min-max: Übergang passiert über Maxwell-Gerade bei Druck p_D
$F_1 = F_2$

$$\int_B^A p(V)dV = p_D(V_A - V_B)$$

$$\int_C^A pdV - p_D[V_A - V_C] = p_D[V_C - V_B] - \int_B^C pdV$$

(Volumenarbeit unabhängig von Weg)
a) $P_2 \Leftrightarrow P_1$: $dp/dV > 0$, $\kappa < 0$, thermodynamisch instabil
b) $B \Leftrightarrow P_2$: $\kappa > 0$, metastabil, bei Punkt B sollte Sieden einsetzen bis Punkt A, überhitzte Flüssigkeit
c) $A \Leftrightarrow P_1$: $\kappa > 0$, thermodynamisch metastabil, übersättigter Dampf
d) kritische Opaleszenz: Am kritischen Punkt $\kappa \to \infty$, $dp/dV = 0$, keine Arbeit für Gaskompression notwendig, bereits Schwerkraft wirkt komprimierend
H_2O: $T_c = 647$ K, $p_c = 22$ MPa, $V_c = 3bn$

Felder (jede phys. Größe die vom Ortsvektor r abhängt)
a) Skalare Felder: z.B. Höhenverteilung (Höhenlinien), Potentialfeld. Darstellung: Durch Linien oder Flächen auf denen die phys. Größe konstant ist. $E_{pot}(x,y,z)$ = konst. Äquipotentialflächen
Gradient: Gibt Richtung u. Betrag der stärksten Änderung an Ort r an
Wegen Richtung: Grad. muß selbst ein Vektor sein
Stärkste Änderung: Grad ⊥ auf Linien
Grad. ist immer mit einer Kraft verknüpft. In Richtung der stärksten Änderung sind Kräfte am stärksten.

$$\text{grad}\, h(x,y) = \frac{\partial h(x,y)}{\partial x}\vec{e}_x + \frac{\partial h(x,y)}{\partial y}\vec{e}_y$$

b) Vektorfelder: z.B. Strömungsfelder (laminar, turbulent) Darstellung: Feldlinien, Richtung u. Betrag d. phys. Größe ändert sich von Ort zu Ort. Tangente an Feldlinie gibt die Richtung an. Dichte d. Feldl. durch eine Kontrollfläche (Linie / Fläche) d. Betrag.
1. Strömungsfelder
Vektorf. haben immer etwas mit fliessen zu tun. Feldstärke = v(r)

- Volumenstrom $\dot{V} = dV/dt$

Gesamter Volumenstrom durch irgend eine Kontrollfläche A:

$$\dot{V} = \int_A \vec{v}\cdot d\vec{A} \qquad d\vec{A} = dA\cdot\vec{n} \qquad \vec{n} = \text{Einheitsv. in Richt. d. Norm.}$$

Gilt wenn dA || v(r)
Wenn v schräg zu dA: $d\dot{V} = v\cdot dA\cdot\cos\alpha$

- Geschlossene Fläche: z.B. Schachtel → Oberflächenintegral

Wenn keine Quelle (Anfang von Strömungen) in geschl. Fläche A ist
⇒ alles was reinströmt, kommt wieder heraus $\dot{V} = \oint_A \vec{v}\cdot d\vec{A} = 0$
Wenn Quelle der Stärke Q in A ist:
Gaußscher Satz: $\dot{V} = \oint_A \vec{v}\cdot d\vec{A} = Q$

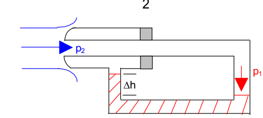
- Kontinuitätsgleichung (Erhalt des Volumenstroms) $v_1\cdot A_1 = v_2\cdot A_2$
- Laminare Strömung (Kräftefrei → keine Beschl.)

Geschwindig.feld v(r) (Vektorfeld) ist mit Druckfeld p(r) (Skalarfeld)
verknüpft. $\vec{v} = -\sigma\cdot\text{grad}\, p$ (σ = Leitfähigkeit, grad p = Druckg.)
⇒ der grad eines skalaren Feldes ergibt ein Vektorfeld

- Reibungsfreie Strömung (Strömung ohne Quelle)

Bernoulli-Gl. $P = p + \frac{1}{2}\rho v^2$ = konst
Gesamtdruck = stat. Druck + Staudruck = konst
Beim stat. Druck muß überhaupt nichts strömen. Staudruck, sobald etwas strömt. Wenn v groß, wird stat. Druck klein und umgekehrt.
Prandtl-Staurohr:

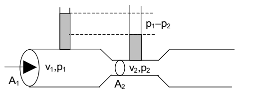
$$p_2 + \frac{1}{2}\rho v^2$$



$$p_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho_L\cdot v^2 \qquad v = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho_L}} \quad \text{Strömungsgeschw.}$$

$$p_1 - p_2 = \rho_{Lösung}\cdot g\cdot\Delta h$$

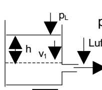
Venturi-Meter: (Differenz 2er stat. Drücke, um v zu messen)
v groß stat. Druck klein



$v_1\cdot A_1 = v_2\cdot A_2$; daraus v_2 in $p_1 + \frac{\rho}{2}v_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2}v_2^2$ ⇒

$$(p_1 - p_2) = \frac{1}{2}\rho\cdot v_1^2\left[\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1\right]$$

Toricelli:

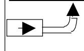


$$p_L + \rho\cdot g\cdot h + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_L + \frac{1}{2}\rho v^2$$

bei großem Gefäß $v_1 \approx 0$

$v = \sqrt{2gh}$ (freier Fall kein $\rho\cdot g\cdot h$, deswegen v = 0)

Feuerwehrschlauch



$p_1 + \frac{1}{2}\rho\cdot v_1^2 = p_L + \frac{1}{2}\rho\cdot v_2^2 \qquad v_1 = 0$
$p_L + \frac{1}{2}\rho\cdot v_2^2 = p_L + \rho gh$

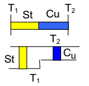
2. Temp.felder: Wärmeleitung, kein Massenstrom, nur Wärmeübergang

Wärmestromdichte: $\vec{j}_Q = \frac{1}{A}\frac{dW_Q}{dt}\vec{n}$

n = Vektor der ⊥ auf Kontrollfläche A steht
$j_Q = -\lambda\cdot\text{grad}\, T = -\lambda\cdot dT/dx$
Gauß-Satz: $P = \oint_A j_Q dA$ mit Quelle P die Wärmestrom j_Q durch geschl. Fläche erzeugt, die die Quelle enthält.
Ebene Wärmequelle: j_Q = homogen ⇒ $P = j_Q\cdot A$

$$\int_{x_1}^{x_2} j_Q dx = -\lambda\int_{T_1}^{T_2} dT \qquad (j = W/m^2,\ \lambda = W/Km,\ \text{grad}\, T = K/m)$$

$$P_{ges} = \int j_Q dA = |j_{Cu}|\cdot A = |j_{St}|\cdot A$$



$$P_{ges} = P_{St} + P_{Cu} = |j_{St}|\cdot A + |j_{Cu}|\cdot A$$

$\Delta W_Q = c_p\cdot m\cdot\Delta T$ abgef. Wärme erniedrigt Temp.
Wärmewiderstand $R = \Delta T/P = (T_{warm} - T_{kalt})/P$ P = Quelle
Wärmeübergangskoeffizient $k = \lambda/d$

Wärmeleitungsgl. $\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{\rho\cdot c}\frac{d^2T}{dx^2}$; c = spez. Wärme

beschreibt zeitliche u. räumliche Änderung einer Temp.störung
Templeitfähigkeit = $\lambda/\rho\cdot c$ [m^2/s]
λ: Metalle groß, Gas mittel, Glas niedrig, Flüssigk. sehr niedrig

3. Diffusion / Konzentrationsfelder
Diffusionsstromdichte: $\vec{j}_D = n\cdot\vec{v}_D$ (bei freier Diffusion) $j = N/At$
n = Konzentration (Zahl der Teilchen / Vol.), n = N/V
v_D = Driftgeschw.
$j_D = -D\cdot\text{grad}\, n = -D\cdot(dn/dx)$

Diffusions-Gl. $\frac{dn}{dt} = D\frac{d^2n}{dx^2}$

Beschreibt Änderung der Teilchenkonzentration am Ort x als Funktion der Zeit t. Mit einfachsten Anfangsbedingungen x = 0, t = 0 gilt:

$\overline{x^2} = \frac{\ell^2}{\tau}\cdot t$ $\overline{x^2}$ = mittleres Verschiebungsquadrat

ℓ = mittlere freie Weglänge (Strecke die ein Teilchen zurücklegt, bevor es mit einem anderen kolidiert)
t = Gesamtzeit mit der ich System beobachte
τ = Zeit zwischen zwei Stößen

$\overline{x^2} = N\cdot\ell^2$ N = Anzahl Stöße in der Zeit t

Mittlere Entfernung vom Startpunkt: $d = \sqrt{\overline{x^2}} \approx \sqrt{t}$
Konzentrationsfront von Mol. die nach links und rechts diffundieren wächst der Weg mit Wurzel der Zeit.

Lösung DGL: $n(x,t) = \frac{n_0}{\sqrt{2\pi 2Dt}}\cdot e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$

$\overline{x^2} = 2Dt \qquad D = \frac{\ell^2}{2\cdot\tau}$

Mittlere Geschw. $\bar{v} = \frac{\ell}{\tau}$

Driftgeschw. $v_D = \frac{1}{2}\bar{v}$ von Temp. abhängig ⇒ $D = 1/2\cdot\ell\cdot\bar{v} = \ell\cdot v_D$

$dN/dt = j\cdot A\cdot N_A$

Einstein, Smol. $D = \frac{k_B\cdot T}{6\pi\eta\cdot R} = \frac{F_R\cdot L}{6\pi\eta\cdot R} = f(T,\eta,R)$

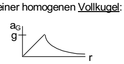
R = Radius diff. Teilchen, L = Strecke das Teilchen zurücklegt, F_R = Reibungskraft
Diffusion durch poröse Wände: $\frac{1}{2}mv_D^2 = 3/2\, k_BT$

$$v_D = \sqrt{\frac{3k_BT}{m}}$$

Gravitation
Gravitationsfluß: $\Phi = \int_A a_G dA \approx$ eingeschlossene Masse (= ρ·V)
Φ Maß der Feldlinien durch A mit Quelle m. ($\vec{a}\cdot\vec{b} = a\cdot b$ wenn $\vec{a} \| \vec{b}$)

Grav. Feldstärke einer homogenen Vollkugel: $a_G = \frac{G\cdot M}{r^2}$

Grav. Feld Erde



Hohlkugel: Im Inneren einer Kugelschale existiert kein Feld.

Grav.kraft: $F_G = m\cdot a_G = \frac{G\cdot M\cdot m}{r^2}$ (Anziehungskraft zwischen zwei Massen)

Sonderfall: Gewichtskraft F = mg
$\vec{a}_G = -\text{grad}\,\rho_G$
φ_G Grav.potential. Wichtigster Spezialfall ist G.potential einer kugelförmigen Masse.
$a_G = \varphi_G/dr$ Integration liefert $\rho_G = -\frac{G\cdot M}{r}$

Potentielle Grav.energie: Werden im G.feld gegen die G.kraft größere Wege zurückgelegt, gilt:

$$E_{pot}(r) = G\cdot m\cdot M_E\left(\frac{1}{R_E} - \frac{1}{r}\right)$$

Energie die gewonnen wird, wenn m von ∞ nach r gebracht wird.

$E_{pot}(r) = m\cdot\rho_G = \frac{m\cdot M\cdot G}{r}$ ⇒ E unabh. vom Weg

3. Keppler-Gesetz: $\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{C\cdot r_1^3}{C\cdot r_2^3}$

Sattelit: $m\cdot r\cdot\omega^2 = (G\cdot m_E\cdot m)/r^2$
Ein körper kann die Bindung an die Erde nur Überwinden mit Fluchtgeschw. $\frac{1}{2}m\, v_F^2 = (G\cdot M_E\cdot m)/R_E$ ⇒ $v_F^2 = 2gR_E$

$G = 6{,}7\cdot10^{-11}$ Nm^2/kg^2

Elektrisches Feld
Elektr. Fluß: $\Phi = \int_A \vec{E}d\vec{A} = \frac{Q}{\varepsilon_0}$
Φ = Anzahl Feldlinien pro Fläche, Änd. Fluß nur bei Änd. Ladung!
Q ist in A eingeschlossene Ladung, Ladung = Quelle für E-Feld
E = Feldstärke, keine Ladung wird Ladung Gauß-Satz Φ = 0
Raumladungsdichte ρ = Q / V
Flächenldg.dichte σ = Q / A

Kraft im E-Feld: $\vec{F}_E = q\cdot\vec{E}$ Kraft die Feld E auf Ldg q ausübt.

Elektrisches Potential: $\vec{E} = -\text{grad}\,\rho_E = -d\varphi/dr$

Neg. Ldg: Senken, Feldlinien enden
Pos. Ldg: Quellen, Feldlinien entspringen
Feldlin. von pos. → neg.
Spannung U: $U = \Delta\varphi_E$
$\varepsilon_0 = 8{,}9\cdot10^{-12}$ C/Vm = Influenzkonst.

Felder, Potentiale von wichtigen Ladungsverteilungen:
a) Kugelladung:

Feldstärke: $E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{1}{r^2}$ Stärke erkennbar an Dichte Feldl.

Hohlkugel im Inneren ohne Ladung E = 0.
Richtung: Radial nach außen, wenn Q positiv
Felder mehrerer Punktladungen addieren sich vektoriell.

⇒ Coulombsches Gesetz: $F = q\cdot E = \frac{q\cdot Q}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{1}{r^2}$

(= Kraft zwischen zwei Ladungen)

Potential: $\rho_E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{1}{r}$, $\varphi_\infty = 0$

Hohlkugel im Inneren ohne Ladung φ = konst.

Pot.Energie: $W_{pot}(r) = q\cdot\rho_E = \frac{q\cdot Q}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{1}{r}$

Um Ladung Q an einen bestimmten Ort zu bringen.
b) Linienladung:

$E = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0\cdot\ell}\cdot\frac{1}{r}$ ℓ = Länge Draht

c) Plattenladung:
1) Feld in der Nähe einer gelad. Platte:

$E = \frac{Q}{2\varepsilon_0 A_D}$ ⇒ unabhängig von r oder Weg x

= homogen, d.h. in jedem Raumpunkt gleich
A_D = ADeck, dort wo Feldlinien senkrecht hindurchgehen
2) Plattenkondensator:
Außen kein Feld, wegen Kompensation
Innen aber doppeltes

$E = \frac{Q}{\varepsilon_0\cdot A}$

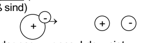
Spannung: $U = \Delta\varphi = E\cdot d$
Ladung: $Q = C\cdot U$ (gilt nur für einen Kond. an Spann.quelle U)
Kapazität: $C = (\varepsilon_0\cdot A)/d$
Kraft zwischen zwei Platten: $F = (C\cdot U^2)/2d$

Parallel: $C_g = C_1 + C_2$; $Q_g = Q_1 + Q_2$; $U_g = U_1 = U_2$
Serie: $1/C_g = 1/C_1 + 1/C_2$; $Q_g = Q_1 = Q_2$; $U_g = U_1 + U_2$
Kugelkondensator:
$C = Q/\Delta U = Q/(\varphi_R - \varphi_\infty) = 4\pi\varepsilon_0 r$
Pot. Energie im elektr. Feld beim Laden eines Kond.
$W = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}Q^2/C = \frac{1}{2}QU$

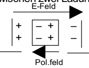
Dielektrika:
Isolatoren: Nichtleitende Materialien
Material hat leicht verschieb. Elektr. auf die das C-Feld wirkt, und diese verschiebt (Polarisation). Dadurch entsteht ein Polarisations-Feld. Pol. schwächt das C-Feld, Schwächung ist mat.spezifisch.

$E = \frac{Q}{\varepsilon\cdot\varepsilon_0\cdot A}$ ε = Dielektrizitätskonst. $C = \frac{\varepsilon_0\cdot\varepsilon\cdot A}{d}$

Merke: Felder, Pot. in Materialien wird ε_0 ersetzt durch $\varepsilon_0\cdot\varepsilon$
Durch Polarisation Entstehung von Dipolen (= verschobene Ladungsschwerpunkte die gleich groß sind)



Dipolmoment:
Das Dipolmom. ist ein Vektor der von der neg. zur pos. Ldg. zeigt. Es gibt permanente (H_2O) und indirekte (H-Atom) Dipolmomente:
$\mu_E = q\cdot L$ [Cm] L = Abstand zwischen zwei Ladungen
Drehmoment: $M = \mu \times E$
Bei antip. Stellung E_{pot} maximal.
$M = 2\cdot\mu\cdot E$



Strom
Δφ → elek. Feld, elek. Feld → bewegte Ldg., bew. Ldg → Ströme
Strom: $I = dQ/dt$ $I = Q/T$ ($T = 2\pi/\omega$)

Stromdichte: $\vec{j} = \frac{1}{A}\frac{dQ}{dt}\cdot\vec{e}_v = \frac{I}{A}$

e_v = Einheitsvektor in Richtung des Ladungstransportes
$j_E = -\sigma_E\,\text{grad}\,\varphi_E$ σ_E = el. Leitfähigkeit
mit $E = -\text{grad}\,\varphi_E$
$j_E = \sigma_E\cdot E$ (Ohmsches Gesetz)

$\vec{j} = n\cdot q\cdot\vec{v}_D$

n = N / V = Anzahldichte Ldgträger, v_D = Driftgeschw. Ldgträger

Beweglichkeit: $\mu = \frac{\sigma_E}{n\cdot q}$ [m^2 / Vs] (ist Eigenschaft d. Ldgträger)

Driftgeschw.: $\vec{v}_D = \mu\cdot\vec{E}$

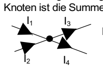
el. Leitfähigkeit: $\sigma_E = n_+\cdot q_+\cdot\mu_+ + n_-\cdot q_-\cdot\mu_-$
(Eigenschaft d. Materials)
$n_\pm$ = Anzahl pos. Ldgt, $q_\pm$ = Ldg pos. Ldgt., $\mu_\pm$ = Bew. pos. Ldgt.

Lad.transport in homogenen Feldern: z.B. Draht
Ohmsches Gesetz: U = I · R

Widerstand $R = \frac{\ell}{A\cdot\sigma_E}$

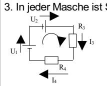
spez. Widerstand: $\rho = 1/\sigma_E$
Spann.teiler: $U_{R2} = U_0\,[R_2/(R_1 + R_2)]$
Leistung:
$P = U\cdot I = R\cdot I^2 = U^2/R$ (el. Leistung, die an R umgesetzt wird)
$q = e = 1{,}602\cdot10^{-19}$ C

Gleichstromkreis:
1. Spann.abfälle an Widerständen
2. Spann.quellen die Spann. im Stromkreis aufrecht erhalten
⇒ Unterscheidung notwendig
1. Stromkreis + → − ; 2. Batterie − → +, Energie notwendig
EMK = ΔW / ΔQ [V] elektromotorische Kraft
Kirchhoffsche Regeln:
1. Knotenregel: Lege willkürlich Stromrichtung fest. In jedem Knoten ist die Summe der zufließ. + und abfließ. – Ströme Null.



$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$

2. Maschenregel:
1. Willkürlich Umlaufsinn festlegen 2. Ströme festlegen
3. In jeder Masche ist die Summe der Spannungsanstiege Null.



$U_1 + U_2 + I_3\cdot R_3 + I_4\cdot R_4 = 0$
auch für Pot.diff. anwendbar
$(\varphi_1 - \varphi_2) + U_2 + I_3\cdot U_3 = 0$

EMK pos. wenn

Netzwerke und Ersatzschaltungen
1. Widerstände
a) Serie: $R_g = R_1 + R_2$, I = konst., $U = U_1 + U_2$
b) Parallel: $1/R_g = 1/R_1 + 1/R_2$, $I = I_1 + I_2$, U = konst.
2. Spann.quellen
Jede Spann.quelle hat einen Innenwiderstand.
$U_L = U_0 - I\cdot R_i$ U_L = Lastspann.
$U_L = U_0\,[R_L/(R_i + R_L)]$ U_0 = Leerlaufspann.
$R_i = U_0$ / Kurzschlußstrom R_L = Lastwiderstand, R_i = Innenwid.
$R_L \to 0$ ⇒ Kurzschlußstrom
$R_L \to \infty$ ⇒ Leerlaufspannung liegt an Klemmen
max. Leistung für $R_i = R_L$
Nenndaten = Daten, mit denen Geräte betrieben werden sollen

Magnetfeld
1. Bewegte Lad. (Ströme) im E-Feld → B-Feld
Ströme sind Quellen des B-Feldes. B-Linien sind immer geschlossen. Es gibt keine magn. Monopole.

2. Bewegte Lad. im B-Feld → E-Feld $\vec{E} = \vec{v}\times\vec{B}$
Durch Lorentzkraft werden pos. und neg. Ldg im stromdurchfloss. Leiter getrennt. Pot.unterschied liefert E-Feld (Hall-Effekt).

Magnetischer Fluß: $\Phi_M = \oint_A \vec{B}d\vec{A} = 0$ da B-Linien geschlossen

Amperesches Durchflutungsgesetz: $\oint_s \vec{B}d\vec{s} = \mu_0\cdot I$

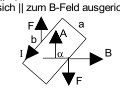
gilt für beliebige Schleifen
⇒ a) Stärke des B-Feldes eines stromführenden Drahtes:

$B = \frac{\mu_0}{2\pi}\cdot\frac{I}{r}$ r > R Draht (r abhängig)

Parall. Ströme im Draht ziehen sich an.
Gegensinnige Ströme stoßen sich ab.
⇒ b) Magnetfeld einer langen Spule:
$B = \mu_0\cdot I\cdot(N/\ell)$ ℓ = Länge, r unabhängig ⇒ homogen
Spule hat Nord- und Südpol → Magn. Dipol
Durch magn. Felder werden Kräfte übertragen.
Lorentzkraft: Kräfte auf bewegte Ladungen im B-Feld

$\vec{F}_L = Q(\vec{v}\times\vec{B})$ $\vec{F}_L \perp \vec{v};\ \vec{F}_L \perp \vec{B}$

⇒ UVW-Regel: U: Daumen, + → - (Stromrichtung)
V: Zeigef., N → S W: Mittelf. Richtung Kraft
Bewegte Ldg spüren zwar eine Kraft im B-Feld, können aber keine Energie aufnehmen, da $F_L \perp v$.
Magn. Dipolmoment:
Spule mit N = 1 kleinste Dipol. Einfachste Dipol = Ringstrom
$|\mu_m| = I\cdot A$ A = Fläche die vom Ringstrom eingeschlossen wird
I = Strom, Richt. Finger μ_m = in Richt. Daumen
⇒ Atome haben mikroskop. Ringströme, ist Ursache für magn. Dipolmomente in z.B. Stabmagneten.
Leiterschleife Drehmoment darauf im homog. B-Feld
Auf Seite a keine Kräfte da I parallel B so $F_L = 0$
Auf Seiten b wirken: Lorentzkraft: $F_L = I\cdot b\cdot B$ wenn $v \perp B$
⇒ Drehmoment auf Leiterschleife im B-Feld:
$T = F_L\cdot\sin\alpha\cdot b = I\cdot A\cdot B\cdot\sin\alpha = \mu_m\cdot B\cdot\sin\alpha$
$T = \mu_m \times B$ $\alpha \to 0$ (A ‖ B) ⇒ $T \to 0$
Dipol hat sich ‖ zum B-Feld ausgerichtet



$\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}$ Vs /Am

Alle magnet. Erscheinungen sind Ringströme der Elektronen.
Ferromag.: Schon bei schwachen Magnetfeldern läßt sich ein hoher Grad an Ausrichtung der atomaren mag. Momente erreich.
Paramag.: Die Atome haben permanente magn. Momente die untereinander nur sehr schwach wirken. Ohne äußeres Feld sind sie zufällig in alle Raumrichungen orientiert. Mit äußerem Feld zeigen sie eine gewisse Tendenz sich auszurichten.
Diamag.: Atome haben kein magn. Dipolmoment.
Spule ohne Fe-Kern: B_0; mit Fe-Kern: $B > B_0$, $B = B_0\cdot\mu$
ferromag. μ >> 1 ; paramag. μ ≥ 1 ; diamag. μ ≤ 1

Induktion
Nur eine Änderung des Flusses erzeugt eine Induktionsspannung
Induk.spannung kann erzeugt werden durch Änderung der wirksamen Fläche / magn. Flußdichte

$$U_{ind} = N\cdot B\cdot\frac{dA}{dt} \qquad U_{ind} = N\cdot A\cdot\frac{dB}{dt}$$

Bsp. für mag. Feldänderung ist Magnet in Spule schieben. Aber Spule ist an keine Spann.quelle angeschlossen. → Kein Fließen von Strom. Aufgrund der Änderung des Spulenfeldes wegen des Magnetfeldes wird Spann. induziert (keine Selbstinduktion!).
Selbstinduktion: Wenn R an Spule angeschlossen ist und der Magnet in der Spule dauernd bewegt wird (dauernde Änderung B) fließt über R ein Strom. Da die Spule ihr ursprüngliches B-Feld erhalten will und Strom fließt baut sie ein B-Feld auf, das entgegengesetzt zum B-Feld des Magneten wirkt. Durch das gegengerichtete B-Feld baut sich selbstind. Spann. auf die der ind. Spann. entgegen wirkt.
Lenzsche Regel: Der Induktionsstrom ist so gerichtet, daß er der Ursache seiner Entstehung entgegenwirkt.

$$\Phi_M = B(t)\cdot A\cdot N = N\cdot\mu_0\frac{N}{\ell}\cdot I(t)\cdot A = L\cdot I(t)$$

Induktivität Spule

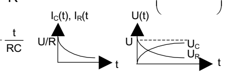
$$U_{ind} = -L\frac{dI}{dt} = -N\cdot\dot{\Phi} \qquad L = \frac{N^2\cdot A\cdot\mu\cdot\mu_0}{\ell}$$

$U_{ind} \to U_0$, $I_{ind} \to I_0$ magn. Feldenergie in Spule: $W = \frac{1}{2}LI^2$

Einschaltvorgang, R und C in Serie (Gleichsp.)
Aufladung: Aufladezeit: τ = R · C (τ = Zeitkonstante in s)

$$I_C(t) = I_R(t) = \frac{U}{R}\cdot e^{-\frac{t}{RC}}\ ; \quad U_C(t) = U\cdot\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$

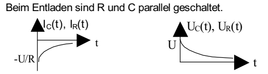
$$U_R(t) = U\cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$



Entladung: Abklingzeit: τ = R · C

$$I_C(t) = I_R(t) = -\frac{U}{R}\cdot e^{-\frac{t}{RC}} \qquad U_C(t) = U_R(t) = U\cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

Beim Entladen sind R und C parallel geschaltet.

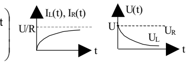


neg. wegen Änderung Stromrichtung.

Einschaltvorgang, R und L in Serie (Gleichsp.)
Einschalten: Anstiegszeit: τ = R / L

$$I_L(t) = I_R(t) = \frac{U}{R}\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)\ ; \quad U_L(t) = U\cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$U_R(t) = U\cdot\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)$$

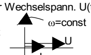


U_L = induz. Spannung

Ausschalten: Abklingzeit: τ = R / L

$$I_L(t) = I_R(t) = \frac{U}{R}\cdot e^{-\frac{R}{L}t} \qquad U_L(t) = U_R(t) = -U\cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

Wechselströme (anlegen einer Wechselspann. $U(t) = U_0\cdot\sin\omega t$)
a) R im Stromkreis
$I(t) = U(t) / R = (U_0 / R)\cdot\sin\omega t$ ω=const
U und I in Phase

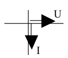


Leistung: $P(t) = U(t)\cdot I(t) = (U_0^2 / R)\cdot\sin^2\omega t$

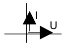
Mittlere Leistung: $\bar{P} = 1/2\cdot U_0\cdot I_0$

Effektivwerte: $U_{eff} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$; $I_{eff} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$

U_0, I_0 = Amplituden. Mit Eff.werten wird Wechselspann. / -ströme mit Gleich.spann./-ströme vergleichbar.
b) L im Stromkreis:
$I(t) = U_0/(\omega L)\cdot(\sin\omega t - 90°) = U_0/(\omega L)\cdot(-\cos\omega t)$
I eilt U nach.
Leistung: $P(t) = -\frac{1}{2}U_0^2/(\omega L)\cdot\sin 2\omega t$



Mittlere Leistung: $\bar{P} = 0$ (Blindleistung)
Induktiver Widerstand: $R_L = \omega\cdot L$
Energie im B-Feld: $W_M = \frac{1}{2}L\cdot I^2$
c) C im Stromkreis:
$U_C(t) = U_0\cdot\sin\omega t$
$I(t) = U_0\cdot\omega\cdot C\cdot\sin(\omega t + 90°) = U_0\cdot\omega\cdot C\cdot\cos\omega t$
I eilt U voraus



Mittlere Leistung: $\bar{P} = 0$
Kapazitiver Widerstand: $R_C = 1/(\omega C)$
Energie im E-Feld: $W_E = \frac{1}{2}CU^2$

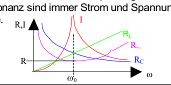
Serie R, L, C (WS) (Reihen-, Serienschwingkr.)
$I(t) = I_0\cdot\sin\omega t$ (überall gleich)
$U_R = I_0\cdot R\cdot\sin\omega t$
$U_L = I_0\cdot\omega\cdot L\cdot\sin(\omega t + 90°)$ U_L vor Strom
$U_C = I_0/(\omega C)\cdot\sin(\omega t - 90°)$ U_C nach Strom
Wechselstromwiderstand in Serienkreis:

$$R_\sim = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Bei Resonanz: $R_\sim$ = R am kleinsten
$U_L = U_C$ mit φ = 180°

Resonanz für: $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ ⇒ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

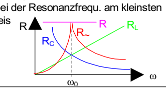
Strom ist bei der Resonanzfrequ. am größten.
Bei Resonanz sind immer Strom und Spannung in Phase.



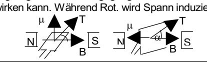
Parallel R, L, C (WS) (Parallelschwingkreis)
$U(t) = U_0\cdot\sin\omega t$ (überall gleich)
$I_R = U_0/R$; $I_L = U_0/(L\cdot\omega)$; $I_C = U_0\cdot C\cdot\omega$
Wechselstromwiderstand:

$$R_\sim = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2}}$$

Bei Resonanz: $R_\sim$ = R am größten
$I_L = I_C$ mit φ = 180°
Resonanz für ω_0 wie oben.
Strom ist bei der Resonanzfrequ. am kleinsten
⇒ Sperrkreis



Motor (El. En. → mech. En.)
= stromdurchfloss. Leiterschleife mit Umpolung
$T = \mu_M \times B = I\,A\,B\sin\alpha$, α = ωt
Auf die stromdurchflossene Schleife im Mag.feld wirkt ein Drehmoment, das versucht, das mag. Dipolmoment der Schleife ‖ zu B, die Schleife selber aber ⊥ zum Mag. feld zu stellen. Legt man jetzt Gleichstrom an die Spule an, so wirkt ein entgegengesetztes Drehmoment sobald sich die Spule über die Glgwpos. hinwegbewegt hat. Dies würde dazu führen, daß die Spule nach einigen Schwingungen in dieser Glgwlage zur Ruhe kommt. Deswegen Umpolung in der Glgwlage, daß kein entgegeng. Drehmoment wirken kann. Während Rot. wird Spann induziert

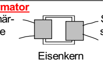


Generator (Erzeugung el. En.)
$\Phi = NAB\cos\omega t$, ωt ∠ zw. A und B
Wird die Spule im B-Feld gedreht, so ändert sich Φ, der sie durchsetzt und es wird eine Spann. induziert. Z.B. rotiert eine Spule mit konst. ω im B-Feld wird eine sinusförm. Spann. indiziert. (Um Spule zu drehen Verw. von H_2O)
$U_{ind} = d\Phi/dt = NAB\omega\sin\omega t$

$U_{ind} = B\cdot\dot{A}$

⇒ Entstehung einer Wechselspann.

Transformator

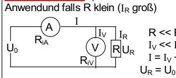


$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = ü$ Trafo unbelast.: $P_1 = P_2$

1) Primär- und Sekundärseite sind elektrisch nicht miteinander verbunden.
2) Es gibt keinen Gleichstromtrafo, da bei Gleichstrom keine Magnetfeldänderung.
3) η sehr hoch (95 bis 99 %)
4) Bei Phasenverschiebung gilt für die Leistung nach dem Energieerhaltungssatz:
$U_{1eff}\,I_{1eff}\cos\varphi_1 = U_{2eff}\,I_{2eff}\cos\varphi_2$
5) Ein ohmscher Widerst. R_2 an der Sek.seite wird als R_1 auf die Prim.seite transformiert nach $R_1 = ü^2 R_2$

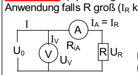
6) $\frac{P_{V,T}}{P_V} = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2$

Indirekte Messung von R und P.
Spannungsrichtig: (Stromfehlerschaltung)
Anwendung falls R klein (I_R groß)



$R \ll R_V$
$I_V \ll I_R$
$I = I_V + I_R$
$U_R = U_0 - I\cdot R_A$

Stromrichtig: (Spannungsfehlerschaltung)
Anwendung falls R groß (I_R klein)



$I_A = I_R$
$R \gg R_A$
$I = I_V + I_A$
$U_V = U_0$
$U_R = U_0 - I_A\cdot R_A$

Einheiten
Kraft: N = mkg / s^2
Energie: J = Nm = Ws = VAs = C·V
Druck: Pa = N / m^2, 1 bar = 10^5 Pa
Leistung: W = J / s
Leistung: VA = W
Ldg [Q] = C = As = J / V = Nm / V = N / (V/m)
Feldstärke [E] = V / m = N / C
Potential: [φ] = V
Spannung: [U] = J / C = V
Widerstand: [R] = Ω = V / A
Spez. Wid.: [ρ] = Ωm
Leitfähigk: [σ_E] = A / Vm = S/m Siemens
Stromdichte: [j_E] = A / m^2 = C / (Sm^2)
[ε] = As / Vm [ε_0] = F / m
Kapazität: [C] = As / V = s / Ω = F Farad
Magnetfeld: [B] = Vs / m^2 = T Tesla
Induktivität: [L] = Vs / A = Ωs = H Henry
Fluß: [Φ] = Vs = Wb Weber

Konstanten
Lichtgeschw: $c = 2{,}998\cdot10^8$ m/s
Grav.konstante: $G = 6{,}672\cdot10^{-11}$ Nm^2/kg^2
Bolzmann-Konstante: $k_B = 1{,}38\cdot10^{-23}$ J/K
Influenzkonste(Feldkonstante): $\varepsilon_0 = 8{,}854\cdot10^{-12}$ As / Vm
Elementarladung: $e = 1{,}602\cdot10^{-19}$ C
Ruhemasse e−: $m_e = 9{,}11\cdot10^{-31}$ kg
Ruhemasse p: $m_p = 1{,}673\cdot10^{-27}$ kg
Planck Konstante: $h = 6{,}626\cdot10^{-34}$ Js
atoma. Masseneinheit: $m_u = 1{,}66\cdot10^{-27}$ kg
Abgeleitete Konstanten:
Gaskonstante: $R = N_A k = 8{,}3$ J/(mol K)
Avogadro Zahl: $N_A = 6{,}022\cdot10^{23}$ Teil./mol
Faradaykonst.: $F = eN_A = 96487 \pm 5$ As/mol
Ruheenergie e−: $E_e = m_ec^2 = 5{,}1110\cdot10^2$ keV
Erdmasse: $M = 6\cdot10^{24}$ kg
Erdradius: R = 6378 km
Dichte Wasser: ρ = 1000 kg / m^3
Dichte Luft: ρ = 1,3 kg / m^3
Normal-Luftdruck: p_0 = 1 bar

Mathematik
- $|c| = |a \times b| = A_P$

Der Betrag c ist gleich dem Zahlenwert der Fläche des aus a und b gebildeten Parallelogramms. $A_D = \frac{1}{2}A_P$

- $V = |a \times b| \circ c$ Volumen des von den 3 Vektoren gebildeten Prismas.
- $\vec{a} = 1ex + 2ey \to \vec{a} = \begin{pmatrix}1\\2\\0\end{pmatrix}$ Komp.sch.
- f(x) = sin x , f'(x) = cos x

f(x) = cos x, f'(x) = –sin x
$\int\sin x = -\cos x \qquad \int\cos x = \sin x$

- Cosinussatz: $c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos\alpha$

- DGL: $\ddot{\alpha} + \omega^2\cdot\alpha = 0$

Lösung: $\alpha = A\cdot\cos\omega t + B\cdot\sin\omega t$

Allgemeines
Kreisfläche: $A = r^2\pi$
Kreisumfang: $U = 2\pi r$
Kugelvolumen: $V = 4/3\,\pi r^3$
Kugeloberfläche: $A = 4\pi r^2$
Zylindervolumen: $V = \pi r^2 h$
Zylinderoberfläche: $O = 2\pi r(r+h)$

Verstärker für Gleich-/Wechselspannung
idealer Verstärker:
$R_e \to \infty$ $R_a \to 0$ $V \to \infty$
Stromkreis: Eingang
$U_e = U_0\cdot[R_e / (R_e + R_i)]$
eingeprägt I ⇒ ideale Stromquelle
$U_e = I_0\cdot[(R_i\cdot R_e) / (R_i + R_e)]$
Stromkreis: Ausgang
kein R_L: $U_a = V\cdot U_e$
wenn R_L: $U_a = U_L < V\cdot U_e$
$U_a = (V\cdot U_e)\cdot[R_L / (R_a + R_L)]$