Magnetfeldmessung

Stromdurchflossene Leiter erzeugen magnetische Felder. Die Bestimmung magnetischer Feldstärken und die Festlegung der Einheit der Stromstärke in Ampere nach dem SI-Einheitensystem beruhen auf der gegenseitigen Kraftwirkung zweier elektrischer Ströme und ihrer Magnetfelder.

Man unterscheidet zwei Feldgrößen zur Charakterisierung der Stärke eines Magnetfeldes:

- magnetische Feldstärke $\underline{H}$
- magnetische Flussdichte (auch: magnetische Induktion) $\underline{B}$

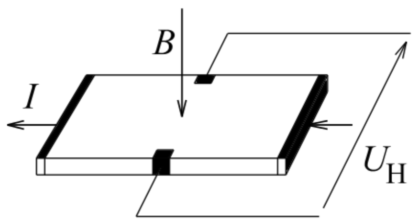
Für Magnetfelder im Vakuum (und in guter Näherung ebenso in Luft) gilt $\underline{B} = \mu_0 \underline{H}$ mit der magnetischen Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}}$. In Materialien wird die magnetische Flussdichte zusätzlich durch die magnetischen Eigenschaften des Materials in charakteristischer Weise beeinflusst (Para- bzw. Diagmagnetismus, Ferromagnetismus, etc.).

Das Feld der magnetischen Flussdichte lässt sich durch Feldlinien veranschaulichen. Der Verlauf der Feldlinien charakterisiert die Richtung der Feldvektoren. Feldlinien des magnetischen Feldes sind geschlossen – es handelt sich um ein so genanntes Wirbelfeld. Die Dichte der Feldlinien ist ein Maß für den Betrag der magnetischen Induktion am betrachteten Ort.

Bewegte Ladungen (Geschwindigkeitsvektor $\underline{v}$) erfahren in magnetischen Feldern eine Lorentzkraft: $\underline{F} = q\, \underline{v} \times \underline{B}$. Diese ist stets senkrecht zur bisherigen Bewegungsrichtung und zu den Feldvektoren der magnetischen Flussdichte orientiert, bewirkt also eine Bahnablenkung, verrichtet jedoch keine Beschleunigungsarbeit. Der Betrag der wirkenden Kraft wird dann maximal, wenn $\underline{v} \perp \underline{B}$: $F = qvB$. Für die Einheit der magnetischen Flussdichte ergibt sich damit:

$$[B] = 1 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{As} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} = 1\ \mathrm{T}$$

Starke Permanentmagnete erzielen magnetische Flussdichten im Bereich $0{,}5\ \mathrm{T}$, für das Erdmagnetfeld in Mitteleuropa ist $B \approx 40\ \mu\mathrm{T}$.



Wikimedia commons, CC BY-SA 3.0

Zur Messung der magnetischen Flussdichte können Hall-Sensoren zum Einsatz kommen. Diese nutzen den Hall-Effekt (i.d.R. in Halbleitermaterialien) aus. Fließt ein elektrischer Strom durch ein Material, so bewegen sich die Ladungsträger darin mit einer gewissen Driftgeschwindigkeit v_D. Wirkt dazu senkrecht ein Magnetfeld mit der magnetischen Flussdichte B, so resultiert eine Lorentzkraft, die sowohl zur Stromrichtung als auch zur Magnetfeldrichtung senkrecht orientiert ist und eine Ablenkung der Ladungsträger aus der ursprünglichen Richtung bewirkt. Durch diese laterale Verschiebung freier Ladungsträger erhält man einen getrennten positiven und negativen Ladungsschwerpunkt im Material, also eine messbare Spannung U_H, die proportional zur magnetischen Flussdichte ist. Messung der Hallspannung lässt also einen Rückschluss auf B zu. Die zu beachtenden Richtungsbeziehungen zwischen Strom, Magnetfeld und Messsignal bedingen jedoch, dass der Hall-Sensor das Magnetfeld nur in einer bestimmten Ausrichtung zu diesem korrekt erfassen kann.

Das Amperesche Gesetz, auch als Durchflutungssatz bezeichnet, liefert nun einen einfachen Zusammenhang zwischen fließendem Strom und daraus resultierendem Magnetfeld. Es gilt:

$$\oint \underline{H} \cdot \mathrm{d}\underline{s} = \frac{1}{\mu_0} \oint \underline{B} \cdot \mathrm{d}\underline{s} = I.$$

Das Integral über die magnetische Induktion längs einer geschlossenen Linie ist also proportional zum Strom, der durch die durch die Umlauflinie begrenzte Fläche fließt.

Das Magnetfeld um einen geraden stromdurchflossenen Leiter bildet konzentrische geschlossene Feldlinien um den Leiter herum. Zu einem kreisförmigen Umlauf um den Draht ist das Feld also an jeder Stelle tangential (d.h. $\mathrm{d}\underline{s} \parallel \underline{B}$) und, da in gleichem Abstand r zum Draht, betragsmäßig konstant. Mit dem Durchflutungssatz folgt dann also:

$$I = \frac{1}{\mu_0} \oint \underline{B}\, \mathrm{d}\underline{s} = \frac{1}{\mu_0} \int_0^{2\pi r} B\, \mathrm{d}s = \frac{B}{\mu_0} \int_0^{2\pi r} \mathrm{d}s = 2\pi r \frac{B}{\mu_0}$$

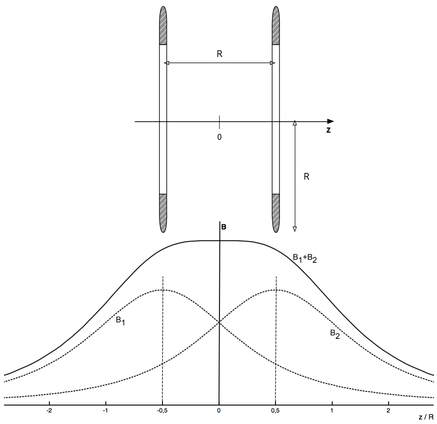
$$\Longrightarrow B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r}.$$

Die magnetische Induktion nimmt also mit wachsendem Strom linear zu, mit zunehmendem Abstand jedoch gemäß $1/r$ ab. Dieser Zusammenhang gilt natürlich nur im Außenraum des stromdurchflossenen Leiters.

Auf analoge Weise kann die magnetische Induktion im Innenraum einer langen Spule berechnet werden. Die im Vergleich zu den Querabmessungen große Länge bewirkt, dass die magnetische Induktion im Innenraum (insbesondere entlang der Spulenachse) homogen ist, die Streufelder im Außenraum dagegen möglichst klein sind. Die konkrete Rechnung ergibt (N : Windungszahl, l: Spulenlänge):

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l}.$$

Analoge, im Detail ggf. komplexere, Rechnungen können im Prinzip für weitere Spulengeometrien durchgeführt werden. Für experimentelles Arbeiten ist das so genannte Helmholtz-Spulenpaar interessant. Dabei werden zwei kurze Spulen mit großem Radius R parallel so nebeneinander positioniert, dass der Abstand der Spulenmitten ebenfalls R beträgt. Bei gleichsinnigem Stromfluss durch beide Spulen ergibt sich aus der Überlagerung der Magnetfelder im Raum zwischen den Spulen ein homogenes Magnetfeld, dessen magnetische Induktion den Betrag



$$B = \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{N}{R}\, I$$

aufweist und entlang der Spulenachsen orientiert ist. Der Bereich mit homogenem Feld ist, verglichen mit dem Innenraum in einer langen Spule, groß und erlaubt daher das Unterbringen größerer Experimentieranordnungen im homogenen Magnetfeld. Entgegengesetzter Stromfluss durch die beiden Spulen liefert einen Bereich mit konstantem Feldgradient im Innenraum.