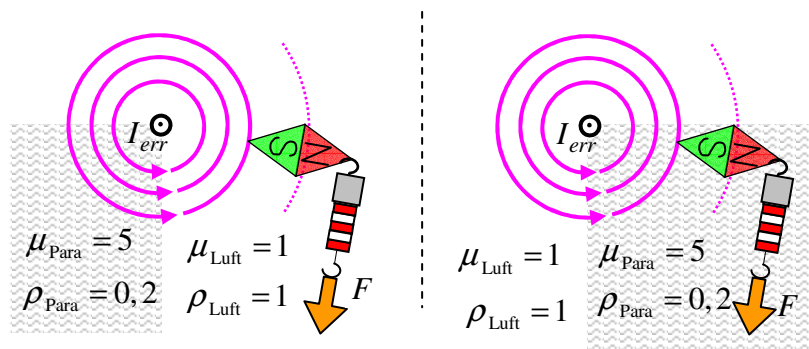


**B) Das Magnetfeld**

d) **Aufg. 1)** Berechne den Verstärkungsfaktor bei 1/4-Füllung der  $I_{err}$ -Umgebung mit  $\mu_r = 5$ .

Lösung:

Der Gesamtweg des Kraftflusses  $U = 2\pi \cdot r$  wird hier in die Längen  $l_{Luft} = 0,75U$  mit  $\rho_{Luft} = 1$  und  $l_{Para} = 0,25U$  mit  $\rho_{Para} = 0,2$  zerlegt. Daher beträgt der Wert des magnetischen Widerstandes  $R_{magn} = \rho_1 \cdot l_1 + \rho_2 \cdot l_2$



$R_{magn} = 1 \cdot 0,75U + 0,2 \cdot 0,25U = 0,8U$ . Das wird verglichen mit dem Fall  $R_0 = U$ , bei dem überall nur Luft vorhanden ist. Ergebnis  $\frac{\mathcal{F}}{\mathcal{F}_{Luft}} = \frac{I_{err}}{0,8U} \cdot \frac{U}{I_{err}} = \underline{\underline{1,25}}$ .

Kraftfluss und Flussdichte werden gegenüber dem Vakuum also um den Faktor 1,25 verstärkt.

**Aufg. 2)** Berechne die Flussdichte  $B$  in einem Schreiblesekopf mit  $\mu_{r,Fe} = 250$ ,  $l_{Fe} = 4\text{ cm}$  und  $\mu_{r,Lu} = 1$ ,  $l_{Lu} = 10\ \mu\text{m}$ , der von einem Strom  $I_{err} = 100\text{ mA}$  durchflossen wird?

Lösung: Die Widerstandswerte sind  $\rho_{Fe} = 1/250 = 0,004$  und  $\rho_{Luft} = 1$ . Damit hat der magnetische Widerstand  $R_{magn} = \rho_1 \cdot l_1 + \rho_2 \cdot l_2$  den Wert  $R = 0,004 \cdot 0,04\text{ m} + 1 \cdot 0,000010\text{ m} = 0,00017\text{ m}$ . Die Formel für die Flussdichte lautet  $B = \mu_0 \cdot I_{err} / R_{magn}$ . Einsetzen:  $B = \underline{\underline{739,4 \cdot 10^{-6}\text{ T}}}$ .

e) Weitere Beispiele: Ringmagnet ohne Schlitz, mit Schlitz

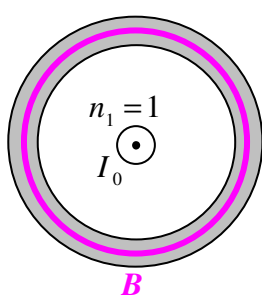


Abb.1) ohne Schlitz

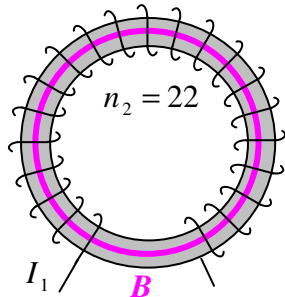


Abb.2) ohne Schlitz

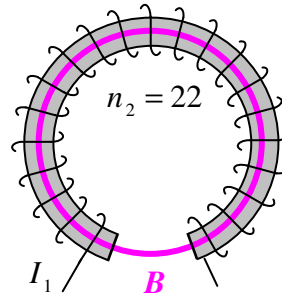


Abb.3)  $\alpha = 40^\circ$

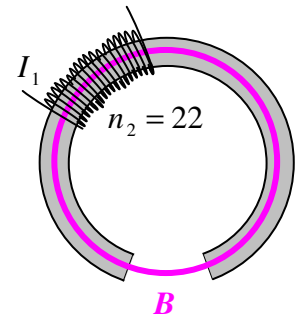


Abb.4)  $\alpha = 40^\circ$

Fünf verschiedene Anordnungen haben ringförmige Eisenkerne mit *gleichem* Umfang  $U$ . Das Eisen soll die relative Permeabilität  $\mu_{Fe} = 1000$  haben.

In Abb.1) und 2) ist der Kern geschlossen. In Abb.3) bis 5) hat er einen Luftschlitz mit  $\mu_L = 1$ . Durch den Kern von Abb.1) läuft *ein* linearer Leiter, der trotzdem  $n=1$  Windungen darstellt, weil der Stromkreis ja irgendwo geschlossen sein muss, wenn ein Erregerstrom fließen soll. In Abb.2) bis 5) ist der Kern von einer Ringspule mit  $n=22$  Windungen umwickelt. Wir vergleichen die magn. Widerstände und die Flussdichte  $B = \mu_0 \cdot n \cdot I_{err} / R_{magn}$

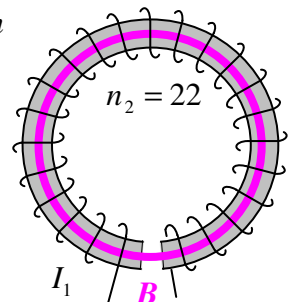


Abb.5)  $\alpha = 10^\circ$

	Abb. 1)	Abb. 2)	Abb. 3)	Abb. 4)	Abb. 5)
$R$	$0,001U$	$0,001U$	$0,112U$	$0,112U$	$0,02875U$
$B$	$125,7 \cdot U\ \mu\text{T}$	$2,765 \cdot U\ \text{mT}$	$24,691 \cdot U\ \mu\text{T}$	$24,691 \cdot U\ \mu\text{T}$	$96,188 \cdot U\ \mu\text{T}$

Bemerkung:

Abb. 1) Hier „sieht“ man nur eine halbe Windung, doch irgendwo ist der Stromkreis geschlossen, so dass hier nicht etwa  $n = 1/2$ , sondern  $n = 1$  gilt.

Abb. 2) Der  $R$ -Wert bleibt gleich, der Stromwert ver-  $n$ -facht sich.

Also wird  $B$  im Vergleich zu Abb. 1), um den Faktor  $n = 22$  größer.

Abb. 3) Durch den Schlitz werden  $R$  und  $B$  um den Faktor  $\approx 0,009$  kleiner als in Abb. 2).

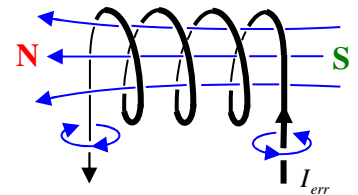
Abb. 4) hat dieselben Werte, wie Abb. 3), denn die Position der Wicklung ist gleichgültig..

Abb. 5) Durch den schmalen Schlitz werden  $R$  und  $B$  um den Faktor  $\approx 3,9$  größer als Abb. 4).

f) Lange Spule mit Luft und  $n$  Windungen.

Im Inneren ergibt sich ein weitgehend *homogenes* Feld mit parallelen Feldlinien. Im Ein- und Austrittsbereich spreizen sich die Feldlinien auf, hier ist das Feld *inhomogen*.

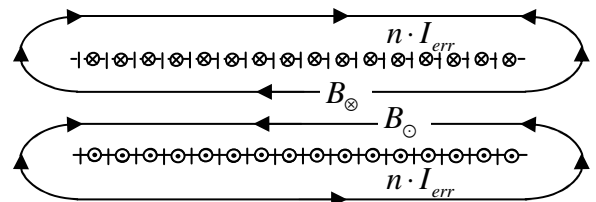
Außerhalb der Spule laufen die Feldlinien in großem Bogen zurück. Schneidet man die Spule gedanklich durch, so erkennt man das *Spulenninnere* als Überlagerungsbereich der Felder von *zwei* entgegengesetzt durchflossenen „Stromplatten“. Jede Stromplatte wird  $n$  mal von  $I_{err}$  durchflossen.



Ist  $l$  die Spulenlänge, so ist die Länge der umlaufenden Feldlinien mindestens jeweils  $2l$ .

Weil es nur Luft gibt, vereinfacht sich die Formel

für die Flussdichte zu  $B_{\odot} = B_{\otimes} = \frac{n \cdot \mu_0 \cdot I_{err}}{(2l) \cdot 1}$ ,



weil der  $\rho$ -Wert der Luft 1 ist. Wie die Abb. zeigt, überlagern sich die beiden Flussdichten im Spulenninneren gleichsinnig. Die Flussdichte im Spulenninneren beträgt daher  $B = \frac{n \cdot \mu_0 \cdot I_{err}}{l}$ .

$$B = \frac{n \cdot \mu_0 \cdot I_{err}}{l}$$

g) Lange gerade Spule mit Eisenkern

Eisen hat ein großes  $\mu_r$ , z.B.  $\mu_r = 1000$ .

Häufig liest man, dass die Flussdichte sich deshalb in der langen geraden eisengefüllten Spule gemäß

$$B = \mu_r \mu_0 \cdot n \cdot I_{err} / l$$

gegenüber der Luftfüllung

vertausendfachen würde. Das stimmt aber nicht,

wie auch die Messung zeigt: Wegen  $\rho_{Fe} \ll \rho_{Luft}$

zählt der Eisenweg bei der Berechnung des magn.

Widerstandes  $R_{magn} = \rho_{Fe} \cdot l_{Fe} + \rho_{Luft} \cdot l_{Luft}$  praktisch

garnicht. Also gilt  $B_{\odot} = B_{\otimes} \approx \frac{n \cdot \mu_0 \cdot I_{err}}{l \cdot \rho_{Luft}}$  und damit

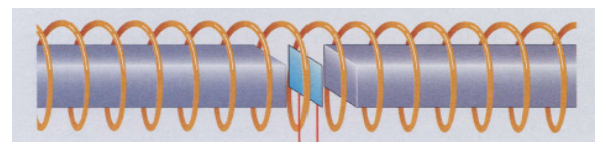
in der Summe  $B \approx \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot n \cdot I_{err}}{l}$  gerade mal eine

Verdopplung. Durch raffinierte Wicklungstechnik lässt sich das Verhältnis von Eisen- zu Luftweg noch deutlich verbessern. Dann erhält man

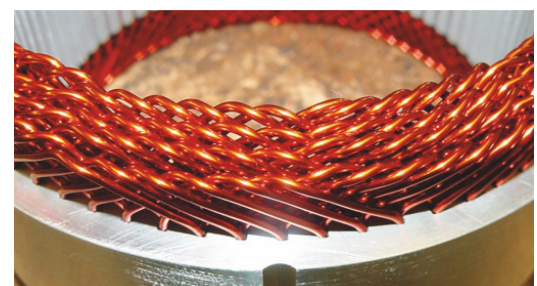
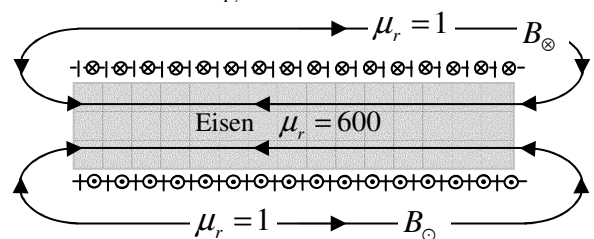
$$B = \frac{\mu_{Spule} \cdot \mu_0 \cdot n \cdot I_{err}}{l}$$

Der  $\mu_{Spule}$ -Wert fasst alle Detaildaten zusammen.

Für die Elektromobilität ist der Wert in letzter Zeit enorm . gesteigert worden.



Doorn Baader sagt,  $B$  würde mit Eisenkern z.B. 600 mal so groß. Das ist falsch.

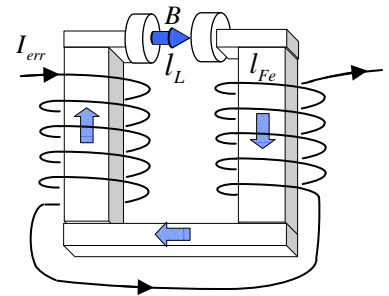


Effizienzschub durch die moderne Hairpin-Wicklung im E-Car-Motor. (Siemens)

h) Hufeisenmagnet mit Polschuhen

In der Technik wird der Hufeisenmagnet mit Polschuhen verwendet. Dadurch wird der Luftweg klein und die Feldlinien verlaufen zwischen den Polschuhen recht gut parallel.

Daher stimmt unsere Grundformel  $B = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot I_{err}}{l_{Fe} / \mu_{Fe} + l_L}$  hier recht gut.



i) Aufgaben

- (1) Beschreibe die Entdeckung von Hans Christian Ørsted.
- (2) Was besagt die rechte Korkenzieher-Regel?
- (3) Benenne die Ursache des Magnetismus.
- (4) Auf welche Weise lässt sich die magnetische Kraftwirkung ermitteln.
- (5) Die magn. Kraft nimmt *antiproportional* mit der Entfernung vom Erregerstrom ab. Was bedeutet das?
- (6) Wie lautet die Formel für die Magnetfeldstärke  $H$  eines linearen Stromleiters?
- (7) Benenne die Maßeinheit von  $H$ .
- (8) Man kann die Formel  $H = I_{err} / 2 \cdot \pi \cdot r$  bzw.  $H = I_{err} / U$  auf zwei Arten veranschaulichen:
  - 1) Der „Magnetismus muss sich auf den Umfangkreis verteilen“.
  - 3) Die Feldlinie muss bei ihrem Umlauf einen Widerstand überwinden.

Fragen:  
 Wie heißt dieser Widerstand?  
 Welchen Buchstaben verwenden man für diesen Widerstand?  
 Wie lautet die Formel für diesen Widerstand?  
 Welche Maßeinheit hat dieser Widerstand?
- (9) Alle Stoffe reagieren in irgendeine Weise auf ein äußeres Magnetfeld, entweder durch die Ausrichtung oder durch Aktivierung ihrer Elementarmagnete.  
Frage: Was bedeutet diese Aussage?
- (10) Wie reagieren dia-, para- bzw. ferromagnetische Stoffe auf ein äußeres Magnetfeld?
- (11) Zwei von den drei Sorten können bei Temperaturänderung ineinander übergehen. Welche sind es? Wie heißt die Übergangstemperatur?
- (12) Führt man die Messung der magnetischen Kraft in einem der (fein verstäubten) Medien aus, so ändern sich die Messergebnisse.
  - 1) Benenne die drei Fälle.
  - 2) Welche neue Größe wird zur Beschreibung der Versuchsergebnisse eingeführt?
  - 3) Was bedeutet der Index „r“ an dieser Größe?
  - 4) Welche Maßeinheit hat diese Größe?
  - 5) In welchem Wertebereich liegt diese Größe für die drei Stoffsorten?
  - 6) Was bedeutet das Wort „permeare“?
- (13) Zusätzlich zur relativen Permeabilität wird noch die Größe  $\rho$  (rho) eingeführt.
  - 1) Wie lautet der Zusammenhang zwischen  $\mu_r$  und  $\rho$ ?
  - 2) Gib ein Beispiel für diesen Zusammenhang.
  - 3) Warum wird die Größe  $\rho$  eingeführt?
  - 4) Wie lautet die Maßeinheit von  $\rho$ ?

- (14) Der magn. Widerstand  $R$  für den Umlauf einer Feldlinie ist gleich der Länge dieses Umlaufes, weil das Zurücklegen eine längere Strecke „mühsamer“ ist. Die Formel lautet  $R = U = 2\pi r$ .
- 1) Wie ändert sich der magnetische Widerstand, wenn der Weg durch ein einheitliches Medium mit dem Widerstandswert  $\rho$  verläuft?
  - 2) Der Umfang  $U$  wird in zwei Teile  $l_1$  und  $l_2$  geteilt mit  $l_1 + l_2 = U$ . Auf der Teilstrecke  $l_1$  ist der magn. Widerstand  $\rho_1$  und auf der Teilstrecke  $l_2$  ist der magn. Widerstand  $\rho_2$ .  
Wie lautet die Formel für den Gesamtwiderstand jetzt?
- (15) In der Formel für den Kraftfluss  $\mathcal{F}$  wird der tatsächliche magn. Widerstand  $R$  des Umlaufweges berücksichtigt. Wie lautet die Formel für  $\mathcal{F}$ ?
- (16) Betrachte eine Feldlinie, die auf ihrem Umlauf um den Erregerstrom verschiedene Medien mit unterschiedlichen  $\rho$ -Werten durchläuft.
- 1) Wie verhalten sich der Kraftfluss  $\mathcal{F}$  und die Flussdichte  $B$  an den unterschiedlichen Stellen des Umlaufes?
  - 2) Wie berechnet man den festen Wert von  $\mathcal{F}$  auf dem Umlaufweg?
- (17) Die letztlich allein wichtige Flussdichte  $B$  unterscheidet sich nur geringfügig vom Kraftfluss  $\mathcal{F}$ . Benenne den Unterschied
- (18) Wie lautet die Maßeinheit der magnetischen Flussdichte  $B$ ?
- (19) Wer ist Herr Tesla?
- (20)
  - 1) Was versteht man unter einer linearen (geraden) Luftspule?
  - 2) Wie benennt man die Feldform im Spuleninneren?
  - 3) Wie benennt man die Feldform im Austritts- und Eintrittsbereich?
  - 4) Austritts- und Eintrittsbereich nennt man magn. Pole. Wer ist was?
  - 5) Es gibt eine Formel für die Luftspule. Worauf bezieht sie sich?
- (21) Die Flussdichtenformel für die Spule mit Eiskern weicht von der der Luftspule um den Faktor  $\mu_{Spule}$  ab. Was bedeutet dieser Faktor?
- (22) Häufig hat ein Hufeisenmagnet Polschuhe. Was sind diese Teile, wozu dienen sie?