda = \frac{1}{R_m} \tag{1.5}$$

Gl. (1.5) in (1.4) eingesetzt:

$$\Phi = \frac{N \cdot I}{R_m} = \frac{\Theta}{R_m} \tag{1.6}$$

1.4 Größen und Einheiten des magnetischen Feldes

Größe	Formelzeichen	Einheit	Symbol
Magnetische Induktion	$\vec{B}$	Tesla	T
Magnetischer Fluss	Φ	Weber	Wb
Durchflutung	Θ	Ampere	A
Magnetischer Leitwert	Λ	Henry	H
Magnetischer Widerstand	R_m	Henry^{-1}	H^{-1}

$1\,\mathrm{Wb} \mathrel{\hat{=}} 1\,\mathrm{Vs} \mathrel{\hat{=}} 10^8\,\mathrm{M}$.

$1\,\mathrm{T} \mathrel{\hat{=}} 1\,\frac{\mathrm{Ws}}{\mathrm{m}^2} \mathrel{\hat{=}} 10^4\,\mathrm{G}$ mit $1\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{cm}^2} = 10^8\,\mathrm{G}$ (G: Gauß).

Definitionsgleichung für Λ: $\Lambda = \frac{\Phi}{\Theta} \rightarrow \frac{[\mathrm{Wb}]}{[\mathrm{A}]} = \frac{[\mathrm{Vs}]}{[\mathrm{A}]} = \Omega \cdot s = H$. Für $1\Omega \cdot 1s$ wird die Einheit $1H$ eingeführt. In der Praxis wurden bis 1970 für Gauß $\vec{B} \rightarrow$ Gauß [G] und für den Fluss Mexwell $\Phi \rightarrow$ Mexwell [M] als Einheiten aus dem absoluten elektromagnetischen Maßsystem verwendet.

1.5 Magnetischer Widerstand

Der magnetische Widerstand kann auch aus den Größen Länge, Querschnitt und Werkstoffkonstante berechnet werden:

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot A_n} \tag{1.7a}$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \tag{1.7b}$$

l mittlere Länge der Feldlinien [cm]
A_n Normalfläche
μ absolute Permeabilität (magnetische Leitfähigkeit)
μ_0 Induktionskonstante (magnetische Leitfähigkeit des Vakuums)
μ_r relative Permeabilität (reiner Zahlenfaktor)
μ_r gibt das Verhältnis der magnetischen Leitfähigkeit im betrachteten Werkstoff zur magnetischen Leitfähigkeit im Vakuum an
μ_r $= 1$ (Vakuum)
μ_r $= 1{,}0000004$ (Luft). Für Berechnungen wird $\mu_r = 1$ für Luft eingesetzt

Induktionskonstante:

$$\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-8} \frac{[\mathrm{H}]}{[\mathrm{cm}]} \tag{1.8}$$

$$\mu_0 = 125{,}6 \cdot 10^{-8} \frac{[\mathrm{Tm}]}{[\mathrm{A}]}$$

$$\mu_0 = 125{,}6 \cdot 10^{-6} \frac{[\mathrm{T} \cdot \mathrm{cm}]}{[\mathrm{A}]}$$

Gl. (1.7a) wird in Gl. (1.6) eingesetzt:

$$\Phi = \frac{\Theta}{R_m} = \frac{N \cdot I \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot A_n}{l} \tag{1.9}$$

Mit Gl. (1.9) wird vorwiegend in der Praxis gerechnet.

Aufgabe 1

Gegeben Ringspule → Kern: Luft ($\mu_r = 1$)

Mittlerer Ringdurchmesser: 20 cm

Mittlerer Windungsdurchmesser: 3 cm

Induktion in der Spule: 10^{-2} T

Gesucht Durchflutung? Magnetischer Leitwert (Abb. 1.8)?

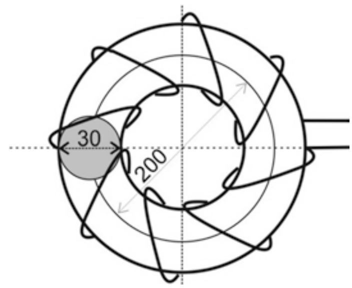

Abb. 1.8 Ringspule mit magnetischen Windungen

Lösung

$$\Theta = |N \cdot I| = \frac{\phi \cdot l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A_n}$$

$$\phi = \vec{B} \cdot A_n$$

$$\Theta = |N \cdot I| = \frac{\left|\vec{B}\right| \cdot l \cdot A_n}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A_n}$$

$$\Theta = |N \cdot I| = \frac{\left|\vec{B}\right| \cdot l}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{10^{-2}\mathrm{T}20\mathrm{cm}}{125{,}6 \cdot 10^{-6}\mathrm{Tcm/A}} \approx 5000\,\mathrm{A}$$

$N \cdot I = 5000$ A können z. B. durch 5000 Windungen und 1 A erzeugt werden. Die Aufteilung des Produktes ist abhängig von der zur Verfügung stehenden Spannung, vom Widerstand der Wicklung und der zulässigen Erwärmung, d. h. der zulässigen Leistungsaufnahme. Beispiel: Zulässige Leistungsaufnahme eines Fernmelderelais (verfügt über eine Spule im Steuerstromkreis) beträgt etwa 5 W.