

➤ 3.7.4 Magnetkreise mit Dauermagneten

➤ Kurze Geschichte der Dauermagnete, Anwendungen

Bereits vor 5000 Jahren war bekannt, dass in der Natur bestimmte „Steine“ die Eigenschaft besitzen, auf andere „Steine“ Kräfte auszuüben. Die einzige Anwendung dieser natürlichen Dauermagnete war der Kompass, erstmal in Europa im 13. Jahrhundert beschrieben, möglicherweise jedoch 2000 Jahre vorher in China erfunden. Erst *William Gilbert (1544-1603)* hat im Jahre 1600 künstliche Dauermagnete (jedoch sehr schwache: $H_C < 4 \text{ kA/m}$) als Hebmagnete eingesetzt. Bis 1880 wurden keine Fortschritte in diesem Bereich erzielt, danach wurde jedoch sehr intensiv mit verschiedenen Legierungen experimentiert, die immer größere Magnetenergiedichten $(BH)_{max}$ erzeugten. Im Jahre 1931 patentierte ein Japaner, *T. Mishima*, eine Legierung aus Aluminium, Nickel und Kobalt (*Alnico*), die 30 Jahre lang besonders erfolgreich war und bis zu ca. 100 kJ/m^3 Energiedichte erreichte. Auf Abb. 3.33 ist die B-H-Kennlinie von Alnico, im II. Quadranten, dargestellt. Mit diesen Remanenz-Flussdichten über $1,2 \text{ T}$ konnte man Dauermagnete für viele technische Anwendungen in Betracht ziehen, so für spezielle elektrische Maschinen.

Ein weiterer Schritt in der Entwicklung war die Erfindung der hartmagnetischen Ferrite (1950), die vor allem dank ihrer niedrigen Herstellungskosten eine breite Anwendung bei Gleichstrommotoren, insbesondere im Fahrzeugbau, fanden. Doch Ferrite weisen eine relativ geringe Remanenzflussdichte B_R auf ($0,4 \text{ T}$, siehe Abb. 3.33) und Energiedichten die bis zu 30 kJ/m^3 gehen. Trotzdem werden sie auch heute noch oft eingesetzt, hauptsächlich wegen des günstigen Preises.

Absolut spektakulär gestaltete sich die Entwicklung der Dauermagnete nach 1970, als *Karl Strnat* und andere auf die Idee kamen, *Seltene Erden* (zunächst Samarium) als Zusatz beizumischen. Die Legierung *Sm-Co* erreichte bei Remanenzwerten um 1 T (siehe Abb. 3.33) Energiedichten in der Größenordnung 200 kJ/m^3 . Das war ein gewaltiger Schritt nach vorne und der Anfang einer Erfolgsgeschichte, wie nur wenige im 20. Jahrhundert stattfanden. Leider ist SmCo bis heute sehr teuer, was seine Verbreitung einschränkt, trotz der Tatsache, dass es bis 300°C einsetzbar und korrosionsfrei ist. Mitte der 1980-er Jahre wurde schließlich, durch Beimischung von *Neodymium*, – eine andere seltene Erde –, die bisher beste dauermagnetische Legierung in Japan patentiert: Neodymium-Eisen-Bor (*NdFeB*) erreicht eine Remanenz von $1,4 \text{ T}$ und Energiedichten bis 400 kJ/m^3 , bei viel niedrigeren

Kosten als SmCo! Somit wurde den Dauermagneten der Weg zu unzähligen Anwendungen geebnet: Motoren, Tauchspul- und Haftsysteme, Synchronkupplungen, Magnetlager, Magnetseparatoren, Messinstrumente, Relais, medizinische und physikalische Anwendungen und nicht zuletzt die Computertechnik. Die Entwicklung geht weiter, denn NdFeB ist temperaturempfindlich, nicht korrosionsfrei und spröde. Alle diese Eigenschaften werden ständig verbessert.

⑤ **Magnetisierungsarten**

Dauermagnete erzeugen, wie stromdurchflossene Leiter, Magnetfelder. Dafür müssen die dauermagnetischen Werkstoffe, die in der Regel nach der Herstellung unmagnetisiert sind, in einem starken äußeren Magnetfeld „aufmagnetisiert“ werden. Diese starken Felder werden entweder im Luftspalt von Elektromagneten oder durch Entladung einer Kondensatorbatterie durch eine Luftspule erzeugt.

Durch Magnetisierung können verschiedene Arten der Ausbildung der „Pole“ der Dauermagnete erzielt werden, die unterschiedliche praktische Anwendungen ermöglichen. So z.B. können Magnetringe axial (wie in Lautsprechern – siehe Abb. 3.27 – und in anderen Tauchspulsystemen), oder radial (wie in Magnetlagern, – siehe Abb. 3.28 und Abb. 3.29) magnetisiert werden, wobei die axiale Magnetisierung leichter durchführbar ist. Beide Magnetisierungsarten, sowohl die radiale, als auch die axiale, können auch mehrpolig durchgeführt werden. Dauermagnetschalen (Teile von Zylindern) werden oft diametral (also parallel zum Durchmesser) magnetisiert und in kleinen Maschinen verwendet. Auch schräge Magnetisierungen wie bei dem auf Abb. 3.22 abgebildeten Tomographen, sind möglich, doch viel aufwändiger und teurer als die oben beschriebenen.

⑤ **Entmagnetisierungskennlinien gebräuchlicher Dauermagnete**

Bei der ersten Betrachtung scheint es, dass ein Dauermagnet nach dem Abschalten des hohen magnetisierenden Feldes H nur im Remanenzpunkt B_R der Hystereseschleife (siehe Abb. 3.23), also bei $H = 0$, arbeiten kann. In Wirklichkeit würde sich im Dauermagneten nur dann die Flussdichte $B = B_R$ einstellen, wenn dieser in einem geschlossenen, streufreien Eisenkreis angebracht wäre. Praktisch sind jedoch solche Magnetkreise wenig interessant, da man das Magnetfeld der Dauermagnete in Luftspalten, also in offenen Kreisen, braucht (z.B. im Luftspalt eines Motors, eines Lautsprechers, usw.).

Dann arbeitet der Dauermagnet im zweiten Quadranten der Hystereseschleife, irgendwo zwischen B_R und H_C . Diesen Kurvenzug nennt man *Entmagnetisierungskennlinie*.

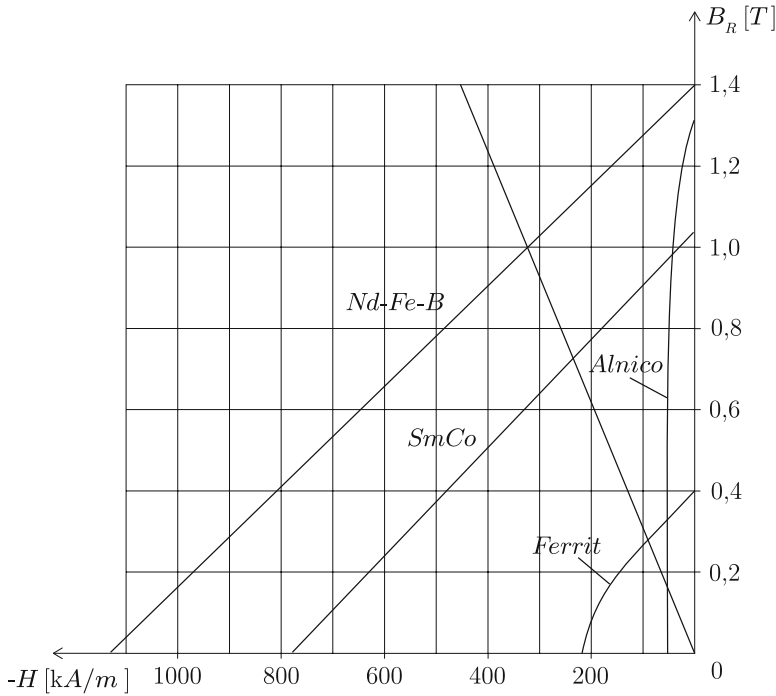


Abb. 3.33. Entmagnetisierungskennlinien

Auf Abb. 3.33 sind vier typische Kennlinien der am meisten eingesetzten Dauermagnetwerkstoffe Ferrite, Alnico und die Seltenerd-Magnete SmCo und NdFeB, dargestellt. Ferrite und Seltenerd-magnete (englisch: Rare-Earth-Magnets, kurz: REM) weisen eine praktisch lineare B-H-Kennlinie im II. Quadranten auf, Alnico dagegen ist ausgeprägt nichtlinear, ein Grund warum es heute viel seltener eingesetzt wird. Die schmale Hystereseschleife des Alnico mit geringer Koerzitivfeldstärke (auf Abb. 3.33 $H_C = -50 kA/m$), zwingt dazu, die Dauermagnete im endgültigen Magnetkreis zu magnetisieren, (siehe Abschnitt „Scherungsgerade“), was die Herstellungskosten erhöht.

Heute werden meistens Ferrite (wenn ein großes Volumen in Kauf genommen wird, zugunsten des niedrigen Preises) oder, bei anspruchsvollen An-

wendungen, NdFeB, benutzt.

Die nächsten Betrachtungen gehen von einem NdFeB-Magneten aus, mit der auf Abb. 3.33 dargestellten Entmagnetisierungskennlinie.

Man kann leicht zeigen, dass dieser Werkstoff eine praktisch konstante, also „starre“ Magnetisierung M aufweist.

Gemäß dem Materialgesetz (Gl. (147)), ist:

$$\mu_0 M = B - \mu_0 H.$$

Wendet man diese Gleichung für einige Punkte der B - H -Kennlinie an, so ergibt sich:

$$B = 1,4\text{ T}, \quad H = 0 \curvearrowright \mu_0 M = B_R = 1,4\text{ T}$$

$$B = 1\text{ T}, \quad H = -320 \frac{\text{kA}}{\text{m}} \curvearrowright \mu_0 M = 1\text{ T} + 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 320 \cdot 10^3 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$\mu_0 M = 1\text{ T} + 0,4\text{ T} = 1,4\text{ T}$$

$$B = 0,4\text{ T}, \quad H = -830 \frac{\text{kA}}{\text{m}} \curvearrowright \mu_0 M = 0,4\text{ T} + 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 830 \cdot 10^3 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$\mu_0 M = 0,4\text{ T} + 1\text{ T} = 1,4\text{ T}$$

$$B = 0, \quad H = -1150 \frac{\text{kA}}{\text{m}} \curvearrowright \mu_0 M = 1,4\text{ T}$$

Die relative magnetische Permeabilität des NdFeB ist:

$$\mu_r = \frac{B_R}{\mu_0 H_C} = \frac{1,4}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1150 \cdot 10^3} \simeq 1.$$

Auch Ferrite weisen ein μ_r , das nahe bei 1 liegt, auf.

Anmerkung: Dauermagnete mit starrer Magnetisierung verhalten sich in einem Magnetkreis wie die Luft (!), sie bilden also für den Magnetfluss „Luftspalte“.

⊙ **Scherungsgerade, Arbeitspunkt**

Wieso herrscht im Magneten eine negative magnetische Feldstärke $-H$, die also dem magnetisierenden Feld $+H$ entgegengesetzt ist? Um das zu verstehen, betrachtet man wieder das Materialgesetz (Gl. (147)) der stationären Magnetfelder:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M})$$

wo \vec{M} die Magnetisierung des Dauermagneten bedeutet, die nur in seinem Inneren verschieden von Null ist. Nach diesem Gesetz gilt in dem Luftraum

außerhalb des Magneten:

$$\vec{B}_a = \mu_0 \cdot \vec{H}_a$$

sodass die Felder \vec{B} und \vec{H} dort identisch aussehen. Das kann jedoch im Inneren des Dauermagneten nicht mehr der Fall sein, denn dort gilt:

$$\vec{B}_i = \mu_0 \cdot (\vec{H}_i + \vec{M}).$$

Über die Feldlinien der Flussdichte \vec{B} weiß man, dass sie immer geschlossen sind (eine Konsequenz des Gaußschen Satzes des Magnetfeldes). Das wird für die Feldlinien der Feldstärke \vec{H} in Anwesenheit eines Dauermagneten nicht mehr gelten. In der Tat, wendet man das Durchflutungsgesetz:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = \Theta$$

auf einem geschlossenen Umlauf an, der außerhalb des Magneten eine Feldlinie (von \vec{B}_a oder \vec{H}_a) ist, so ergibt sich, wegen der fehlenden Durchflutung:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = \int_{\text{aussen}} \vec{H}_a \cdot d\vec{s} + \int_{\text{innen}} \vec{H}_i \cdot d\vec{s} = 0 \Rightarrow \int_{\text{aussen}} \vec{H}_a \cdot d\vec{s} = - \int_{\text{innen}} \vec{H}_i \cdot d\vec{s}.$$

Das Feld \vec{H}_i „entmagnetisiert“ den Magneten, so dass er nicht mehr in dem Remanenzpunkt B_R arbeitet, sondern in einem tiefer liegenden „Arbeitspunkt“. Zur Bestimmung des Arbeitspunktes auf der Entmagnetisierungskennlinie im II. Quadranten der Hystereseschleife muss man den gesamten Magnetkreis, in dem sich der Dauermagnet befindet, berücksichtigen.

Zur Erläuterung betrachten wir einen einfachen, unverzweigten Kreis mit einem Luftspalt (Abb. 3.34, oben).

Das Durchflutungsgesetz besagt:

$$H_M \cdot l_M + H_E \cdot l_E + H_L \cdot l_L = 0$$

wenn H_M , H_E und H_L die magnetischen Feldstärken im Magneten, im Eisen und im Luftspalt, l_M und l_L die Längen des Magneten, bzw. des Luftspaltes, bedeuten. Der magnetische „Spannungsabfall“ $H_E \cdot l_E$ im Eisen ist, wegen $\mu_E \gg \mu_0$, sehr gering und kann in erster Näherung vernachlässigt werden. Es wird:

$$H_M \cdot l_M + H_L \cdot l_L = 0.$$

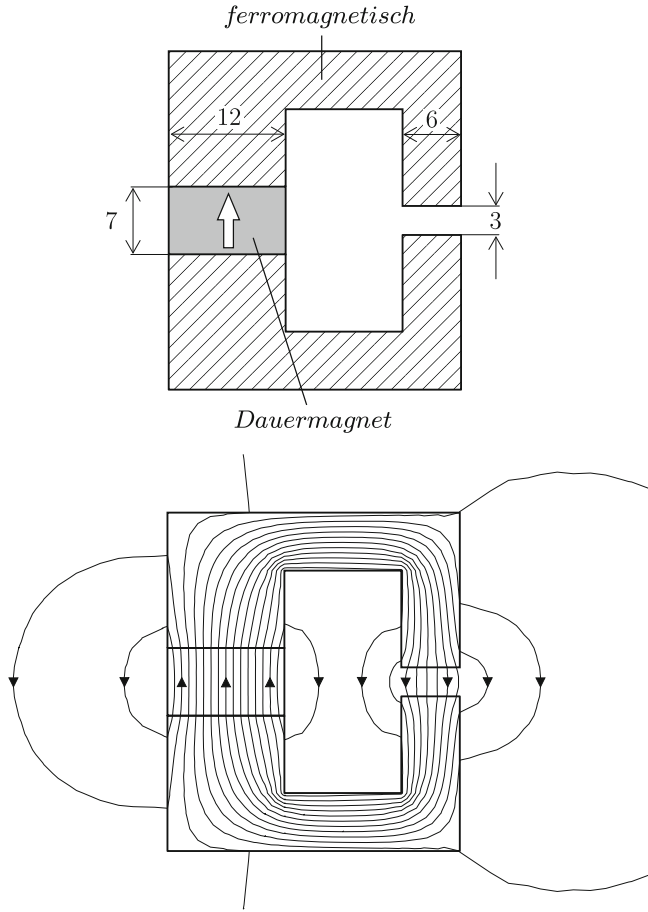


Abb. 3.34. Magnetkreis mit Dauermagnet und Luftspalt

Der Magnetfluss $\Phi = B_L \cdot A_L$ im Luftspalt wird nie ganz so groß wie der Fluss im Dauermagneten $B_M \cdot A_M$ sein, da ein Teil davon als Streufluss, der nicht durch den Nutzluftspalt fließt, verloren geht. Das Feldbild auf Abb. 3.34, unten zeigt die Streuflüsse an dem Dauermagneten und am Luftspalt. Man kann die Streuung durch einen Faktor $0 < k_s \leq 1$ berücksichtigen:

$$B_L \cdot A_L = k_s \cdot B_M \cdot A_M.$$

Dann ergibt sich für die Feldstärke H_M im Magneten:

$$H_M = -H_L \cdot \frac{l_L}{l_M} = -k_s \cdot \frac{l_L}{l_M} \cdot \frac{A_M}{A_L} \cdot \frac{B_M}{\mu_0}. \quad (159)$$

Das ist die Gleichung einer Geraden, der sogenannten „*Scherungsgeraden*“, deren Neigung im Diagramm $B = f(H)$ die folgende ist:

$$\tan \alpha = \frac{B_M}{\mu_0 H_M} = -\frac{1}{k_s} \cdot \frac{l_M}{l_L} \cdot \frac{A_L}{A_M}.$$

Man sieht, dass für die Neigung die *Verhältnisse* der Längen und der Querschnitte vom Magneten und vom Luftspalt relevant sind.

Der Schnitt der Entmagnetisierungskennlinie mit der Scherungsgeraden ist der Arbeitspunkt des Dauermagneten in dem vorgegebenen Magnetkreis. Liest man B_M ab, so kann man gleich die Flussdichte B_L im Luftspalt ermitteln (wenn man den Streufaktor k_s abschätzen kann).

Für den konkreten Fall des Magnetkreises auf Abb. 3.34, oben ergibt sich, – falls man den Streufaktor $k_s = 1$ annimmt –, für eine Flussdichte von z.B. $B_M = 1 \text{ T}$ die Feldstärke H_M :

$$H_M = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{3}{7} \cdot \frac{12}{6} \cdot 1 \text{ T} = -\frac{0,857}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{\text{A}}{\text{m}} = -682 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$$

und die Neigung:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{-B_M}{\mu_0 H_M} \right) = \arctan \left(\frac{-1}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^3 \cdot 682} \right) = \arctan(-1,17)$$

$$\alpha = -50^\circ.$$

Leider zeigt eine numerische Feldberechnung deutlich, dass man den Faktor k_s keineswegs als 1 (also die Streuung als vernachlässigbar) annehmen darf. Zählt man auf dem Feldbild Abb. 3.34, unten die \vec{B} -Linien im Magneten (es sind 15) und im Luftspalt (7), so ergibt sich $k_s = 7/15 = 0,47$: mehr als die Hälfte des Dauermagnetflusses geht als Streuung verloren. Das ergibt für H_M :

$$H_{M\text{genau}} = -0,47 \cdot 682 \frac{\text{kA}}{\text{m}} = -318 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$$

und die Neigung wird:

$$\alpha_{\text{genau}} = -68^\circ.$$

Auf den ersten Blick ist dieses Ergebnis ernüchternd, weil die Neigungen sich sehr stark voneinander unterscheiden; eigentlich beweist es lediglich, dass man die Streuung in Dauermagnetkreisen nicht vernachlässigen darf. Verfügt man nicht über ein FE-Programm, so muss man Erfahrungswert-

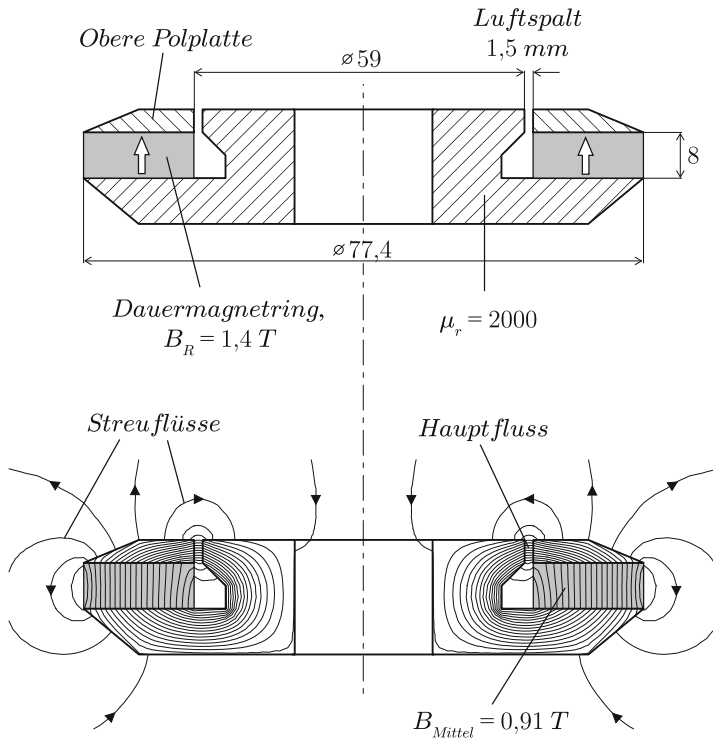
te heranziehen, doch kann man keine genauen Ergebnisse erwarten. Die genau ermittelte Scherungsgerade wurde in die Abb. 3.33 eingezeichnet. Man sieht, dass die vier betrachteten Werkstoffe in sehr unterschiedlichen Arbeitspunkten arbeiten würden:

$$\begin{aligned}\text{NdFeB :} & \quad B_M = 1 \text{ T} \\ \text{SmCo :} & \quad B_M = 0,73 \text{ T} \\ \text{Ferrit :} & \quad B_M = 0,27 \text{ T} \\ \text{Alnico :} & \quad B_M = 0,15 \text{ T}.\end{aligned}$$

Anmerkungen:

- Der Arbeitspunkt des Dauermagneten hängt von der geometrischen Gestaltung des Magnetkreises (k_s, l_M, l_L, A_L, A_M) ab. Ändern sich die Abmessungen (z.B. der Luftspalt), so ändert sich die Neigung der Scherungsgeraden und somit B_M und H_M .
- Nicht alle Bereiche des Dauermagneten arbeiten in demselben Arbeitspunkt, weil das Magnetfeld im Magneten nicht homogen ist. In Wirklichkeit bildet sich ein „Arbeitsbereich“, zwischen zwei Scherungsgeraden. In die Berechnungen setzt man einen „mittleren“ Arbeitspunkt ein.
- Bei gleichen Abmessungen des Magneten und des Kreises hängt die sich einstellende Flussdichte B_L von der Entmagnetisierungskennlinie des Dauermagnetwerkstoffes ab. Weichere Werkstoffe mit schmalerer Hystereseschleife (wie Alnico) arbeiten bei einer viel kleineren Flussdichte B_M . Um größere Flussdichten zu erreichen, müssen die Werkstoffe möglichst „hart“ sein, also eine möglichst breite Schleife aufweisen.
- Die erläuterte Rechenmethode für Magnetkreise mit Dauermagneten führt zu genügend genauen Ergebnissen nur dann, wenn alle Streuflüsse genau abgeschätzt werden können. Das ist jedoch, wegen der sehr geringen relativen Permeabilität der Dauermagnetwerkstoffe (μ_r liegt nahe bei 1, bis zu etwa 5 bei Alnico) analytisch selten möglich, so dass diese Magnetkreise meistens mit numerischen Rechenverfahren behandelt werden. Mit diesen kann man jedoch alle Flussdichten (und Magnetkräfte) sehr genau ermitteln und somit die Magnetkreise gezielt auslegen.

② **Genauere Betrachtung der Scherungsgerade. Beispiel**



Ein Beispiel aus der Praxis – der Aufbau eines Lautsprechersystems – soll noch deutlicher zeigen, wie sich das Magnetfeld in einem Dauermagneten, also sein Arbeitspunkt, einstellt. Dafür soll das Magnetsystem eines Lautsprechers, das bereits auf Abb. 3.27 gezeigt wurde, nochmals unter die Lupe genommen werden. Der Aufbau des Systems (siehe Bild oben) fängt damit an, dass ein Dauermagnetring – sei er aus NdFeB mit $B_R = 1,4\text{ T}$ – in einem starken äußeren Magnetfeld axial magnetisiert wird.

Der Ring und das entsprechende Feldbild sind auf Abb. 3.35 gezeigt. Die FE-Berechnung ergibt eine mittlere Flussdichte im Magneten $B_{\text{Mittel}} = 0,44\text{ T}$. Ihr entspricht auf Abb. 3.38 die Scherungsgerade „Ring allein“. Übrigens: Diese Scherungsgerade kann nur mit einem FE-Programm bestimmt werden, jeder Versuch mit empirischen Werten für B_{Mittel} zu arbeiten wäre reine Spekulation.

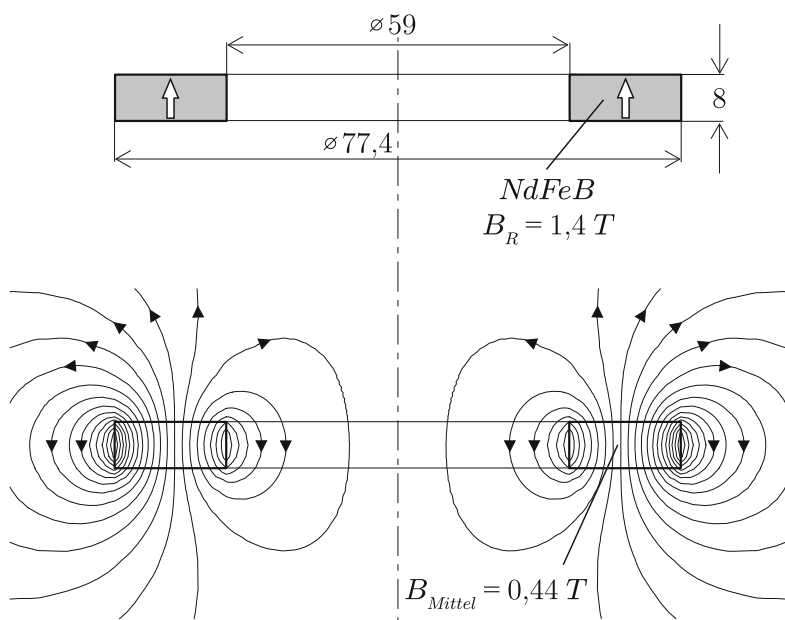


Abb. 3.35. Axial magnetisierter Dauermagnetring

Nachdem der Ring aus der Magnetisierungsvorrichtung entfernt wird, bleibt diese mittlere Flussdichte von $0,44 \text{ T}$ erhalten, falls nicht in der Nähe andere Magnete vorhanden sind (s. weiter).

Jetzt kann das Lautsprechersystem zusammengebaut werden: Der Ring wird auf die untere Platte gesetzt, über ihn wird die obere Platte angebracht, beide aus ferromagnetischem Material (z.B. hier mit $\mu_r = 2000$). Jetzt steigt die mittlere Flussdichte im Magneten auf $B_{\text{Mittel}} = 0,91 \text{ T}$, was auf Abb. 3.38 der Scherungsgerade „Lautsprecher“ entspricht. Der Arbeitspunkt ist auf der Entmagnetisierungsgeraden von NdFeB weit nach oben gewandert, der Fluss im Dauermagneten ist erheblich größer als bei dem alleinstehenden Ring. Das ist die Wirkung der weichmagnetischen Teile, die das Magnetfeld konzentrieren.

Anmerkung: Wegen $\mu_r = 1$ bewegt sich der Arbeitspunkt bei Seltenerden und Ferriten praktisch immer auf der Magnetisierungskennlinie. Nur bei extrem starken äußeren Gegenfeldern kann der Magnet irreversibel entmagnetisiert werden. Dagegen verhält sich Alnico viel ungünstiger: Einmal entmagnetisiert – z.B. beim Herausnehmen aus der Magnetisierungsvor-

richtung – kehrt der Arbeitspunkt beim Einbau in einen Eisenkreis zu viel niedrigeren B -Werten zurück. Alnico-Teile müssen im endgültigen Magnetkreis magnetisiert werden.

Abschließend soll noch gezeigt werden, welchen Einfluss andere Magnetringe, die man in die Nähe des ersten anbringt, auf den Arbeitspunkt ausüben. Abb. 3.36 zeigt zwei in die gleiche Richtung magnetisierte Ringe im Abstand 3 mm voneinander und das entsprechende Feldbild (unten).

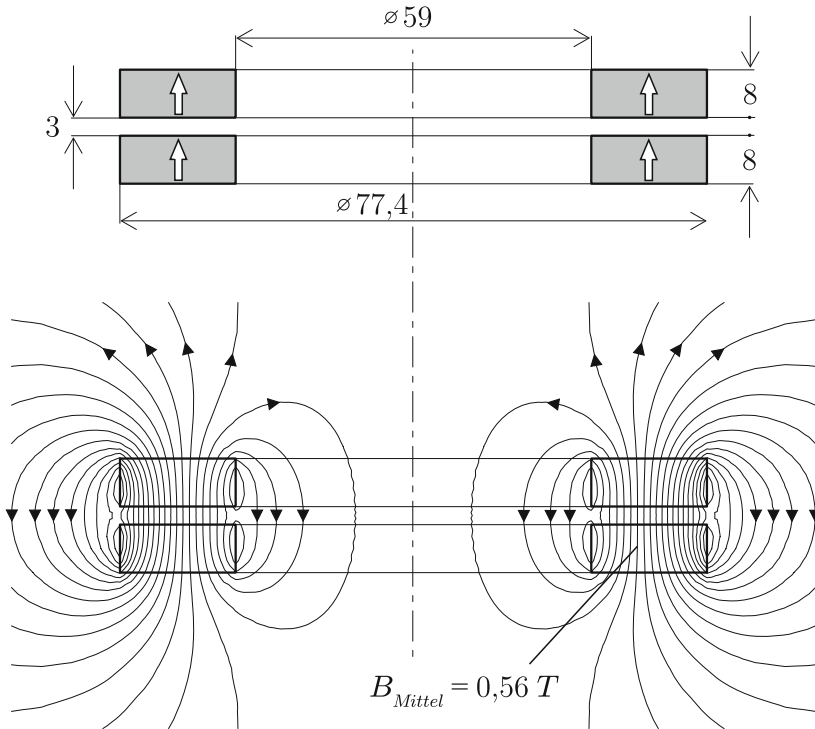


Abb. 3.36. Zwei auf Anziehung magnetisierte Dauermagnetringe

Die mittlere Flussdichte in beiden Ringen ist $B_{\text{Mittel}} = 0,56\text{ T}$, also größer als bei dem alleinstehenden Ring.

Das bedeutet, dass der zweite Ring den ersten zusätzlich magnetisiert (und umgekehrt, der erste Ring magnetisiert den zweiten), sodass ihre Arbeitspunkte nach oben wandern.

Ist jedoch der zweite Ring – wie auf Abb. 3.37 – auf Abstoßung, also entgegen, magnetisiert, so rutschen die Arbeitspunkte auf $B_{Mittel} = 0,24\text{ T}$ nach unten. Die Ringe entmagnetisieren sich gegenseitig, was das Feldbild Abb. 3.37, unten deutlich zeigt: das Feld ist, im Vergleich zu dem der auf Anziehung magnetisierten Ringe (Abb. 3.36, unten), viel inhomogener und die mittleren Bereiche der Ringe führen jetzt viel weniger Magnetfluss. Das kann bei bestimmten Abmessungen gefährlich werden, weil bei kleinen Flussdichten – und noch mehr bei negativen, im III. Quadranten liegenden – eine sogenannte „irreversible“ Entmagnetisierung auftreten kann.

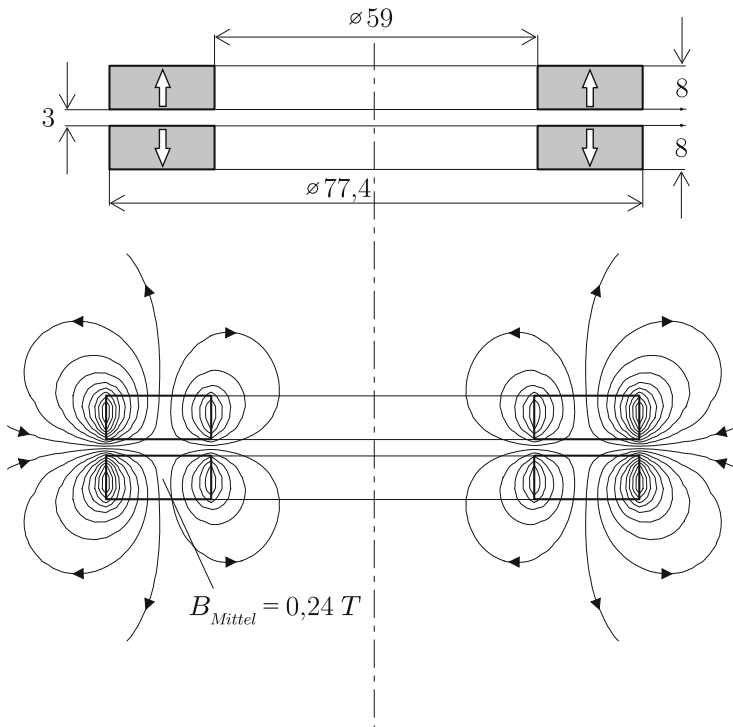


Abb. 3.37. Zwei auf Abstoßung magnetisierte Dauermagnetringe

Die Scherungsgerade „2 Ringe entgegen magnetisiert“ auf Abb.3.38 liegt so flach, dass der mittlere Arbeitspunkt gegenüber dem bei auf Anziehung magnetisierter Ringe um ca. $0,3\text{ T}$ niedriger liegt.

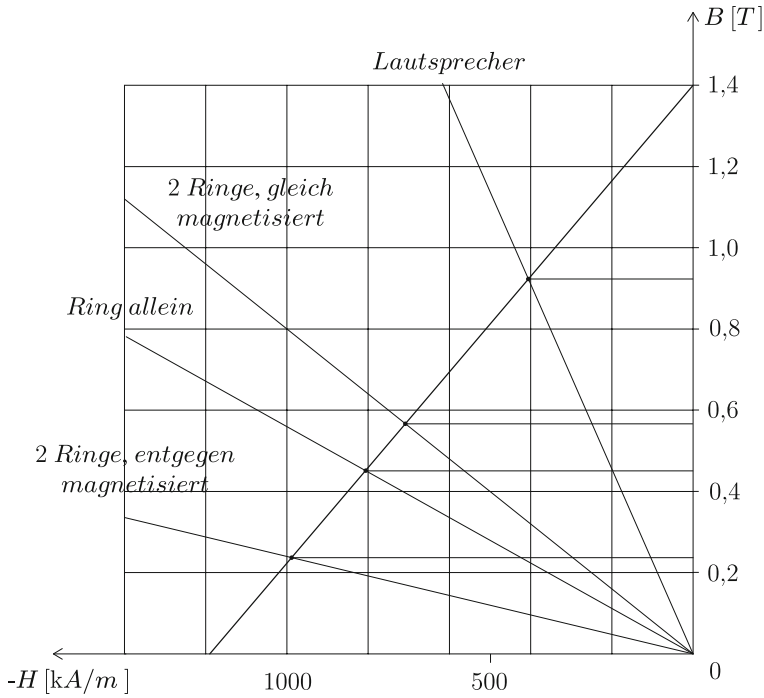


Abb. 3.38. Scherungsgeraden der untersuchten Magnetsysteme

Die Scherungsgeraden der vier untersuchten Magnetsysteme sind auf Abb. 3.38 dargestellt.

➤ 3.7.5 Nichtlineare Magnetkreise

Die tatsächliche B - H -Kennlinie ferromagnetischer Werkstoffe ist immer nicht-linear, sodass die Permeabilität μ nicht konstant ist. Wenn μ nicht konstant, sondern abhängig von H ist, unterscheidet man zwischen zwei Fällen:

1. Φ bekannt, Θ gesucht

Dieses Problem ist direkt lösbar:

$$\Phi \rightarrow B = \frac{\Phi}{A} \rightarrow H$$

und weiter aus der B - H -Kennlinie: $\mu_E = \frac{B}{H}$.

Elektrische und magnetische Felder

Eine praxisorientierte Einführung

Marinescu, M.

2012, XIV, 343 S., Hardcover

ISBN: 978-3-642-24219-9