3. Das elektrische Feld, Elektrostatik

3.1 Was ist ein Feld? Eigenschaften, Darstellung

Feld	Zustand des Raumes, bei dem jedem Punkt innerhalb eines bestimmten Gebietes eine physikalische Grösse – die Feldgrösse – zugeordnet ist. Vom Ort im Raum abhängig -> „Ortsfunktion“ oder „Punktfunktion“
Skalarfeld	Die Feldgrösse ist ein Skalar, d.h. eine ungerichtete Grösse. (Bsp: Temperatur)
Vektorfeld	Ein Vektor legt Betrag und Richtung fest. (Bsp: Windgeschwindigkeit, Kraft)

3.2 Das Coulombsche Gesetz

Bezeichnung	Formel	Masseinheit
Das Coulombsche Gesetz (Nur für Punktladungen)	$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi\varepsilon r^2};\ \vec{F} = \vec{E} \cdot Q_2$	$[F] = N$ r - Abstand

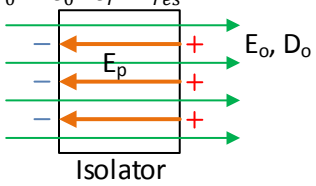
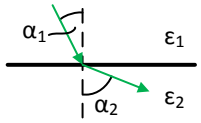
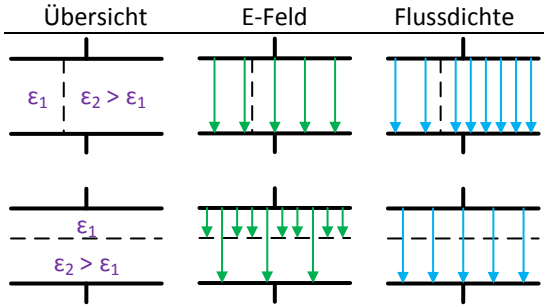
3.3 Elektr. Feld: Feldstärke, Potential, Flussdichte

Bezeichnung	Formel	Masseinheit
Elektrische Feld	$\vec{E} = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon r^2} \cdot \overrightarrow{e_r} = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon r^3} \cdot \vec{r}\ ;\ \left(\frac{Q}{4\pi\varepsilon r^2}\right)$	$[E] = \left[\frac{F}{Q}\right] = \frac{V}{m}$
	$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \cdots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^{n} \vec{E}_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i}{4\pi\varepsilon r_1^2} \vec{e}_{ri}$	
	$E(r) = E_{max} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot r_i^2$	Für Kugel Koaxial → nur r^1
Potential einer Punktladung	$\varphi = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon r};\ \varphi = \frac{W}{Q}$	$[\varphi] = \frac{Ws}{As} = V$
Äquipotentialfläche	Die elektrischen Feldlinien stehen senkrecht auf den Äquipotentialflächen. (bzw. Linien)	
Zusammenhang zwischen Spg., Pot. und Feldstärke	$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q} = E \cdot l_{AB}$	($\vec{E}$ und $\overrightarrow{AB}$ gleich gerichtet und E konstant)
Spannung	$U_{AB} = \int_{r_A}^{r_B} E(r) \cdot dr = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon}\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right)$	
Arbeit	$W = \frac{Q_1 \cdot Q}{4\pi\varepsilon} \int_{r_1}^{l} \frac{1}{r^2} dr = \int_{r_1}^{l} F(r) \cdot dr$	Q – Probeladung Auf E-Linie verschieben
	$l \to \infty: W = \frac{Q_1 \cdot Q}{4\pi\varepsilon r_1}$	$[W] = Ws = J$
Leiter im elektrostatischen Feld	Das Innere eines Leiters im elektrostatischen Feld ist feldfrei und somit auch ladungsfrei. Die elektrischen Feldlinien stehen immer senkrecht zur Leiteroberfläche.	
Elektrische Flussdichte	$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}$	$\left[\vec{D}\right] = [\varepsilon] \cdot \left[\vec{E}\right] = \frac{As}{m^2} = \frac{C}{m^2}$
	$\vec{D} = \frac{Q}{4\pi r^2} \cdot \overrightarrow{e_r}$	für das radiale Feld einer Punktladung Q
Elektrischer Fluss	$\Psi = D \cdot A = \int_A \vec{D} \cdot d\vec{A}$	$[\Psi] = [D] \cdot [A] = C = As$
Gauss’scher Satz der Elektrostatik	Der elektrische Fluss durch eine beliebige geschlossene Fläche (Hülle H) ist gleich der umhüllten Gesamtladung.	

3.4 Die elektrische Kapazität

Bezeichnung	Formel	Masseinheit
Kondensator, Kapazität	$C = \frac{Q}{U}; C = \frac{\varepsilon A}{d}$	$[C] = \frac{C}{U} = 1\,Farad = 1F$

3.5 Polarisation und Dielektrika

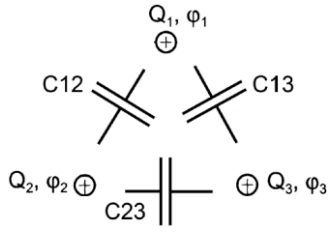
Bezeichnung	Formel	Masseinheit
Isolator im elektrischen Feld	$E_p = p \cdot E$ $D_0 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E_{res}$ 	$p \rightarrow$ Polarisierbarkeit $(0 \leq p < 1)$ $D_0 \rightarrow$ D-Feld von äusseren Ladungen erzeugt $E_p \rightarrow$ Polarisationsfeldstärke
Dielektrika	$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ $\frac{tg(\alpha_1)}{tg(\alpha_2)} = \frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}}$ 	Berechnung elektrischer Feldlinien an Grenzflächen verschiedener Dielektrika
Verschiedene Dielektrika		$E_1 = E_2 = \frac{U}{d}$ $D_1 = \varepsilon_1 \cdot E; D_2 = \varepsilon_2 \cdot E$ $E_1 = \frac{D}{\varepsilon_1}; E_2 = \frac{D}{\varepsilon_2}$ $D_1 = D_2 = D$

3.6 Energie und Kräfte im elektrostatischen Feld

Bezeichnung	Formel	Masseinheit
Energie im Kondensator	$W = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}QU$	$[W] = Ws = VAs = Nm = J$
Energiedichte	$w = \frac{W}{V} = \frac{1}{2}\varepsilon \cdot E^2 = \frac{1}{2}D \cdot E$	$[w] = \frac{Ws}{m^3}$ Formel allgemein gültig!
Energieerhaltung	$\Delta W_{mech} = F_{mech} \cdot \Delta s = \Delta W_{Feld}$	
Kraft zwischen zwei Leitern	Prinzip der virtuellen Verschiebung $F = \frac{dW_{el}}{ds} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot A = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \cdot \frac{U^2}{s^2} \cdot A$	! Coulombsches Gesetz ist **nicht** gültig! $[F] = N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$

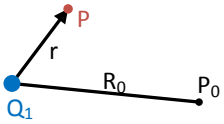
Regel: Die Feldkräfte sind so gerichtet, dass bei einer entsprechenden Verschiebung die Kapazität der Anordnung vergrössert würde.

3.7 Mehrleitersysteme, Teilkapazitäten

Bezeichnung	Formel	Masseinheit
Vorgehen	1. Geometrie sowie die Ladungen $Q_1, Q_2\ und\ Q_3$ als gegeben betrachten und daraus $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ berechnen. 2. U_{12}, U_{13}, U_{23} aus $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ berechnen. 3. Q_1, Q_2, Q_3 explizit berechnen $\rightarrow Q_1 = C_{12} \cdot U_{12} + C_{13} \cdot U_{13} \rightarrow usw.\ für\ Q_2, Q_3$	

Spezielle elektrische Felder

$\sigma = \frac{Q}{A} = Flächenladungsdichte$

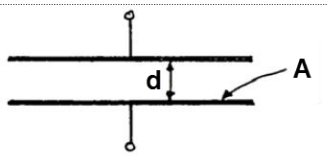
Feldtyp	$Q \rightarrow [C]$	$D \rightarrow [\frac{C}{m^2}]$	$E \rightarrow [\frac{V}{m}]$	$\varphi \rightarrow [V]$
Räumliches Zentralfeld *(Bezugspunkt unendlich weit entfernt!)*	$\sigma_1 4\pi R_1^2$	$\sigma_1 \frac{R_1^2}{r^2}$ $\frac{Q}{4\pi r^2}$	$\frac{\sigma_1 \cdot R_1^2}{\varepsilon \cdot r^2}$ $\frac{Q}{4\pi\varepsilon r^2}$	$\frac{\sigma_1 \cdot R_1^2}{\varepsilon \cdot r}$ $\frac{Q}{4\pi\varepsilon r}$
Zylindrisches Koaxialfeld  	$\sigma_1 2\pi R_1 l$	$\sigma_1 \frac{R_1}{r}$ $\frac{Q}{2\pi r l}$	$\frac{\sigma_1 \cdot R_1}{\varepsilon \cdot r}$ $\frac{Q}{2\pi\varepsilon r l}$	$\frac{\sigma_1 \cdot R_1}{\varepsilon} \cdot \ln\frac{R_0}{r}$ $\frac{Q}{2\pi\varepsilon l} \cdot \ln\frac{R_0}{r}$
Homogenes Feld	$\sigma_1 A$	σ_1 $\frac{Q}{A}$	$\frac{\sigma_1}{\varepsilon}$ $\frac{Q}{A \cdot \varepsilon}$	$\frac{\sigma_1}{\varepsilon}(R_0 - r)$ $\frac{Q}{A \cdot \varepsilon}(R_0 - r)$

Elektrische Kapazität

$Q = C \cdot U$

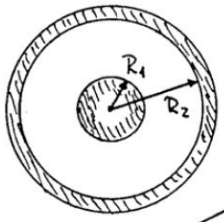
Plattenkondensator
(homogenes Feld)
A >> d_2

$C = \varepsilon \frac{A}{d}$



Konzentrische Kugelschalen
Kugelkondensator
(Räumliches Zentralfeld)

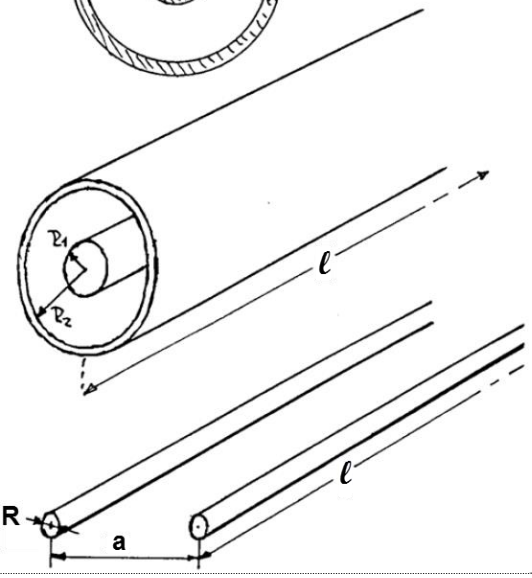
$C = 4\pi\varepsilon \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}$



Koaxialkabel
(Zylindrisches Koaxialfeld)
l >> R_1, R_2

$C = \frac{2\pi\varepsilon l}{\ln\frac{R_2}{R_1}}$

$C' = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln\frac{R_2}{R_1}}$



Paralleldrahtleitung
l >> a
a >> R

$C = \frac{\pi\varepsilon l}{\ln\frac{a-r}{r}}$

$C' = \frac{\pi\varepsilon}{\ln\frac{a-r}{r}}$

$C' \rightarrow Kapazität\ pro\ Meter$

Spannungsberechnungen

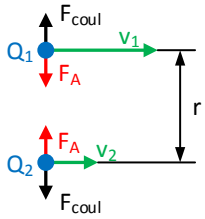
Bezeichnung	**Formel**	**Masseinheit**
Paralleldrahtleitung	$U = \frac{Q}{\pi\ \varepsilon\ l} \cdot \ln\left(\frac{a-R}{R}\right)$	$[U] = V$
Kugel	$U = E_{zul} \cdot r_i^2 \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_a}\right)$	

5. Das magnetische Feld

5.1 Magnetische Phänomene

Magnete	Ziehen Eisen und andere ferromagnetischen Stoffe an
Pole	Pole = Orte stärkster Anziehung Gleichnamige Pole -> Abstossung; ungleichnamige Pole -> Anziehung
Magnetisierung	Unter dem Einfluss eines Magnetfeldes wird Eisen selbst zum Magneten (Ausrichtung von Elementarmagneten) -> Anziehung
Magnetische Feldlinien	Feldlinien sind nur eine (fiktive) Vorstellung Richtung der Feldlinien: ausserhalb des Magneten von **N**- zum **S**-Pol Die N-Spitze einer ausgerichteten Kompassnadel zeigt in Feldlinienrichtung **Feldlinien sind stets in sich geschlossen**! Anders formuliert: es gibt keine magnetischen Ladungen; **das Magnetfeld ist quellenfrei**!

5.2 Kraftwirkung im Magnetfeld

Bezeichnung	**Formel**	**Masseinheit**
Ampèresches Gesetz $(v_1, v_2 \ll c)$	$F_A = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{Q_1 v_1 \cdot Q_2 v_2}{r^2}$  	$[F] = N$ $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$
Magnetische Flussdichte	$B = \frac{F}{Q \cdot v \cdot \sin(\alpha)} = H \cdot \mu$ $\lvert F \rvert = Q \cdot v \cdot B \cdot \sin(\alpha)$	$[B] = \frac{Vs}{m^2} = T\,; Tesla$
Lorenzkraft	$\vec{F} = Q(\vec{v} \times \vec{B}) = I(\vec{l} \times \vec{B})$	$I_1 = (l \times B_2)$ $B_2 \rightarrow$ von I_1 erzeugt an Leiter 2

5.3 Der Durchflutungssatz

Bezeichnung	**Formel**	**Masseinheit**
Magnetische Feldstärke	$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \qquad \rightarrow H(r) = \frac{Strom}{Fläche}$ Die magn. Feldstärke H hängt direkt mit der Ursache des Magnetfeldes zusammen, d.h. mit dem Strömen, die das magnetische Feld erzeugen.	$[H] = \frac{A}{m}$
Magnetische Spannung	$V_{mAB} = \int_A^B \vec{H}(s) \cdot d\vec{s}$	$[V_m] = A$
Magnetische Umlaufspannung	$\hat{V}_m$: man wählt zum Integrieren einen geschlossenen Weg.	
Durchflutung	Unter der elektrischen Durchflutung Θ einer Fläche versteht man allgemein den Gesamtstrom, der durch diese Fläche fliesst	
Durchflutungssatz *(Umlaufrichtung)*	$\hat{V}_m = \oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = \Theta = \int_A \vec{J} \cdot d\vec{A} + \sum_{k=1}^{n} I_k$ $V_m = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + \cdots + H_n \cdot l_n = N \cdot I$ Umlaufrichtung für magn. Spg. ergibt – im Sinne einer Rechtsschraube – die Bezugsrichtung für Ströme der Durchflutung.	*Gilt für Gleichströme und sich langsam ändernde Ströme!* $[\Theta] = A$

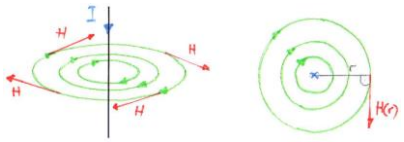
5.4 Das Gesetz von Biot-Savart

Bezeichnung	**Formel**	**Masseinheit**
Biot-Savart (Punktladungen)	$\vec{H} = \frac{Q}{4\pi r^3} \cdot (\vec{v} \times \vec{r})$	Gesetz von Biot-Savart für bewegte Punktladung
(Fadenströme)	$\vec{H} = \frac{I}{4\pi} \cdot \int_{stromkreis} \frac{(d\vec{l} \times \vec{r})}{r^3}$ $\Delta H = \frac{I \cdot \Delta l}{4\pi r^2} \cdot \sin(\alpha)$	α : Winkel zwischen $\Delta\vec{l}$ und $\vec{r}$

Anwendungen: Durchflutungssatz, Gesetz Biot-Savart

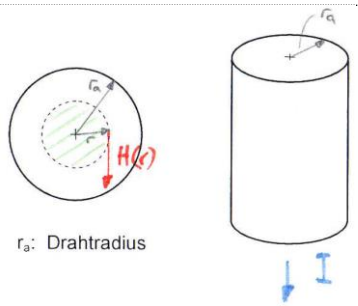
Magnetfeld…

ausserhalb eines langen, geraden Leiters



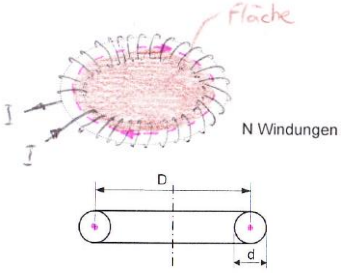
$$H(r) = \frac{I}{2\pi r}$$

im Innern eines langen, geraden Leiters



$$H(r) = I \cdot \frac{r}{2\pi r_a^2}$$
$$0 \le r \le r_a$$

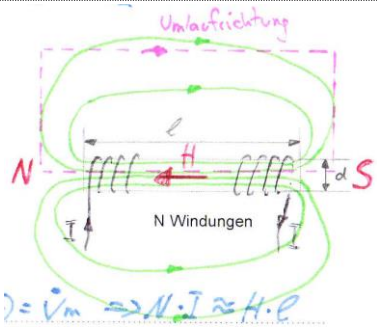
einer Toroidspule



$$H = \frac{N \cdot I}{\pi \cdot 2r}$$

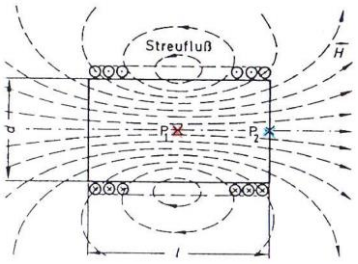
In Spulenmitte $D = 2r$ oder ausserhalb

der Zylinderspule



Näherung für l >> d

$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$



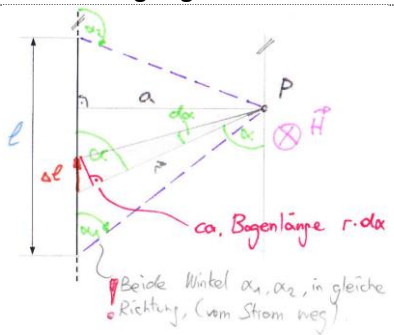
Feldstärke in Spulenmitte

$$H_1 = \frac{N \cdot I}{l} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{d}{l}\right)^2}}$$

Feldstärke im Zentrum der Spulenöffnung

$$H_2 = \frac{N \cdot I}{2 \cdot l} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{d}{2 \cdot l}\right)^2}}$$

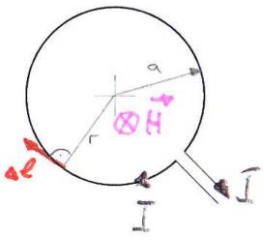
eines endlich langen geraden Leiterstücks



$$H = \frac{I}{4\pi a}(\cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2))$$

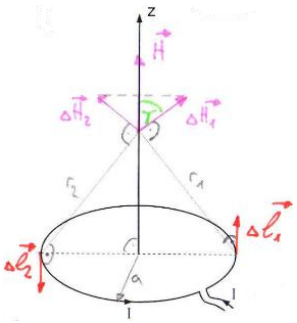
Feldstärke, verursacht von einem geraden Leiterstück, am Punkt P

auf der Achse einer kreisförmigen Leiterschlaufe



$$H = \frac{I}{2a}$$

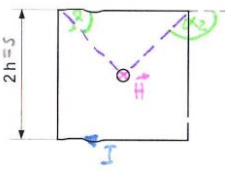
Feldstärke im Zentrum der Leiterschlaufe



$$H = \frac{I}{2} \cdot \frac{a^2}{(a^2 + h^2)^{3/2}}$$

Feldstärke auf der Achse der Leiterschlaufe

im Mittelpunkt einer quadratischen Schleife

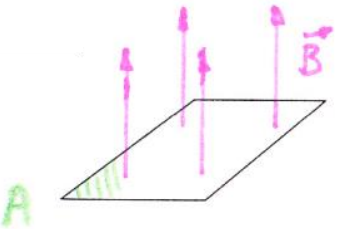
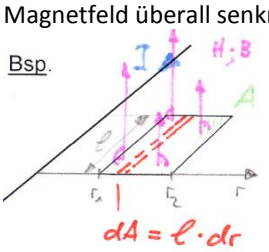
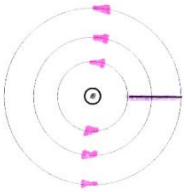
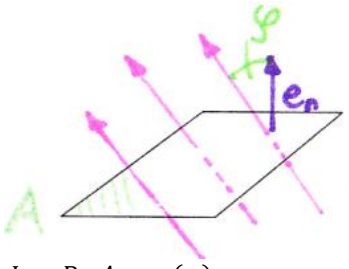
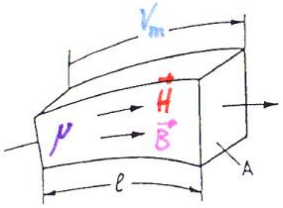


$$H = \frac{I \cdot 2\sqrt{2}}{\pi \cdot s}$$

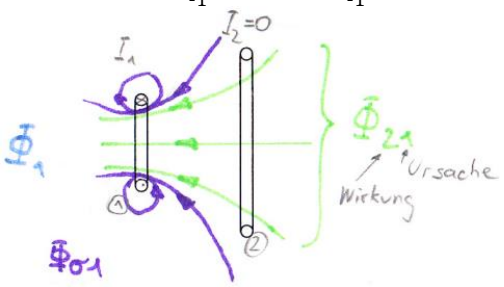
Feldstärke im Mittelpunkt einer quadratischen Schleife

$$H = \left[\frac{A}{m}\right]$$

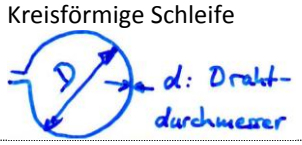
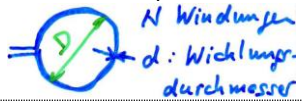
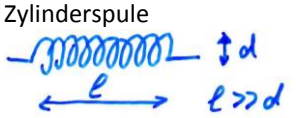
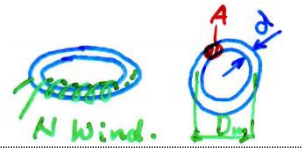
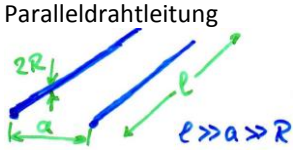
5.5 Das ohmsche Gesetzt des Magnetismus

Bezeichnung	Formel	Masseinheit
Magnetischer Fluss	$\Phi = \int_{Fläche} \vec{B} \cdot d\vec{A} = B \cdot A \cdot \cos(\varphi)$	$[\Phi] = Vs = Wb$ (Weber) (B-Feld homogen)
(Spezialfall) B über Fläche A konst.	Magnetfeld überall senkrecht auf Fläche A	B über Fläche A konst. Und B-Feld nicht senkrecht
 $\Phi = B \cdot A$	Bsp.   $\Phi = \frac{\mu\, I\, l}{2\,\pi} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$	 $\Phi = B \cdot A \cdot \cos(\varphi)$
(Gesamtfluss)	Der Gesamtfluss durch eine beliebige Hülle ist immer gleich Null!	
Magnetischer Widerstand	$R_m = \frac{V_m}{\Phi} = \frac{l}{\mu \cdot A}$ $V_m = \int \vec{H} \cdot d\vec{l}$ $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ $V_m = R_m \cdot \Phi$ $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$	$[R_m] = A/Vs = A/Wb$ 
Magnetischer Leitwert	$\Lambda = \frac{1}{R_m} = \frac{\Phi}{V_m}$	$[\Lambda] = \frac{Vs}{A} = H$ (Henry)
Ohmsches Gesetz des magnetische Kreises	$\Theta = R_m \cdot \Phi$	

5.6 Die Induktivität

Bezeichnung	Formel	Masseinheit
Induktivität	$L = \frac{\Phi}{I}$	$[L] = \frac{Vs}{A} = \Omega\, s = H$
Verketteter Fluss	$\Psi = N\, \Phi$ $L = \frac{\Psi}{I} \quad bzw. \quad L = \frac{N \cdot \Phi}{I}$	*Alle N Windungen umschliessen denselben Fluss Φ* Induktivität die Flussverkettung **Gilt immer!**
Gegeninduktivität	$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{I_1} \overset{(meist)}{\Longrightarrow} \frac{N_2 \cdot \Phi_{21}}{I_1}$ 	1.Index: Ort der Wirkung 2. Index: Ort der Ursache Φ_{21}: Anteil von ① durch ② ② ist stromlos
Ideale Kopplung	$M = \sqrt{L_1 \cdot L_2}$ $M_{21} = \frac{N_2}{N_1} \cdot L_1$	
Nicht ideale Kopplung	$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}$ $\sigma = 1 - k^2 = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}$	Kopplungsfaktor $k = 1$: ideale Kopplung $k < 0.8$: lose Kopplung Streukoeffizient

Zusammenstellung magnetischer Grössen für einige spezielle Leiteranordnungen

	Leitwert Λ	**Durchfl. Θ**	**Fluss Φ**[1] **$\Phi = \Lambda \cdot \Theta$**	**Verk.-Fluss Ψ**	**Induktivität L**[2] **$L = \Psi / I$**
Kreisförmige Schleife 	$\frac{\mu D}{2} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)$	$\Theta = I$	$\frac{\mu D}{2} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) \cdot I$	$\Psi = \Phi$	$L = \frac{\mu D}{2} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)$
Kreisrahmenspule[3] 	$\frac{\mu D}{2} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)$	$\Theta = N\,I$	$\frac{\mu D}{2} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) \cdot N \cdot I$	$\Psi = N \cdot \Phi$	$L = \frac{\mu D}{2} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) \cdot N^2$
Zylinderspule 	$\frac{\mu A}{l} = \frac{\mu \pi d^2}{4\,l}$	$\Theta = N\,I$	$\frac{\mu \pi d^2}{4\,l} \cdot N \cdot I$	$\Psi = N \cdot \Phi$	$L = \frac{\mu \pi d^2}{4\,l} \cdot N^2$
Toroidspule [4] 	$\frac{\mu A}{l_m} = \frac{\mu d^2}{4\,D_m}$	$\Theta = N\,I$	$\frac{\mu d^2}{4\,D_m} \cdot N \cdot I$	$\Psi = N \cdot \Phi$	$L = \frac{\mu d^2}{4\,D_m} \cdot N^2$
Ringspule mit rechteckf. Querschnitt 	$\frac{\mu a}{2\,\pi} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)$	$\Theta = N\,I$	$\frac{\mu a}{2\,\pi} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) \cdot N \cdot I$	$\Psi = N \cdot \Phi$	$L = \frac{\mu a}{2\,\pi} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) \cdot N^2$
Koaxialleitung 	$\frac{\mu\,l}{2\,\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$	$\Theta = I$	$\frac{\mu\,l}{2\,\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \cdot I$	$\Psi = \Phi$	$L = \frac{\mu\,l}{2\,\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$
Paralleldrahtleitung 	$\frac{\mu\,l}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{a-R}{R}\right)$	$\Theta = I$	$\frac{\mu\,l}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{a-R}{R}\right) \cdot I$	$\Psi = \Phi$	$L = \frac{\mu\,l}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{a-R}{R}\right)$

Allgemein gilt

$$\Phi = \Lambda \cdot \Theta$$

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

$$L = \Lambda = \frac{1}{R_m}$$ (falls N=1)

$$L = \Lambda \cdot N^2 = \frac{N^2}{R_m}$$ (falls die N Windungen unter sich ideal gekoppelt sind.)

[1] Ohne Fluss durch Leiter

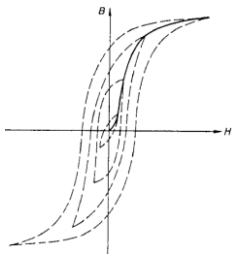
[2] Nur äussere Induktivität vgl. 5.6.3

[3] Wicklungsdurchmesser in radialer und axialer Richtung << D

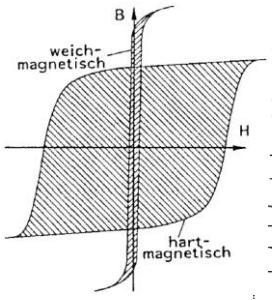
[4] $A = \pi\,d^2/4$, $l_m \approx \pi D_m$

5.7 Materie im magnetischen Feld

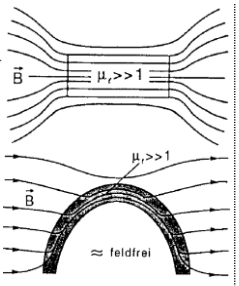
Stoff (Eigenschaft) Kennzeichen	Ohne äusseres Magnetfeld: Stoff magnetisch neutral, da…	Effekt beim Anlegen eines äusseren Magnetfeldes H
Diamagnetisch Felder bzw. Kreisströme der Elektronenbahnen eines Elementarteilchens kompensieren sich weitgehend	Jedes einzelne Elementarteilchen neutral	Geringe Abschwächung eines äusseren Magnetfeldes H $\mu_r < 1$
Paramagnetisch Jedes Teilchen besitzt resultierenden Kreisstrom (resultierendes Feld) Teilchen = Elementarmagnet	Richtung der Elementarteilchen (Elementarmagnete) regellos	Verstärkung des Feldes durch Ausrichten der Elementarmagnete in Richtung von H $\mu_r > 1$
Ferromagnetisch Bezirke aus vielen Elementarmagneten mit gleicher Magnetisierungsrichtung ⇨ Grössere Teilmagnet	Richtung der Bezirke regellos	- Ausrichten der Elementarmagnete - Vergrösserung der Bezirke mit gleicher Magnetisierungsrichtung wie H-Feld ⇨ kräftige Verstärkung des Feldes $\mu_r \gg 1$ aber von H abhängig



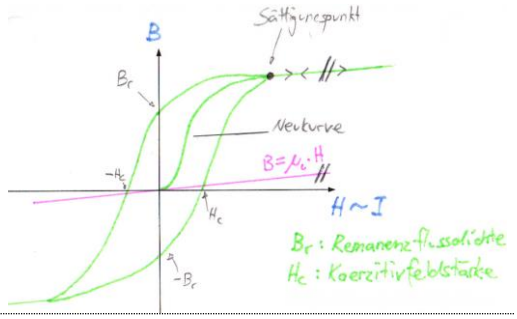
Kommutierungskurve



Hart- und weichmagn. Stoffe

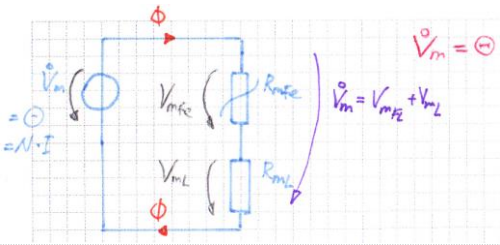
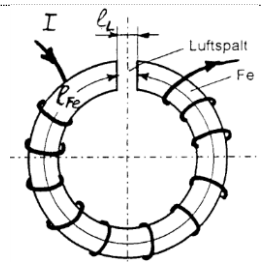


Magnetbündelnde Wirkung von Ferromagnetika

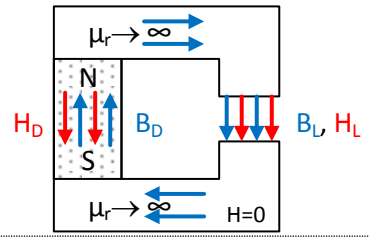
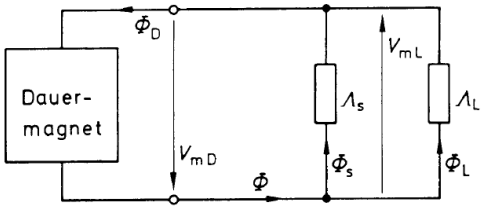
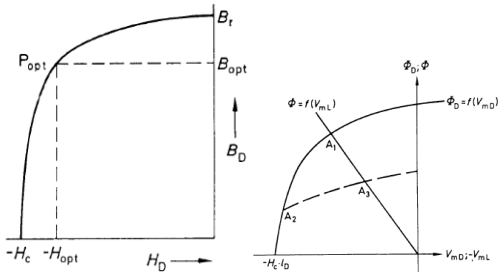


Magnetisierungskurve

5.8 Der magnetische Kreis

Bezeichnung	**Formel**	**Masseinheit**
Unverzweigter magnetischer Kreis $V_m = \Theta = N \cdot I$		
Von der Durchflutung ausgehende Berechnung	Leerlaufspannung ist gleich Durchflutung Θ „Kurzschluss-Fluss“ $\Phi_k = \frac{\Theta}{R_{(mL)}} = \frac{\Theta\,\mu_0\,A_0}{l_L}$ $B^* = \frac{\Phi_k}{A_{Fe}} = \frac{\mu_0\,A_L}{l_L\,A_{Fe}} \cdot \Theta = \frac{N\,I\,\mu_0}{l_{L_{tot}}}$ $\mathrm{H}^* = \frac{\Theta}{\mathrm{l_{Fe}}} = \frac{N\,I}{l_{Fe}}$	1. magn. Kreis in linearen und nichtlinearen Teil aufteilen 2. Leerlaufspannung $V_{mLeerlauf}$ und Kurzschlussfluss Φ_k bestimmen 3. H* und B* bestimmen 4. H* und B* einzeichnen und Arbeitspunkt AP bestimmen 5. H und B im AP herauslesen
Verzweigter magnetischer Kreis	$\sum \Phi_i = 0$	Knotensatz

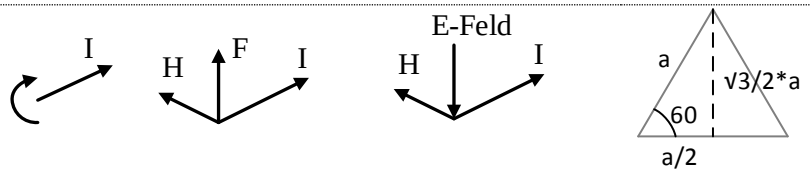
5.8.3 Der magnetische Kreis mit Permanentmagnet

Bezeichnung	Formel	Masseinheit
Magnetischer Kreis mit Permanentmagnet 	 $\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = \boldsymbol{H_D \cdot l_D + H_L \cdot l_L = 0}$	Die magnetischen Spannungen in den Polstücken aus magnetisch weichem Eisen werden vernachlässigt. $H_{Fe} = \frac{B_{Fe}}{\mu_{Fe} \to \infty} = 0$
Streufaktor	$\Phi_L = \Phi_D \cdot s$ $B_L \cdot A_L = B_D \cdot A_D \cdot s$	$[s] = \%$ $(s < 1)$
Magnetische Spannung	$V_{mD} = -V_{mL}$	Dauermagnet ist Quelle
Optimaler Arbeitspunkt	$P_{opt} = \lvert B \cdot H \rvert_{max} = B_{opt} \cdot H_{opt}$ 	Bei linearer Kennlinie, je in der Mitte zwischen Ursprung und Achsenabschnitt.

5.9 Energie und Kräfte im magn. Feld

Bezeichnung	Formel	Masseinheit
Energiedichte im Magnetfeld	$w_m = \int_0^B \vec{H} \cdot d\vec{B}$ $w_m = \frac{1}{2} B\, H$	Allgemein Homogenes Feld $[w_m] = J/m^3$
Energie im Feldvolumen	$W_m = \int_V w_m \cdot dV$ $W_m = w_m\, V = \frac{1}{2} B\, H\, V$	Allgemein Homogenes Feld $[W] = Ws = Nm = J$
Magnetische Energie in einer stromdurchflossenen Spule	$W_m = \frac{1}{2} L\, I^2 = \frac{1}{2} \cdot N \cdot I \cdot \Phi$	
Kräfte im Magnetfeld	$F = \frac{B^2 A}{2\,\mu_0} = \frac{\mu_0\, H^2\, A}{2} = \frac{B\,\Phi}{2\,\mu_0} = \frac{\Phi^2}{2\,\mu_0\, A} = \frac{BHA}{2} = \frac{1}{2} I^2 \cdot \frac{dL}{ds}$	$[F] = N$

Nice to know

Bezeichnung	Formel	Masseinheit
Kugel	$V = \frac{4}{3}\pi r^3$ $S = 4\pi r^2$	$[V] = m^3$ $[S] = m^2$
Handregeln		
Paralleldrahtleitung		

Allgemeine Formeln

Bezeichnung	Formel	Masseinheit
Elektrische Feldstärke	$E = \frac{F}{Q} = \frac{U}{l}$	$[E] = \frac{V}{m}$
Stromdichte	$J = \frac{I}{A} = \frac{U\sigma}{l} = E\sigma$	$[J] = 1 \cdot 10^{-6} \frac{A}{m^2} = 1 \frac{A}{mm^2}$
Leistung	$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$	$[P] = W$
Max. Leistung bei Leistungsanpassung (R_i=R_l)	$P\max = \frac{U_q^2}{4R_i} = \frac{R_i I_q^2}{4}$	
Arbeit	$W = P \cdot t = U \cdot I \cdot t$	$[W] = Ws = VsA = Nm = J$
Ladung	$Q = I \cdot t = C \cdot U$	$[Q] = As = C$
Leistungsdichte im Strömungsfeld	$p = EJ = \sigma E^2 = pJ^2$	$[p] = \frac{V}{m}\frac{A}{m^2} = \frac{W}{m^3}$
Spez. Widerstand	$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{l}{\sigma \cdot A}$	$[R] = \Omega(Ohm) = \frac{V}{A}$
Spez. Widerstand (rho)	$\rho = \frac{RA}{l}$	$[\rho] = \Omega m$ oder $[\rho] = \frac{\Omega mm^2}{m}$
Spez. Leitfähigkeit (sigma, gamma, kappa)	$\sigma = \gamma = \kappa = \frac{1}{\rho}$	$[\sigma] = \frac{1}{\Omega m} = \frac{S}{m}$
Temperaturabh. Widerstand	$\Delta R = R_{20}\alpha_{20}\Delta\vartheta$ $R_\vartheta = R_{20}(1+\alpha_{20} \cdot \Delta\vartheta)$	
Temperaturkoeffizient	$\alpha_{20} = \frac{\Delta R}{R_{20}\Delta\vartheta}$	$[\alpha] = \frac{\Omega}{\Omega K} = \frac{1}{K}$
Wirkungsgrad	$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$	
Flächenladungsdichte	$\sigma = \frac{Q}{A}$	$[\sigma] = \frac{C}{m^2}$
Kreis-r in M-Feld abgelenkte Q	$r = \frac{m_Q \cdot v}{Q \cdot B}$	

Konstanten

Bezeichnung	Formel	Masseinheit
Elementarladung	$e = 1.602 \cdot 10^{-19} C$	$[Q] = As = C$
Lichtgeschwindigkeit	$c = 299.79 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s}$	$[c] = \frac{m}{s} = 10^{-3} \frac{km}{s}$
Dielektrizitätskonstante (el. Feldkonstante)	$\varepsilon_0 = 8.8542 \cdot 10^{-12}\ As/Vm$	$[\varepsilon] = \frac{As}{Vm}$
Permeabilitätskonstante (mg. Feldkonstante)	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ Vs/Am$	$[\mu_0] = \frac{Vs}{Am}$
Elektronmasse	$m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} kg$	$[m_e] = kg$

BEMERKUNG: Fehler und Ergänzungsvorschläge bitte an skuster@hsr.ch senden, danke.