

Elektrotechnik Grundlagen

Kapitel 83

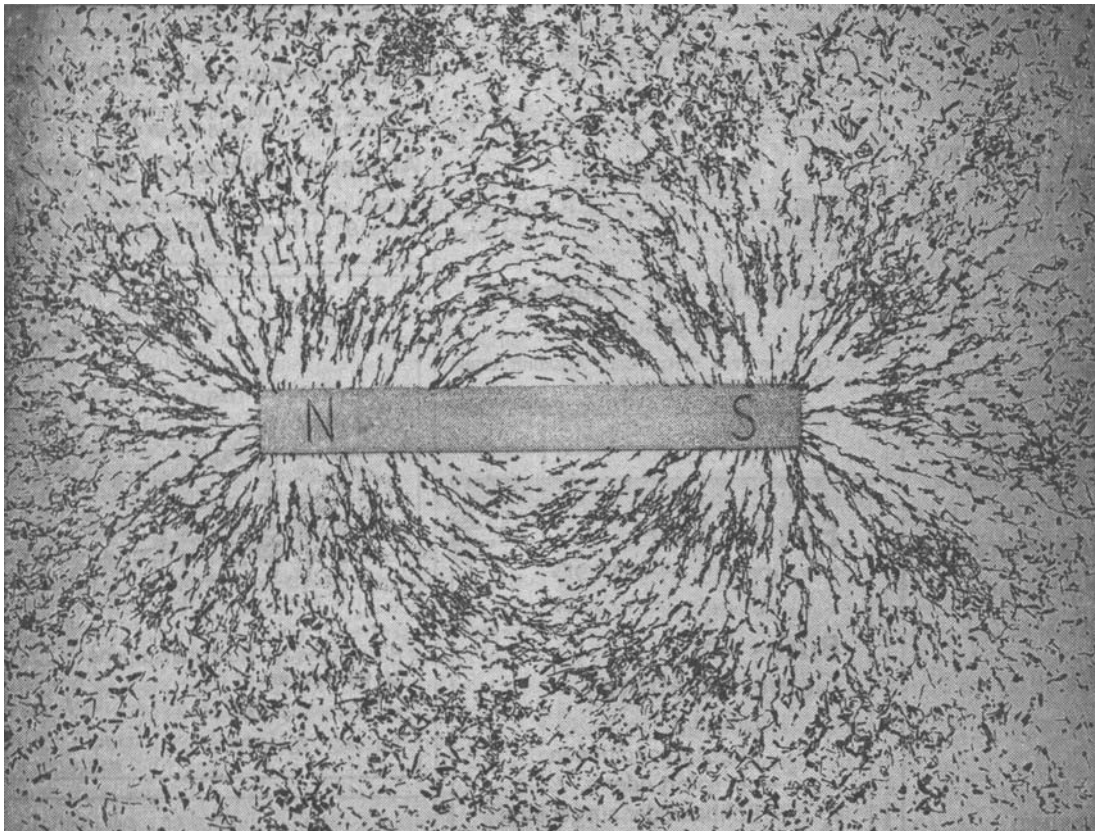
Magnetisches Feld im Eisen

2003
Kurt Steudler

(/ET_83.doc)

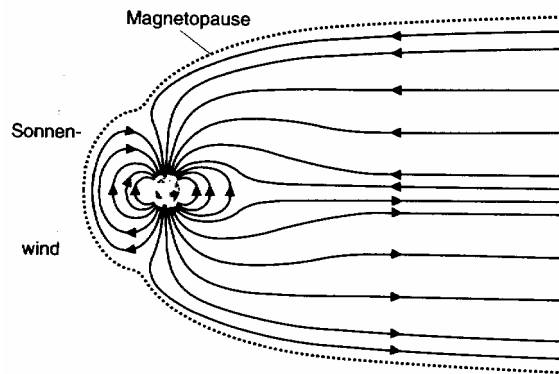
Inhaltsverzeichnis

83	Magnetisches Feld im Eisen.....	4
83.1	Das Verhalten des Eisens im Magnetfeld.....	4
83.1.1	WEISS - Bezirke, Remanenz und Koerzitiv - Feldstärke.....	4
83.1.2	Hysterese, B – H – Kurve.....	5
83.1.3	Weiche und harte ferromagnetische Stoffe.....	6
83.1.4	Hysterese und Kommutierungskurve.....	6
83.1.5	Werkstoffe für verschiedene Verwendungen.....	9
83.2	Berechnung magnetischer Felder in Eisenkreisen	9
83.2.1	Magnetischer Kreis mit und ohne Luftspalt.....	9
83.2.2	Ermittlung von Feldlinienbildern.....	11
83.2.3	Berechnung eines magnetischen Kreises mit Luftspalt.....	12
83.2.4	Scherung der B – H – Kurve und der Φ - Θ Kurve.....	15
83.2.5	Rechnen mit Dauermagneten	16
83.3	Anhang	19
83.3.1	Magnetisierungskurven	19
83.3.2	Tabelle zur Berechnung magnetischer Kreise.....	20
83.3.3	Magnetischer Kreis mit Eisen und Luftspalt. Übungsbeispiel.....	21
83.4	Verzeichnisse	22



Literaturverzeichnis und Software

- L 83-1 Feynman Richard P., Leighton Robert B., Sands Matthew, The Feynman Lectures on Physics, mainly electromagnetism and matter, Addison-Wesley Publishing Company, Reading (Massachusetts), Palo Alto, London.
- L 83-2 Frohne Heinrich, Fricke Hans, Grundlagen der Elektrotechnik, Verlag B.G. Teubner, Stuttgart – Leipzig, 1976, ISBN 3-519-26400-5.
- L 83-3 Gren Joachim und Krause Joachim, Metzler Physik, Verlag Schroedel, Hannover, 1998, ISBN 3-507-10700-7.
- L 83-4 Lüscher Edgar, Experimentalphysik II, Hochschultaschenbücher BI 115/115a, Bibliographisches Institut, Mannheim.
- L 83-5 MATHCAD[®] 2000. Mathematiksoftware, die sich für numerische Rechnungen und Laborauswertungen eignet.
- L 83-6 Meinke H., Gundlach Friedrich Wilhelm, Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Studienausgabe in 3 Bänden, Springer Verlag Berlin – Heidelberg – New York, 1986, 4. Auflage, ISBN 3-540-15394-2.
- L 83-7 Schilt Heinz, Elektrizitätslehre, Birkhäuser Verlag, Basel, 1959.
- L 83-8 Tabellenbuch Informations- und Telekommunikationstechnik, Verlag Dr. Max Gehlen, Bad Homburg vor der Höhe, 1998, ISBN 3-441-92102-x.



83 Magnetisches Feld im Eisen

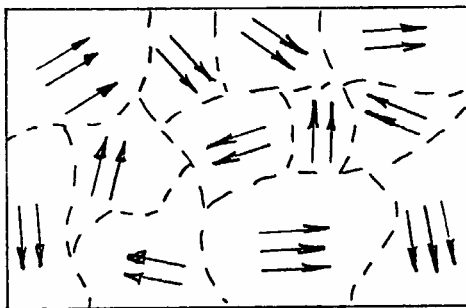
83.1 Das Verhalten des Eisens im Magnetfeld

83.1.1 WEISS - Bezirke, Remanenz und Koerzitiv - Feldstärke

In den ferromagnetischen Stoffen richten sich die mikroskopischen Magnetfelder stark nach dem Aussenfeld aus und unterstützen dieses.¹

Die Felder der einzelnen Atome sind so stark, dass sich ganze Atomgruppen oder Molekulargruppen parallel ausrichten.

Bereiche, in denen die magnetischen Felder parallel sind, werden WEISS' sche Bezirke genannt.²



Ohne äusseres Feld heben sich die Feldstärken der Weiss' sche Bezirke zunächst auf. Die Bezirke entstehen und orientieren sich zufällig: Neutraler ferromagnetischer Werkstoff.

Wird ein äusseres Feld angelegt, ändert sich die Lage. Das äussere Feld wird zum Beispiel durch eine Spule um das Material erzeugt.

Fig. 83-1 WEISS' sche Bezirke

In einem äusseren Feld richten sich die Weiss' sche Bezirke nach und nach, abhängig von der Stärke dieses äusseren Feldes, nach diesem aus. Sobald alle Weiss' sche Bezirke die Richtung des äusseren \vec{H} - Feldes angenommen haben, sprechen wir von Sättigung; (das ferromagnetische Material ist gesättigt).³

Wird das äussere Feld entfernt, bilden sich wieder zufällig orientierte Weiss' sche Bezirke. Im allgemeinen bleibt ein Restfeld zurück und das ferromagnetische Material wirkt wie ein schwacher Dauermagnet (Permanentmagnet). Dieses Restfeld heisst remanente Flussdichte B_r oder Remanenz.

¹ Vgl. auch das vorangegangene Kapitel.

² WEISS Pierre (1865 - 1940), Elsässer Physiker, Universität Strasbourg. Weiss' sche Bezirke: kleine Bereiche (ferromagnetic domains) in denen alle Spins und damit die magnetischen Momente parallel sind.

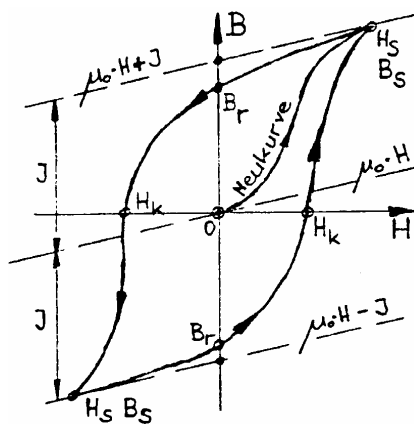
³ Die Weiss' sche Bezirke lassen sich sichtbar machen durch das Aufstreuen von feinem Eisenoxidpulver Fe_2O_3 auf die polierte Fläche eines Eisen – Einkristalls. Die Pulverpartikel richten sich längs der Bezirksgrenzen aus und wir sehen die sogenannten BITTER – Linien. BITTER Francis, Physiker USA.

Durch ein dem vorherigen entgegengerichtetes äusseres Feld \vec{H}_k kann diese Remanenz B_r aufgehoben werden. Das Feld \vec{H}_k wird Koerzitiv - Feldstärke genannt. Die Remanenz B_r kann ebenfalls durch erwärmen bis zur CURIE - Temperatur⁴ aufgehoben werden. Oberhalb der Curie – Temperatur, für reines Eisen Fe bei 770 °C, wirken die Stoffe paramagnetisch.

Es zeigt sich, dass die relative Permeabilität μ_r und damit die magnetische Flussdichte \vec{B} in den ferromagnetischen Stoffen nicht konstant, sondern eine Funktion des äusseren Feldes \vec{H} sind.

83.1.2 Hysterese, B – H – Kurve

Für den Zusammenhang $B = B(H)$ ergibt sich eine Hystereseschleife. Der Zusammenhang $\mu_r = \mu_r(H)$ kann durch herauslesen ermittelt werden.⁵



H_k : Koerzitiv – Feldstärke
 B_r : remanente Flussdichte, Remanenz
 H_S : Sättigungsfeldstärke
 B_S : Sättigungsflussdichte
 J : magnetische Polarisation

Wird mit dem Aussenfeld über die Sättigungsfeldstärke H_S hinausgegangen, verhält sich der ferromagnetische Werkstoff bezüglich $\Delta B/\Delta H = \mu_0$ paramagnetisch. Die Weiss' schen Bezirke sind in dieser Situation alle ausgerichtet.

Fig. 83-2 Hysterese mit Bezeichnungen

Unter der magnetischen Polarisation J verstehen wir die Differenz zwischen der Sättigungsflussdichte B_S und der Grösse $\mu_0 \cdot H$. Die magnetische Polarisation wird auch innere Flussdichte genannt.⁶

⁴ CURIE, Marie (Marya) und Pierre (1867-1934) und (1859-1906), französische Physiker und Nobelpreisträger. Marie und Pierre Curie waren verheiratet. In gemeinsamer Forschungsarbeit entdeckten sie die chemischen Elemente Radium und Polonium und untersuchten radioaktive Strahlung. Pierre Curie entdeckte ferner, dass magnetische Substanzen bei bestimmten Temperaturen (dem Curie-Punkt) ihren Magnetismus verlieren.

⁵ Wird neutrales Material einem Aussenfeld ausgesetzt und dieses ausgehend von Null langsam erhöht, ergibt sich für den Zusammenhang zwischen B und H zunächst die Neukurve. Die Neukurve kann nur einmal durchlaufen werden.

⁶ Die magnetische Polarisation J entspricht dem Zuwachs an magnetischer Flussdichte durch die Bildung und Ausrichtung der Weiss' schen Bezirke.

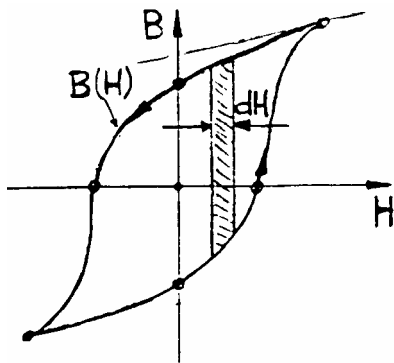


Fig. 83-3 Energie im Hysteresedurchlauf

Damit sich die Weiss' schen Bezirke ausrichten können, muss Arbeit oder Energie aufgewendet werden. Diese Energie pro Volumeneinheit ergibt sich aus der Fläche unter der Hystereseschleife.

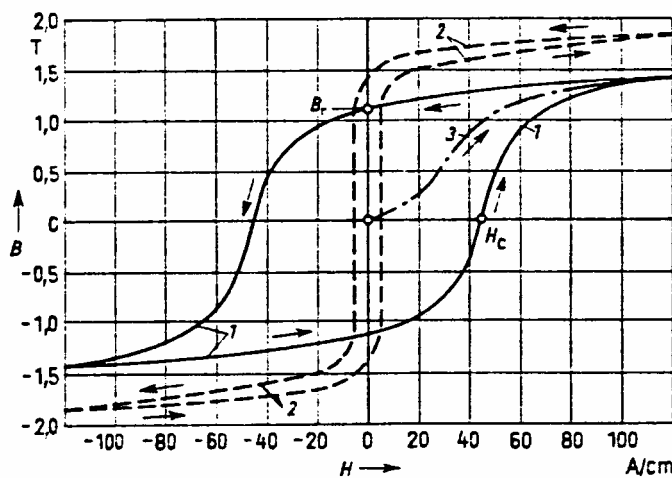
$$W = V \cdot \int_{\text{Fläche}} B \cdot dH \quad (83-1)$$

83.1.3 Weiche und harte ferromagnetische Stoffe

Für unterschiedliche ferromagnetische Werkstoffe ergeben sich verschiedene Hystereseschleifen oder Funktionsverläufe $B = B(H)$.

Je nach der Energie, die aufgewendet werden muss, um die Weiss' schen Bezirke ausrichten zu können, sprechen wir von harten oder von weichen ferromagnetischen Stoffen.

Schmale Hystereseschleifen entsprechen magnetisch weichen, breite B - H - Kurven dagegen magnetisch harten Materialien.

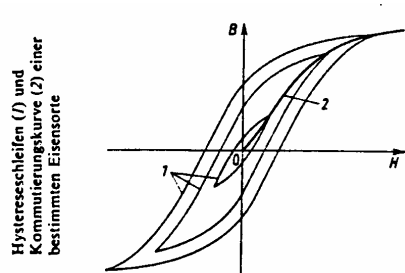


Hystereseschleifen einer magnetisch harten (1) und magnetisch weichen (2) Eisensorte
3 Neukurve der harten Eisensorte
 B_r Remanenzinduktion
 H_c Koerzitivfeldstärke

Fig. 83-4 Magnetisch harte und weiche Werkstoffe. (Aus [L 83-2])

83.1.4 Hysterese und Kommutierungskurve

In den praktischen Anwendungen wird oft weiches, ferromagnetisches Material verwendet.



Aus diesem Grunde wird in praktischen Berechnungen mit weichem Material anstelle der Hystereseschleife eine mittlere Kommutierungskurve oder Magnetisierungskurve zugrunde gelegt.

Fig. 83-5 Hysterese und Kommutierungskurve. (Aus [L 83-2])

Die Magnetisierungskurve ergibt sich aus den Umkehrpunkten beim Durchlaufen verschiedener Hystereseschleifen.^{7, 8}

Der Zusammenhang $\mu_r = \mu_r(H)$ kann aus der Magnetisierungskurve abgelesen werden. Für weiche ferromagnetische Stoffe ergibt sich für $\mu_r = \mu_r(H)$ ein Maximum.

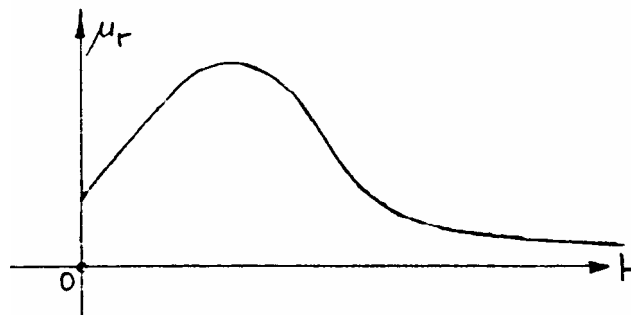
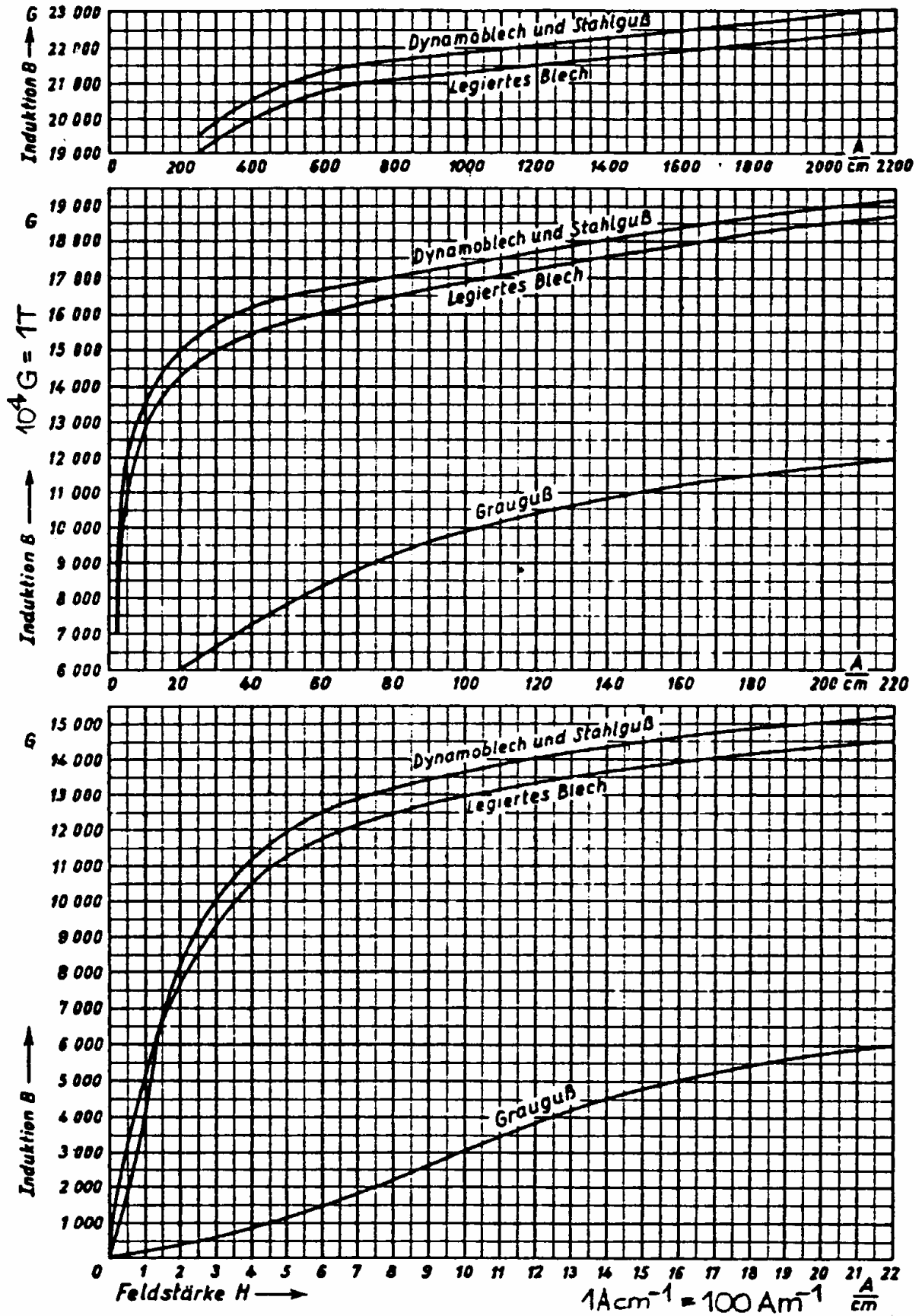


Fig. 83-6 Relative Permeabilität als Funktion des äusseren Feldes

Den praktischen Berechnungen im vorliegenden Kurs sind die nachstehenden Kommutierungskurven oder Magnetisierungskurven zugrunde gelegt.

⁷ Wir sind dabei auf entsprechende Kurven der Materialhersteller angewiesen, da es für die Funktion $B = B(H)$ keine geschlossene Form gibt. Dagegen kann eine gemessene Kurve mathematisch angenähert werden.

⁸ Damit ein magnetisiertes ferromagnetisches Material entmagnetisiert werden kann, müssen mehrere Hystereseschleifen mit abnehmendem äusserem H – Feld durchlaufen werden.



83.1.5 Werkstoffe für verschiedene Verwendungen

Es muss der anwendungsorientierten Technik überlassen bleiben zu entscheiden, welcher Werkstoff sich für welchen Verwendungszweck eignet.

Dauermagnete oder Permanentmagnete verlangen nach hohem B_r und H_k , das heisst eine einmal aufgebrachte Magnetisierung soll mit hoher Remanenz erhalten bleiben und schlecht rückgängig gemacht werden können. Es eignen sich dazu harte ferromagnetische Werkstoffe mit genügender Remanenz.

Wollen wir einen Transformator bauen, Wechselfeldsignale übertragen oder allgemeiner, wollen wir ein B - Feld, das einem H - Feld rasch folgt, suchen wir nach möglichst weichen ferromagnetischen Werkstoffen. (Enge Hystereseschleife).

Die jeweiligen geforderten Eigenschaften finden sich in anwendungsorientierten Legierungen.

Für Permanentmagnete sei folgende Tabelle angefügt:

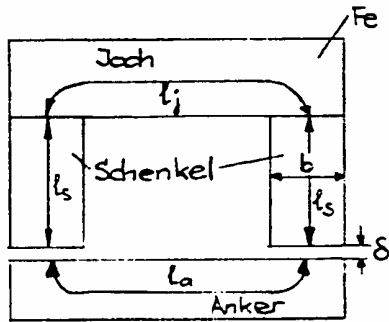
Material	Zusammensetzung in %	Remanenz B_r in T	Koerzitivfeld H_k in kAm^{-1}
Kohlenstoffstahl	98Fe; 0,06C; 0,9Mn und Spuren	0,95	3,6
Kobaltstahl	52Fe; 36Co; 7W; 3,5Cr; 0,5Mn; 0,7C; Spuren	0,95	18
Alnico 2	55Fe; 10Al; 17Ni; 12Co; 6Cu	0,76	42
Alnico 5	51Fe; 8Al; 14Ni; 24Co; 3Cu	1,25	44

Tabelle 83-1 Legierungen von Dauermagneten

83.2 Berechnung magnetischer Felder in Eisenkreisen

83.2.1 Magnetischer Kreis mit und ohne Luftspalt

Der magnetische Kreis besteht vorwiegend aus Eisen (oder einem ähnlichen Material hoher relativer Permeabilität). Er ist in sich geschlossen oder, auf die ganze Länge betrachtet, gering unterbrochen durch ein magnetisch neutrales Material (zum Beispiel Luft).



Wegen der grossen relativen Permeabilität des Eisens und der schmalen Luftspalte darf zunächst angenommen werden, dass der magnetische Fluss im Kreis erhalten bleibt.

Fig. 83-7 Magnetischer Kreis mit und ohne Luftspalt

Bei Luftspalten δ ergeben sich Streufelder, das heisst das Feld verbreitert sich in der Umgebung der Luftspalte. Für den Fluss vergrössert sich die wirksame Fläche, was wir mit Zuschlägen berücksichtigen.

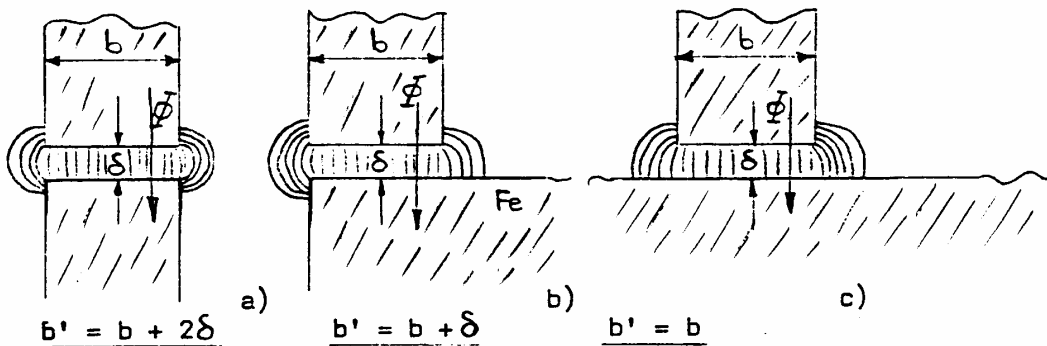
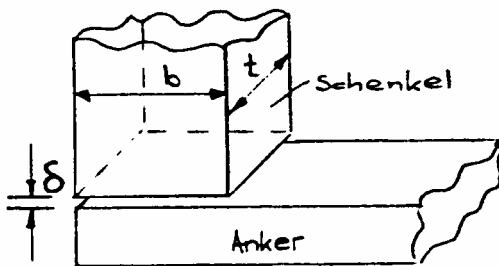


Fig. 83-8 Luftspaltzuschläge

Für die Berechnung der massgebenden Querschnitte im Luftspalt werden die Breiten b' eingesetzt.

Im Zusammenhang mit der magnetischen Flussdichte B_δ im Luftspalt ist der entsprechende wirksame Querschnitt A_δ einzusetzen.



Die wirksame Querschnittsfläche A_δ im Luftspalt wird

$$A_\delta = (b + \delta)(t + \delta)$$

Fig. 83-9 Wirksame Fläche im Luftspalt

83.2.2 Ermittlung von Feldlinienbildern

Vereinfachungen nach Fig. 83-8 sind oft nicht möglich. Da die Berechnung im Bereich inhomogener Felder einen hohen Aufwand erfordern, wird versucht die Feldlinien zeichnerisch zu ermitteln.

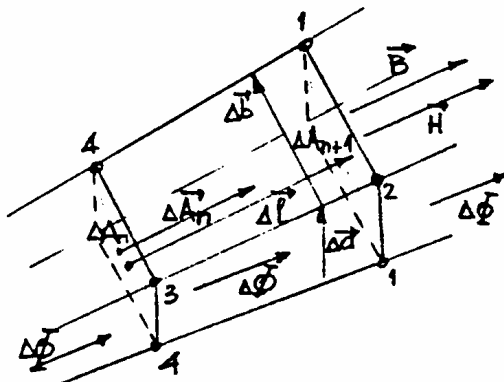


Fig. 83-10 Röhren - Modell

Dabei gelten folgende Überlegungen. In ein gegebenes B – Feld oder H – Feld werden „Röhren“ gelegt. Innerhalb einer Röhre sei $\Delta\Phi$ konstant.

Es gelten

$$\Delta\Phi = \vec{B} \cdot \Delta\vec{A}_n \quad \text{und} \quad U_m = \vec{H} \cdot \vec{\Delta l}$$

$$\text{Daraus wird } \frac{\Delta\Phi}{\Delta U_m} = \mu \cdot \frac{\Delta A_n}{\Delta l} = \Delta\Lambda$$

Werden „Röhrenstücke“ mit konstantem $\Delta\Lambda$ gebildet, lassen sich die Feldlinien zeichnerisch ermitteln.

Von einer quadratischen Struktur oder von der Kästchenmethode wird gesprochen, wenn $\Delta\Lambda = 1$ bleibt.

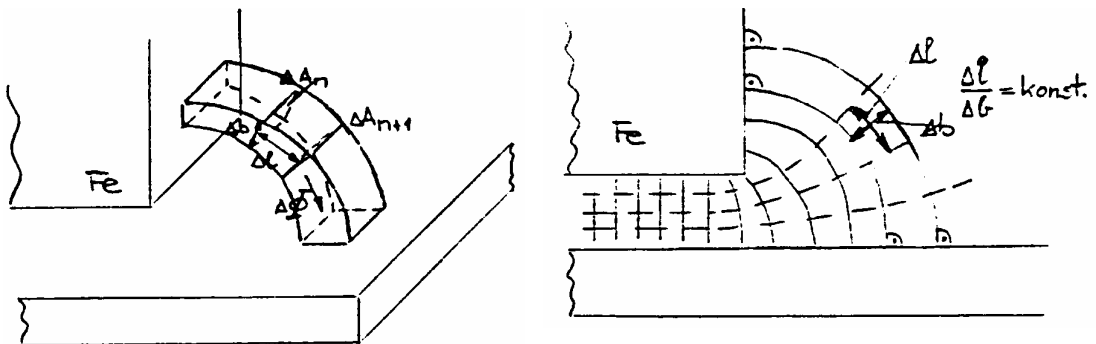


Fig. 83-11 Kästchenmethode

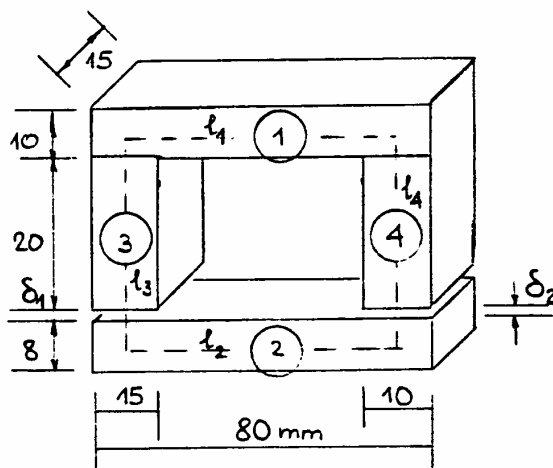
83.2.3 Berechnung eines magnetischen Kreises mit Luftspalt

83.2.3.1 Beispiel 1

Berechnungsaufgaben können in zwei Formen gestellt sein. Entweder soll zu einem gewünschten Fluss Φ die notwendige Durchflutung Θ gesucht oder es soll der Fluss aus der Durchflutung ermittelt werden.

Der zweite Fall kann mit einfachen Mitteln nicht gelöst werden.⁹

Gegeben sei folgende Anordnung:



Luftspalte: $\delta_1 = 2 \text{ mm}$, $\delta_2 = 1 \text{ mm}$

Material:

Joch (1) und Anker (2): Dynamoblech.

Schenkel (3) und (4): legiertes Blech.

Im Luftspalt δ_1 soll eine magnetische Flussdichte $B_{\delta_1} = 800 \text{ mT}$ herrschen.

Wie gross muss die Durchflutung Θ sein ?

Fig. 83-12 Magnetischer Kreis. Beispiel 1

Mit der Querschnittsfläche A_{δ_1} im Luftspalt δ_1 berechnet sich der Fluss Φ zu

$$\Phi = B_{\delta} \cdot A_{\delta_1} = 0,8 \cdot (15 + 2)(15 + 4) \text{ Tmm}^2 = 258,4 \mu\text{Wb}$$

Der Fluss Φ bleibt im magnetischen Kreis erhalten, das heisst er ist überall im Eisenkreis gleich gross.

In den einzelnen Abschnitten des Kreises errechnen sich die magnetischen Flussdichten B_i zu

$$\text{im Joch (1):} \quad B_1 = \frac{\Phi}{A_1} = \frac{258,4 \mu\text{Wb}}{10 \cdot 15 \text{ mm}^2} = 1,723 \text{ T}$$

$$\text{im Anker (2):} \quad B_2 = \frac{\Phi}{A_2} = \frac{258,4 \mu\text{Wb}}{8 \cdot 15 \text{ mm}^2} = 2,153 \text{ T}$$

$$\text{im Schenkel (3):} \quad B_3 = \frac{\Phi}{A_3} = \frac{258,4 \mu\text{Wb}}{15 \cdot 15 \text{ mm}^2} = 1,148 \text{ T}$$

$$\text{im Schenkel (4):} \quad B_4 = \frac{\Phi}{A_4} = \frac{258,4 \mu\text{Wb}}{10 \cdot 15 \text{ mm}^2} = 1,723 \text{ T}$$

Bei jeder Flächenänderung ändert sich die Flussdichte im entsprechenden Abschnitt.

Aus der Flussdichte lässt sich mit Hilfe des Kurvenblattes (Magnetisierungskurve, Kommutierungskurve) durch Ablesen die Feldstärke in jedem Fe – Kreisabschnitt

⁹ Entweder wird μ_r als konstant angenommen oder sind Interpolationsverfahren anzuwenden.

bestimmen. Es werden

$$\begin{array}{llll} H_1 = 9 \text{ kAm}^{-1} & \text{(Dynamoblech)} & H_2 = 70 \text{ kAm}^{-1} & \text{(Dynamoblech)} \\ H_3 = 550 \text{ kAm}^{-1} & \text{(legiertes Blech)} & H_4 = 12 \text{ kAm}^{-1} & \text{(legiertes Blech)} \end{array}$$

In den beiden Luftspalten δ_1 und δ_2 , die auch zum geschlossenen Kreis gehören, gilt

$$B_{\delta} = 800 \text{ mT} \quad \text{und daraus} \quad H_{\delta_1} = \frac{B_{\delta_1}}{\mu_0} = 636,62 \text{ kAm}^{-1} \quad \text{und wegen}$$

$$B_{\delta_2} = \frac{\Phi}{A_{\delta_2}} = \frac{258,4 \text{ } \mu\text{Wb}}{(10+1)(15+2) \text{ mm}^2} = 1,382 \text{ T} \quad \text{wird} \quad H_{\delta_2} = \frac{B_{\delta_2}}{\mu_0} = 1,1 \text{ MAm}^{-1}$$

Die gesuchte Durchflutung Θ ergibt sich aus $\Theta = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l}$ mit

$$\Theta = \sum H_i \cdot l_i = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + H_3 \cdot l_3 + H_4 \cdot l_4 + H_{\delta_1} \cdot \delta_1 + H_{\delta_2} \cdot \delta_2, \text{ das heisst der Summe aller magnetischen Spannungen } U_{mi} \text{ zu}$$

$$\Theta = 9 \cdot 77,5 + 70 \cdot 75,5 + 0,55 \cdot 20 + 12 \cdot 21 + 636,62 \cdot 2 + 1099,8 \cdot 1 \text{ A}$$

$$\Theta = 8,62 \text{ kA (kAWdg)}$$

Es ist geeignet, den Berechnungsvorgang in einer Tabelle zusammenzustellen

Weg l_i	A_i [A]=mm ²	B_i [B] = T	H_i [H]=kAm ⁻¹	l_i [l]= mm	Θ [Θ] = A	Bemerkungen (Material)
l_1	150	1,723	9	77,5	697,5	Dynamoblech
l_2	120	2,153	70	75,5	5285	Dynamoblech
l_3	225	1,148	0,55	20	11	legiertes Blech
l_4	150	1,723	12	21	252	legiertes Blech
δ_1	323	0,8	636,62	2	1273	
δ_2	187	1,382	1099,8	1	1100	
				Σ	<u>8,62</u> <u>kAWdg</u>	

Die im Luftspalt δ_1 geforderte Flussdichte $B_{\delta_1} = 800 \text{ mT}$ wird mit einer Durchflutung von $\Theta = 8,6 \text{ kAWdg}$ erreicht.

Für eine Verwirklichung zur Verfügung steht ein Wickelraum von $A_{\text{Wickel}} = 55 \cdot 20 \text{ mm}^2 = 1100 \text{ mm}^2$. Bei einem Füllfaktor von $k = 0,3$ ergibt sich im Draht eine Stromdichte von $j = 26 \text{ Amm}^{-2}$. Damit ist der Kreis nicht Realisierbar, denn es sollten Stromdichten über 3 Amm^{-2} vermieden werden.

83.2.3.2 Beispiel 2

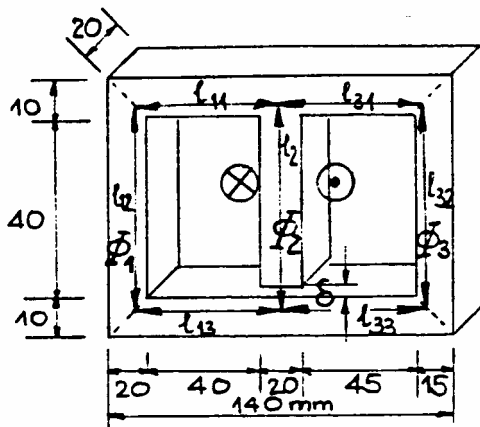


Fig. 83-13 Magnetischer Kreis. Beispiel 2

Im Luftspalt $\delta = 1 \text{ mm}$ des skizzierten Kernes aus legiertem Blech soll eine magnetische Flussdichte von $B_\delta = 1,4 \text{ T}$ herrschen.

Die Wicklung soll um den mittleren Schenkel gelegt werden.

Wie gross wird die notwendige Durchflutung Θ ?

Der Fluss im mittleren Schenkel wird

$$\Phi_2 = B_\delta \cdot A_\delta = 1,4 \cdot 20 \cdot (20 + 2) \mu\text{Wb} = 616 \mu\text{Wb}$$

Der Fluss Φ_2 wird erzeugt von der Durchflutung Θ im mittleren Schenkel. Hier tritt der ganze Fluss auf, der sich die beiden äusseren Schenkel verteilt. Es gilt

$$\Phi_2 = \Phi_1 + \Phi_3$$

Wie gross werden die beiden Teilflüsse Φ_1 und Φ_3 ?

Die beiden Teilflüsse verhalten sich proportional zu den magnetischen Leitwerten und umgekehrt proportional zu den magnetischen Widerständen:

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_3} = \frac{\Lambda_1}{\Lambda_3} = \frac{R_{M3}}{R_{M1}}$$

Im vorliegenden Fall ist der magnetische Widerstand R_M über die entsprechenden Weglängen wegen der unterschiedlichen Querschnitte nicht konstant.

Über die Weglänge l_1 liegen in Serie

$$R_{M1} = R_{M11} + R_{M12} + R_{M13}$$

und über die Weglänge l_3

$$R_{M3} = R_{M31} + R_{M32} + R_{M33}$$

Der magnetische Widerstand R_M verhält sich proportional zur Weglänge und umgekehrt proportional zum Produkt aus Permeabilität und Fläche.

$$R_M = \frac{l}{\mu \cdot A}$$

Für die gegebene Anordnung lassen sich die Ersatzschaltung für den magnetischen Kreis und ein entsprechendes Analogon¹⁰ als Gleichstromkreis zeichnen:
11

¹⁰ Analogon: ähnlicher Fall. Analogia, lat.: gleiches Verhältnis, Gleichförmigkeit.

¹¹ Dieses Vorgehen ist in homogenen Feldern erlaubt.

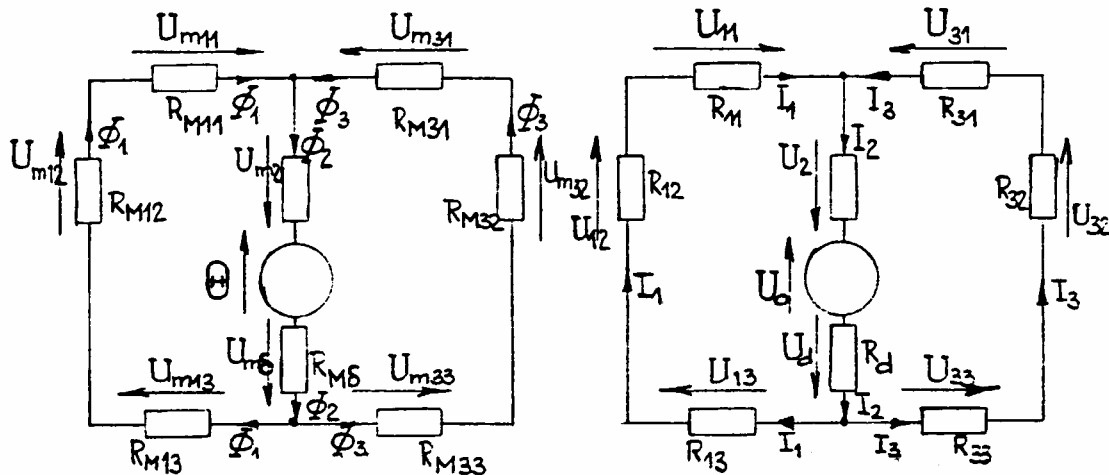


Fig. 83-14 Ersatzschaltung zum magnetischen Kreis

Im vorliegenden Eisenkreis sind

$$\Phi_2 = \Phi_1 + \Phi_3$$

und für U_{m1} und U_{m3} muss gelten

$$U_{m1} = \Phi_1 \cdot (R_{M11} + R_{M12} + R_{M13}) = \Phi_3 \cdot (R_{M31} + R_{M32} + R_{M33}) = U_{m3}$$

Aus diesen Zusammenhängen lassen sich die beiden Teilflüsse Φ_1 und Φ_3 nicht ermitteln, da sich entlang der Wege l_{1i} und l_{3i} die Querschnitte und die relativen Permeabilitäten unterscheiden (R_{M1i} und R_{M3i} können nicht gefunden werden). Ohne Kenntnis über die beiden Teilflüsse können die Flussdichten B in den einzelnen Teilabschnitten nicht bestimmt werden. Der Kreis ist nicht berechenbar, das heisst die Durchflutung Θ kann nicht gefunden werden.

Ausnahme: wird der Kreis so gestaltet, dass $\Phi_1 = \Phi_3$ wird, das heisst Φ in den beiden Teilkreisen überall auf den gleichen Querschnitt und das gleiche Material trifft, lassen sich die Flussdichten B und damit Θ finden.¹²

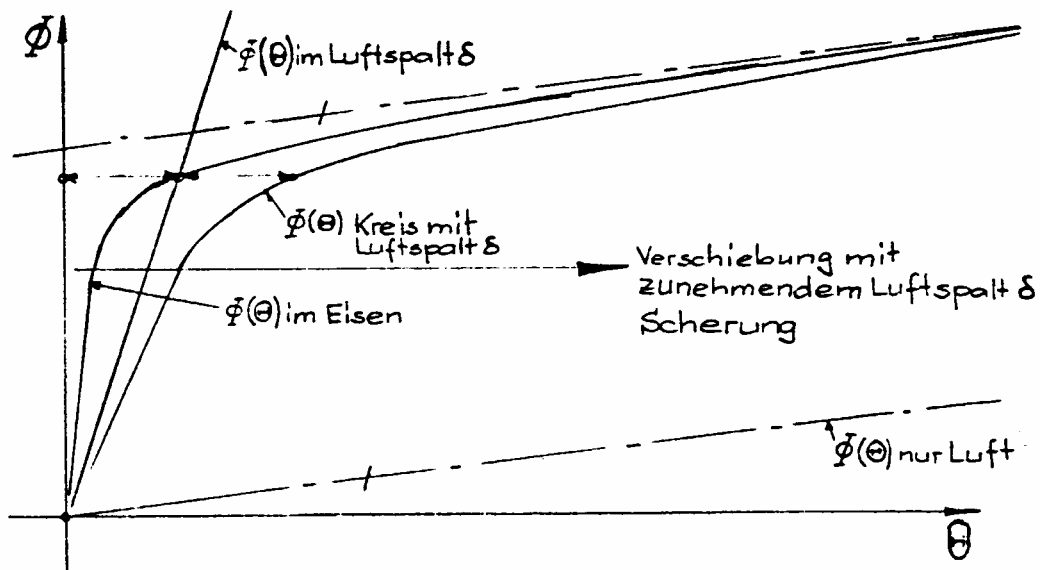
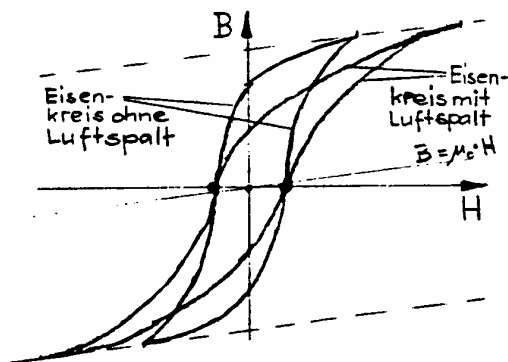
83.2.4 Scherung der $B - H -$ Kurve und der $\Phi - \Theta$ Kurve

Ein magnetischer Kreis besteht aus Weglängen in der Luft (Luftspalt) und im Eisen (Material mit hoher relativer Permeabilität).

Wird in einer bestehenden Anordnung der Luftspalt δ verändert, so ändert sich auch der Zusammenhang zwischen Φ und Θ beziehungsweise zwischen B und H (durchlaufene Hysterese).

Die Verschiebung der $\Phi - \Theta$ - Kurve mit zunehmendem Luftspalt δ nach rechts zu grösseren Θ - Werten nennen wir **Scherung**.

¹² Diese Bedingung wird bei normierten Blechen eingehalten. (EU-DIN – Normen)

Fig. 83-15 Scherung der $\Phi - \Theta$ - KurveFig. 83-16 Scherung der $B - H$ - Kurve

Ebenso sprechen wir bei der $B - H$ - Kurve, der Hysterese, von Scherung

Die Hysterese legt sich mit zunehmendem Luftspalt δ nach rechts.

83.2.5 Rechnen mit Dauermagneten

Dauermagnete gewinnen in der Technik zunehmend an Bedeutung. Sie werden eingesetzt in grossen und kleinsten Schrittmotoren (Uhren), magnetischen Kupplungen, Schaltern, Lautsprechern, Mikrofonen, Hörhilfen, magnetisch geführten Lagern und so weiter.

Permanentmagnetkreise lassen sich grundsätzlich gleich berechnen wie der magnetische Eisenkreis. Die notwendige Durchflutung Θ wird hier durch einen Dauermagneten erzeugt.

Diese Durchflutung ist abhängig vom Volumen und dem Produkt $B_M H_M$ des dauermagnetischen Materials. Für praktische Berechnungen massgebend ist die Gütezahl des permanentmagnetischen Stoffes. Die Gütezahl ergibt sich als Maximalwert $(B_M \cdot H_M)_{\max}$ aus der Entmagnetisierungskurve.

Die maximale Energiedichte $(B_M \cdot H_M)_{\max}$ ergibt sich jeweils an der Stelle, wo die Kurve für konstantes $B_M \cdot H_M$ die empirische $B_M \cdot H_M$ - Kurve tangiert.

Entmagnetisierungskurven 1 bis 6 $B_M = f(H_M)$ und Kurven konstanter Energiedichte ($B_M H_M$) von Dauermagnetwerkstoffen. Bei den Werkstoffen 1 bis 5 ist die Gütezahl $(B_M H_M)_m$ durch einen kleinen Kreis gekennzeichnet.
 1 bis 4 anisotrope AlNiCo-Legierungen
 5 isotrope AlNiCo-Legierung
 6 anisotropes Bariumferrit

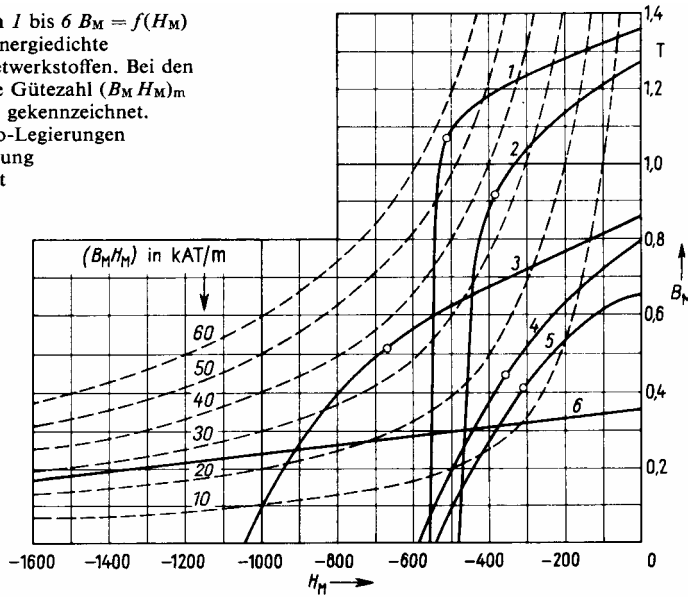
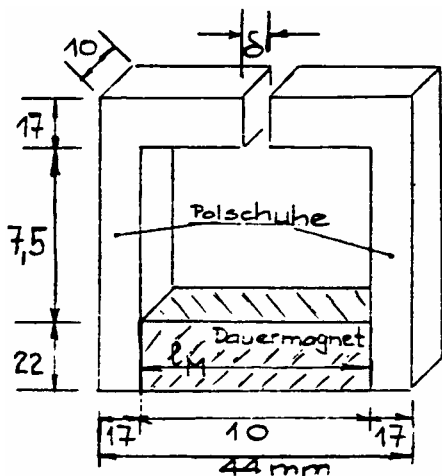


Fig. 83-17 Dauermagnetisches Material. (Aus[L 83-2])

83.2.5.1 Rechenbeispiel zu Dauermagnet



Im Luftspalt $\delta = 3,5$ mm werde eine magnetische Flussdichte von $B_\delta = 300$ mT gefordert.

Die Polschuhe bestehen aus Dynamoblech.

Welchen Anforderungen hat der Dauermagnet zu genügen?
 Welches Material ist für den Permanentmagneten zu wählen?

Fig. 83-18 Magnetischer Kreis mit Dauermagnet

Weg l_i	A_i [A]=mm ²	B_i [B] = T	H_i [H]=kAm ⁻¹	l_i [l]= mm	Θ [Θ] = A	Bemerkungen (Material)
δ	408	0,3	238,73	3,5	835,6	Luft
Fe	170	0,72	0,16	81	13	Dynamoblech
				$\Theta =$	<u>850 A</u>	

Die notwendige Durchflutung von 850 A wird erzeugt aus einem Permanentmagneten mit $\Theta = H_M \cdot \ell_M$.

Damit werden $H_M = 42,5 \text{ kAm}^{-1}$ und $B_M = 556,4 \text{ mT}$ ($= \Phi/A_M$).

Die notwendige Energiedichte des dauermagnetischen Materials wird zu $B_M \cdot H_M = 23,7 \text{ kJm}^{-3}$.

Mit diesem Wert können aus Fig. 83-17 das Material 3 oder das Material 2 (anisotrope AlNiCo – Legierungen) gewählt werden.

Wegen der höheren Koerzitivfeldstärke ist das Material 3 zu bevorzugen. Je höher H_k , desto schwieriger ist es, das Material zu entmagnetisieren.

83.2.5.2 Kenndaten einiger Dauermagnete

Grösse	Dimension	Sr - Ferrit	Alnico 5	Alnico 8	PtCo	Recoma ®
Remanenz B_r	T	0,37	1,23	0,8	0,64	0,8
Koerzitivfeldstärke H_k	kAm^{-1}	230	48	107	385	557
Energieprodukt $(B \cdot H)_{\text{Max}}$	kJm^{-3}	25	40	32	74	127
Curie – Temperatur T_C	°C	450	890	845	530	724
Dichte ρ	kg/dm^3	4,9	7,3	7,25	15,7	8,0

Tabelle 83-2 Kenndaten von Dauermagneten

Kunststoffgebundene anisotrope und isotrope RECOMA®-Permanentmagnete

Die Vorteile der kunststoffgebundenen RECOMA®-Permanentmagnete liegen in der idealen Kombination von

- guten magnetischen Eigenschaften,
- einfacherer Handhabung und
- guter Bearbeitbarkeit.

In vielen Anwendungen stellen die kunststoffgebundenen RECOMA®-Permanentmagnete einen echten Ersatz der teuren Platin-Cobalt-Magnete dar, die Rohmaterialkosten sind aber um eine Größenordnung kleiner.

Dünne Magnete, wie sie speziell in der Uhrenindustrie Anwendung finden (herunter bis zu 0,15 mm Dicke), mehrpolig axial magnetisierbar, lassen sich problemlos herstellen. Sie können in vielen Fällen die Sintermagnete RECOMA® 14 und RECOMA® 20 ersetzen.

Ideale Einsatzmöglichkeiten sind zum Beispiel gegeben in Uhren (Schrittmotoren und Kupplungen), Klein- und Kleinstmotoren, magnetisch betätigten Schaltern, Lautsprechern, Mikrofonen, Hörhilfen und vielen anderen Anwendungsbereichen.

Die isotrope Variante RECOMA® 2,5 bietet den zusätzlichen Vorteil gegenüber dem anisotropen RECOMA® 10, dass auch eine mehrachsige Magnetisierung möglich ist.

Unser Applikationsstab berechnet und dimensioniert für Sie die Magnetkreise und die dazugehörigen Magnete. Verlangen Sie ausführlichere Unterlagen oder den Besuch unserer Spezialisten.

Profitieren Sie von unseren Erfahrungen und benutzen Sie den neuesten Stand der Technik.

Magnetische Eigenschaften (bei Zimmertemperatur)

			RECOMA® 10		RECOMA® 2,5	
			min.	typ.	min.	typ.
Dichte	ρ	g/cm^3	6,0	6,5	6,0	6,5
Remanenz	B_r	Tesla	0,6	0,64	0,30	0,325
		Gauss	6 000	6 400	3 000	3 250
Koerzitivfeld	$B H_c$	kA/m	440	480	220	250
		Oersted	5 500	6 000	2 800	3 100
Kritisches Feld*	H_k	kA/m	800	1 000	320	480
		Oersted	10 000	12 000	4 000	6 000
Koerzitivfeld	$i H_c$	kA/m	1 200	1 500	1 200	1 500
		Oersted	15 000	20 000	15 000	20 000
Energieprodukt $(B \cdot H)_{\text{max}}$		kJ/m^3	72	80	16	20
		MGsOe	9	10	2	2,5
Reversible Permeabilität	μ_{rev}		1,0	1,05	1,0	1,05
Reversibler Temperaturkoeffizient der Remanenz	$Tk_{B_r} = \frac{\Delta B_r}{B_r \Delta T}$		zwischen			
			238 K und 348 K (-35 °C und +75 °C)	‰/K	-0,04	-0,04
Maximale Einsatztemperatur			373 K (100 °C)			

* Kritisches Feld: Wert des magnetischen Feldes, bei dem die Magnetisierung noch 90% des Wertes bei Feld Null beträgt.

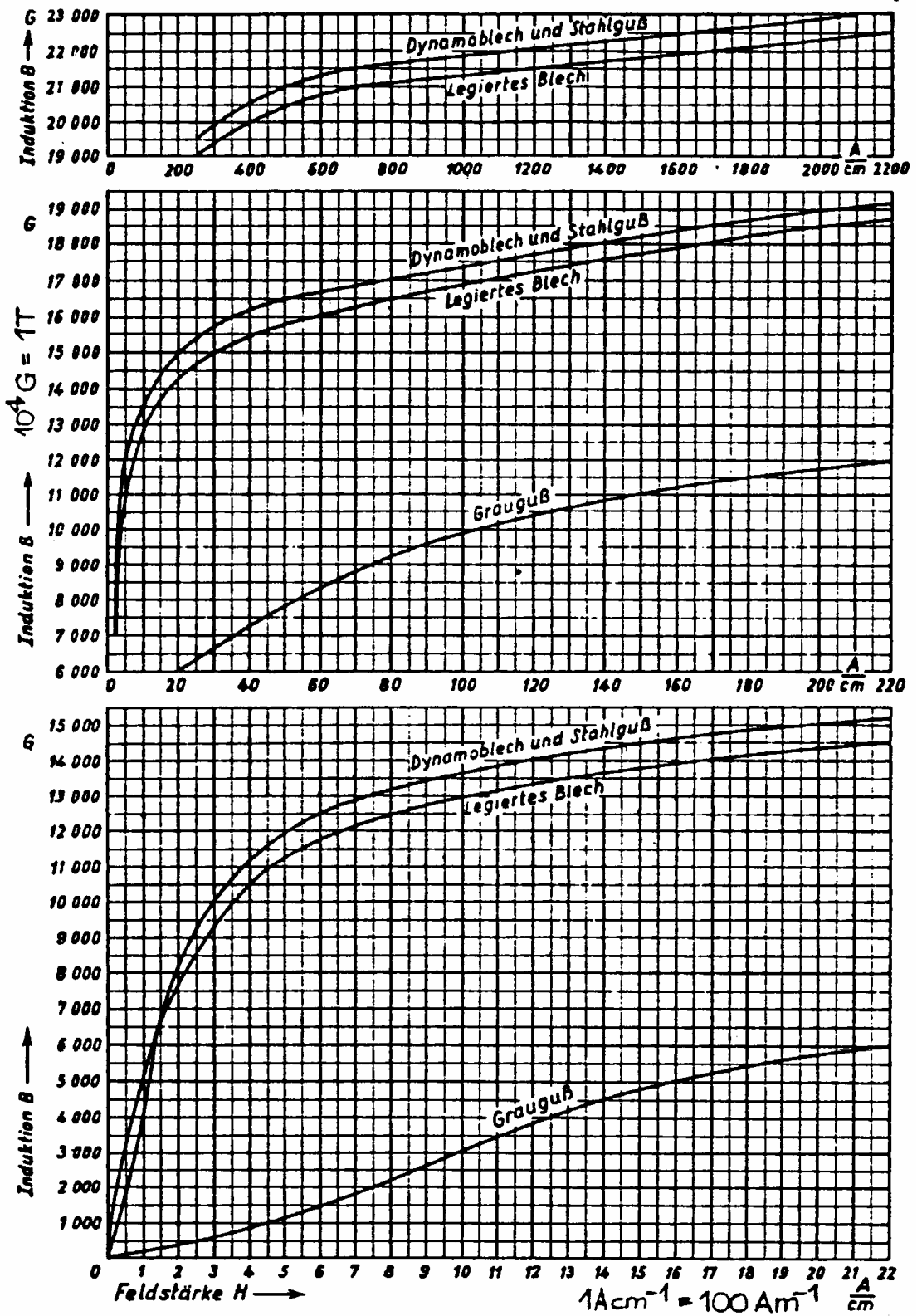
Physikalische Eigenschaften (Richtwerte)

Messwerte bei 293 K (20 °C)

Dichte	6,5 g/cm^3
Vickershärte HV-10	190
Druckfestigkeit nach ISO 604	$0,8 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$
Biegefestigkeit nach ISO 178	$4,4 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$
Wärmeleitfähigkeit bei 313 K (40 °C)	5,8 W/Km
Längenausdehnungskoeffizient	$10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Spezifischer elektrischer Widerstand	$1,4 \cdot 10^{-6} \Omega \text{m}$

83.3 Anhang

83.3.1 Magnetisierungskurven



83.3.2 Tabelle zur Berechnung magnetischer Kreise

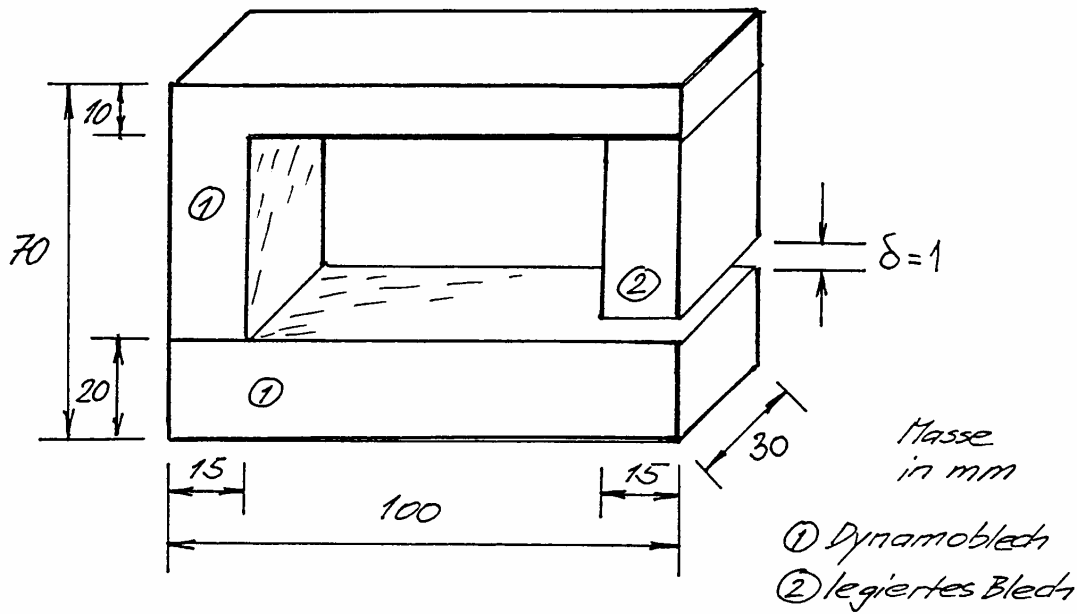
TABELLE ZUR BERECHNUNG MAGNETISCHER KREISE

Weg l_i	A_i [A]=mm ²	B_i [B] = T	H_i [H]=kAm ⁻¹	l_i [l]= mm	Θ [Θ] = A	Bemerkungen (Material)

TABELLE ZUR BERECHNUNG MAGNETISCHER KREISE

Weg l_i	A_i [A]=mm ²	B_i [B] = T	H_i [H]=kAm ⁻¹	l_i [l]= mm	Θ [Θ] = A	Bemerkungen (Material)

83.3.3 Magnetischer Kreis mit Eisen und Luftspalt. Übungsbeispiel.



$B_{\delta} =$

Weg l_i	A_i [A]=mm ²	B_i [B] = T	H_i [H]=kAm ⁻¹	l_i [l]= mm	Θ [Θ] = A	Bemerkungen (Material)

83.4 Verzeichnisse

Figurenverzeichnis

Fig. 83-1	WEISS' sche Bezirke	4
Fig. 83-2	Hysterese mit Bezeichnungen	5
Fig. 83-3	Energie im Hysteresedurchlauf.....	6
Fig. 83-4	Magnetisch harte und weiche Werkstoffe. (Aus [L 83-2]).....	6
Fig. 83-5	Hysterese und Kommutierungskurve. (Aus [L 83-2]).....	7
Fig. 83-6	Relative Permeabilität als Funktion des äusseren Feldes.....	7
Fig. 83-7	Magnetischer Kreis mit und ohne Luftspalt.....	10
Fig. 83-8	Luftspaltzuschläge	10
Fig. 83-9	Wirksame Fläche im Luftspalt.....	10
Fig. 83-10	Röhren - Modell	11
Fig. 83-11	Kästchenmethode.....	11
Fig. 83-12	Magnetischer Kreis. Beispiel 1	12
Fig. 83-13	Magnetischer Kreis. Beispiel 2	14
Fig. 83-14	Ersatzschaltung zum magnetischen Kreis	15
Fig. 83-15	Scherung der Φ - Θ - Kurve.....	16
Fig. 83-16	Scherung der B – H - Kurve	16
Fig. 83-17	Dauermagnetisches Material. (Aus[L 83-2]).....	17
Fig. 83-18	Magnetischer Kreis mit Dauermagnet.....	17

Tabellenverzeichnis

Tabelle 83-1	Legierungen von Dauermagneten	9
Tabelle 83-2	Kenndaten von Dauermagneten	18