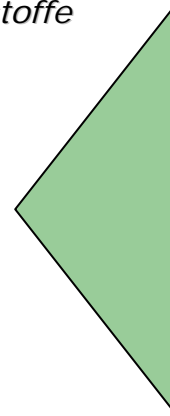
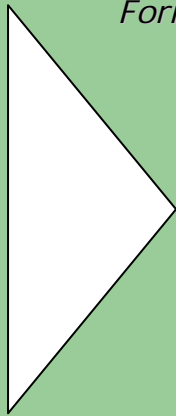


Formelsammlung Werkstoffe der Elektrotechnik

*Formelsammlung analog zur Werkstoffe
der Elektrotechnik Vorlesung
von Dr. T. Schabacker*



Holger Hafke

Andreas Kördel

Stefan Rohde

© 20 04

**U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T**

Inhaltsverzeichnis

1.	Mikroeigenschaften der Materie	3
1.1	Aufbau der Elemente	3
1.3.1	Kristalliner Werkstoff	3
2.	Makroeigenschaften der Werkstoffe	4
2.1	Mechanisches Verhalten	4
2.2	Thermische Verhalten	5
3.	Leitermaterialien	9
3.1	El. Leitungsmechanismen	9
3.2	Bändermodell	9
3.3	Temperatureinfluss auf die el. Leitfähigkeit	10
3.4	Einfluss von Gitterstörungen auf die el. Leitfähigkeit	10
3.5	Matthiesen Regel	10
3.6	Wiedemann-Franz'sches Gesetz	10
3.7	Kontakt – bzw. Thermospannung	11
3.8	Hall-Spannung	11
4.	Kontaktwerkstoffe	12
4.1	Kontaktwiderstand	12
4.2	Engewiderstand	12
4.3	Fremdschichtwiderstand	12
5.	Widerstandswerkstoffe	12
5.6	PTC-Widerstände	12
5.7	NTC-Widerstand	12
5.8	Varistoren	13
6.	Struktur und Leitungsvorgänge bei Halbleitern	13
6.2	Generation und Rekombination	13
6.4	Dotierung	13
8.	Dielektrische Eigenschaften der Werkstoffe	13
8.1	Modellvorstellung der el. Polarisierung	13
8.3.1	Isolatoren	14
8.3.2	Dielektrika	14
10.	Magnetische Eigenschaften von Werkstoffen	15
10.1	Makroskopische Beschreibung der magn. Eigenschaften	15
10.2	Atomisierte Beschreibung magn. Eigenschaften	15

1. Mikroeigenschaften der Materie

1.1 Aufbau der Elemente

Elektronenhülle	Coulombkraft = Zentripetalkraft $F_z + F_L = 0$ $\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{e_0^2}{r^2} = \frac{m_e \cdot v^2}{r}$	
Bohrsches Atommodell	AnzahlElektronen = $2 \cdot n^2$	$n \hat{=} \text{Schale}$
Orbitalmodell (Energie zw. Niveaus)	$\Delta E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$	$h \hat{=} \text{Planck'sches Wirkungsquantum}$ $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ $\nu \hat{=} \text{Strahlungsfrequenz}$ $c \hat{=} \text{Lichtgeschwindigkeit}$ $299,79 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ $\lambda \hat{=} \text{Wellenlänge}$

1.3.1 Kristalliner Werkstoff

Packungsdichte	Packungsdichte = $\frac{\text{Atomvolumen}}{\text{Zellenvolumen}}$	
Hexagonales Gitter (hdp)	$a = d$ $c = \sqrt{\frac{8}{3}} \cdot d$	$a, c = \text{Gitterkonst.}$ $d = \text{Ionendurchmesser}$
Kubisch raumzentriertes Gitter (krz)	$a = \sqrt{\frac{4}{3}} \cdot d$	
Kubisch flächenzentriertes Gitter (kfz)	$a = \sqrt{2} \cdot d$	
Miller-Indizes	<ul style="list-style-type: none">- Achsenabschnitte- Kehrwerte- Erweitern mit KGV	

Gitterleerstellen

$$n_L = N_G \cdot e^{-\frac{W_L}{K \cdot T}}$$

$n_L \hat{=}$ Konzentration der Leerstellen

$N_G \hat{=}$ Anzahl der verfügbaren Gitterplätze pro Volumen

$W_L \hat{=}$ benötigte Energie zur Erzeugung einer Leerstelle

$K \cdot T \hat{=}$ thermische Energie

$K \hat{=}$ Boltzmann – Konst.

$$1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$$

$T \hat{=}$ absolute Temperatur

$K \rightarrow$ Energie die einem Atom zugeführt

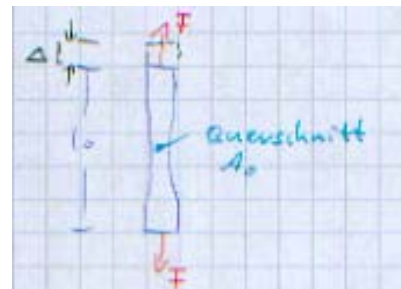
werden muss, um eine Temperaturerhöhung von 1K zu erreichen

2. Makroeigenschaften der Werkstoffe

2.1 Mechanisches Verhalten

Dehnung

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$



Mechanische Spannung

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Hooke'sches Gesetz

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$E \hat{=}$ Elastizitätsmodul

Poisson-Zahl (Querkontraktionszahl)

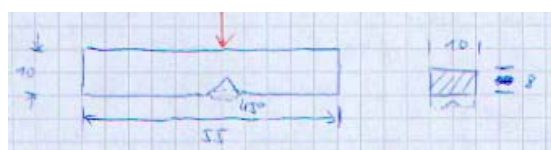
$$\nu = \frac{\frac{\Delta A}{A_0}}{2 \cdot \frac{\Delta l}{l_0}}$$

Kerbschlagzähigkeit

$$a_k = \frac{W_k}{A_0}$$

$W_K \hat{=}$ Kerbschlagarbeit

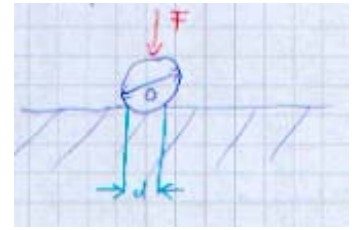
$A_0 \hat{=}$ Wirksame Fläche



Brinell-Härte

$$HB = \frac{2 \cdot F \cdot 0,102}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$D \hat{=}$ Kugeldurchmesser
 $d \hat{=}$ Abdruckdurchmesser

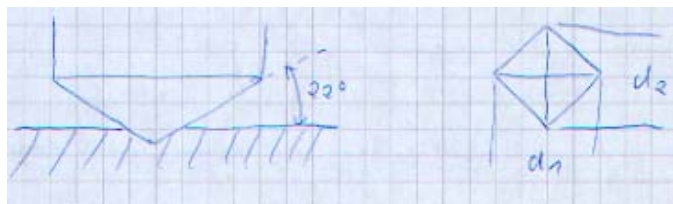


Vickers-Härte

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$HV = \frac{2 \cdot F \cdot \cos 22^\circ \cdot 0,102}{d^2}$$

$d_{1,2} \hat{=}$ Abdrucklängen



2.2 Thermische Verhalten

Wärmemenge

$$Q = T \cdot C_{th}$$

$$Q [Ws]$$

$$T [K]$$

$$C_{th} \hat{=} \text{Wärmekapazität} \left[\frac{Ws}{K} \right]$$

$$c_p \hat{=} \text{spez. Wärmekapazität} \left[\frac{Ws}{kg \times K} \right]$$

$$C_{th} = c_p \cdot m$$

$$\tau = R_{th} \cdot C_{th}$$

$\tau \hat{=}$ thermische Zeitkonstante

$$m [kg]$$

Wärmestrom

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$$

Ohm'sches Gesetz der Wärmelehre

$$R = \frac{U}{I} \Rightarrow R_{th} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}}$$

$$R = \frac{l}{A \cdot \delta} \Rightarrow R_{th} = \frac{l}{A \cdot \lambda}$$

Wärmeleitung

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{th,\lambda}} = \frac{\Delta T}{R_{th,\lambda}}$$
$$R_{th,\lambda} = \frac{l}{\lambda \cdot A}$$

$R_{th,\lambda} \hat{=}$ Wärmewiderstand $\left[\frac{K}{W} \right]$
 $l \hat{=}$ Länge [m]
 $\lambda \hat{=}$ thermische Leitfähigkeit $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$

Konvektion

$$\dot{Q} = A \cdot \alpha \cdot (T_W - T_F)$$
$$R_{th,\alpha} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} = \frac{1}{\alpha \cdot A}$$

$\alpha \hat{=}$ Konvektionskoeffizient $\left[\frac{W}{K \cdot m^2} \right]$
 $T_W \hat{=}$ Wandtemperatur
 $T_F \hat{=}$ Fluidtemperatur

Wärmestrahlung

Stefan Boltzmann-Gesetz

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

$\varepsilon \hat{=}$ Emissionsgrad
 $T \hat{=}$ absolute Temperatur
 $\sigma \hat{=}$ Stefan Boltzmann Konstante
 $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$

Strahlungsaustausch zw. 2 Flächen

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_{1,2} + \dot{Q}_{1,4}$$
$$F_{1,2} = \frac{\dot{Q}_{1,2}}{\dot{Q}_1}$$
$$= F_{1,2} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$Q_{1,2} \hat{=}$ Fläche 1 auf 2
 $Q_{1,4} \hat{=}$ Fläche 1 in Umgebung

Strahlungsaustausch zw. 2 Kugeln

$$\dot{Q}_{1,2} = \frac{A_1 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$
$$A_2 \rightarrow \infty \Rightarrow \dot{Q}_{1,2} = \varepsilon_1 \cdot A_1 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$
$$(T_1^4 - T_2^4) = \underbrace{(T_1 - T_2)}_{\Delta T} \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1^2 + T_2^2)$$
$$\Rightarrow R_{th,s} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} = \frac{1}{\varepsilon_1 \cdot A_1 \cdot \sigma \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1^2 + T_2^2)}$$

Thermische /elektrische Analogiebeziehungen

$$u \hat{=} \Delta T$$

$$i \hat{=} \dot{Q} = P_v$$

$$R \hat{=} R_{th}$$

$$C \hat{=} C_{th}$$

$$u = K_1 \cdot \Delta T$$

$$i = K_2 \cdot \dot{Q}$$

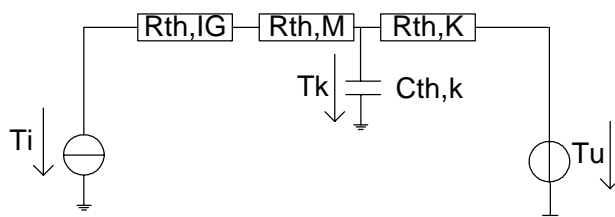
$$P_v \hat{=} \text{ohmsche Verluste}$$

$$K_l \left[\frac{V}{K} \right]$$

$$K_l \left[\frac{A}{W} \right]$$

Thermisches Ersatzschaltbild - Kühlung eines Bauelements auf Kühlkörper

(es gilt Kirchhoff)



$$R_{th,IG} \hat{=} \text{Inneres zum Gehäuse}$$

$$R_{th,GU} \hat{=} \text{Gehäuse zu Umgebung}$$

$$R_{th,M} \hat{=} \text{Montagewiderstand}$$

$$R_{th,K} \hat{=} \text{thermischer Durchgangswiderstand}$$

$$R_{th,M} = \frac{d}{\lambda \cdot A_M}$$

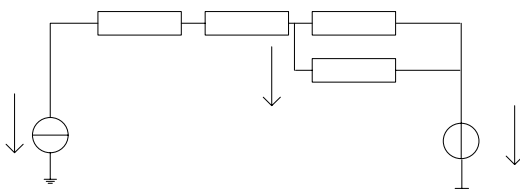
$$C_{th,K} = c_p \cdot m$$

$$d \hat{=} \text{Schichtdicke}$$

$$A_M \hat{=} \text{Montagefläche}$$

$$R_{th,Kt} = R_{th,K} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{th}}} \right)$$

Berücksichtigung von Konvektion und Strahlung



Wärmedehnung

$$L(T) = l_{20^\circ\text{C}} \cdot \left(1 + \alpha_L \cdot \underbrace{(T - T_{20})}_{\Delta T} \right)$$

$$\frac{\Delta l}{l_{20^\circ\text{C}}} = \alpha_L \cdot \Delta T$$

$$V(T) = v_{20^\circ\text{C}} \cdot \left(1 + \alpha_V \cdot (T - T_{20}) \right)$$

$$\frac{\Delta V}{v_{20^\circ\text{C}}} = \alpha_V \cdot \Delta T$$

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_L \hat{=} \text{Längenänderung} \\ \alpha_V \hat{=} \text{Volumenänderung} \end{array} \right\} \left[\frac{1}{K} \right]$$

näherungsweise : $\alpha_V = 3 \cdot \alpha_L$

Auftreten von Scherspannungen

$$\tau = G \cdot \Delta U_l$$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Grüneisen'sche Regel

$$\alpha_{L,V} \sim \frac{1}{T_s}$$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\underbrace{\frac{\Delta l}{l}}_{\text{Schiebung}} = \gamma \rightarrow$$

$$\tau = \underbrace{G \cdot \gamma}_{\text{Hook'sches Gesetz für Schubspannung}}$$

$$\tau \hat{=} \text{Schubspannung}$$

$$G \hat{=} \text{Schubmodul}$$

3. Leitermaterialien

3.1 El. Leitungsmechanismen

Strom $I = \frac{dQ}{dt}$

$e_0 \hat{=} \text{Elementarladung}$

$$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$$

$Z_e \hat{=} -1$ (Ladungszahl für das Elektron)

$$\bar{j} = \frac{I}{dA}$$

$n \hat{=} \text{Ladungsträgerkonzentration} \left[\frac{1}{m^3} \right]$

$$J = -n \cdot e_0 \cdot v_d$$

Stromdichte

$v_d \hat{=} \text{Driftgeschwindigkeit} \left[\frac{m}{s} \right]$

$$v_d = -\mu_e \cdot E$$

$\mu_e = \text{Beweglichkeit der Elektronen}$

$$J = n \cdot e_0 \cdot \underbrace{\mu_e}_{\sigma} \cdot E = \sigma \cdot E$$

$E \hat{=} \text{el. Feld} \left[\frac{V}{m} \right]$

$\sigma \hat{=} \text{Leitfähigkeit} \left[\frac{S}{m} \right] = \left[\frac{A}{Vm} \right]$

Leitfähigkeit

$$\sigma = p \cdot e_0 \cdot \mu_p$$

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_p$$

$p \hat{=} \text{Ladungsträgerkonz. der Löcher}$

$$= n \cdot e_0 \cdot \mu_e + p \cdot e_0 \cdot \mu_p$$

Ohm'sches Gesetz in diff. Form

$$\bar{j} = \sigma \cdot \bar{E}$$

Integration entlang der el. Feldlinien und über Querschnittsfläche

$$U = \frac{l}{\sigma \cdot A} \cdot I = R \cdot I$$

3.2 Bändermodell

Beweglichkeit

$$\mu_e = \frac{e_0 \cdot l_f}{m_e \cdot v_F}$$

$l_f \hat{=} \text{mittlere freie Weglänge}$

$v_F \hat{=} \text{Fermi - Geschwindigkeit}$

$m_e \hat{=} \text{Elektronenmasse}$

Spez. Leitfähigkeit $\sigma = n_e \cdot e_0 \cdot \mu_e = \frac{n_e \cdot e_0^2 \cdot l_f}{m_e \cdot v_F} = \frac{1}{\rho}$ $\rho \hat{=} \text{spez. Widerstand}$

3.3 Temperatureinfluss auf die el. Leitfähigkeit

$$\frac{d\rho}{dT} = \alpha \cdot \rho$$

Lösung DGL

$$\rho = \rho_{20} \cdot e^{\alpha(T-T_0)} = \rho_{20} \cdot e^{\alpha \cdot \Delta T}$$

$$\alpha \hat{=} \text{Tempkoeffizient} \left[\frac{1}{K} \right]$$

Taylorreihe $\Delta T < 100^\circ K$ Abbruch nach lin. Term

$$\rho = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$\beta \hat{=} \text{quad. Tempk.} \left[\frac{1}{K^2} \right]$$

genaue Berechnung

$$\rho = \rho_{20} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \Delta T + \beta \cdot (\Delta T)^2 \right)$$

3.4 Einfluss von Gitterstörungen auf die el. Leitfähigkeit

Legierung $\rho_{\text{Leg}} > \rho_A, \rho_B$

3.5 Matthiesen Regel

$$\rho = \rho^T + \rho^r$$

$\rho^T \hat{=} \text{thermische Bewegung der Gitterionen}$

$\rho^r \hat{=} \text{Verunreinigungen...}$

3.6 Wiedemann-Franz'sches Gesetz

Relaxationszeit $\tau = \frac{l_f}{v_F}$

$l_f \hat{=} \text{mittlere freie Weglänge}$

$v_F \hat{=} \text{Fermi - Geschwindigkeit}$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{n \cdot \tau}{m_e} \cdot k^2 \cdot T$

el. Leitfähigkeit $\sigma = \frac{n \cdot e_0^2 \cdot \tau}{m_e}$

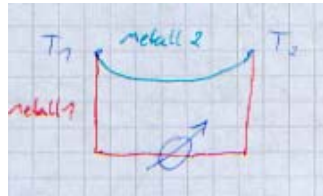
Wiedemann-Franz'sches Gesetz $\frac{\lambda}{\sigma} = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k^2}{e_0^2} \cdot T$

Lorenz-Zahl $L = \frac{\lambda}{\sigma \cdot T} = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k^2}{e_0^2} = 2,44 \cdot 10^{-8} \frac{V^2}{K^2}$

3.7 Kontakt – bzw. Thermospannung

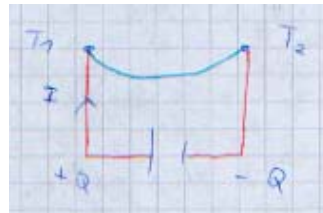
$$U_{1,2} = - \frac{W_{A1} - W_{A2}}{e_0}$$

Seebeck-Effekt $U_{th} = \eta_{12} \cdot \Delta T$



$\eta_{12} \hat{=} \text{Seebeck - Koeff.}$

Peltier-Element $\dot{Q} = I \cdot \pi_{12}$



$\pi_{12} \hat{=} \text{Peltier - Koeff.}$

3.8 Hall-Spannung



$$\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

$q \hat{=} \text{el. Ladung}$

$v \hat{=} \text{Geschwindigkeit der Ladungsträger}$

$B \hat{=} \text{magn. Flußdichte}$

$$F_L = e_0 \cdot v \cdot B$$

$$F_{el.} = e_0 \cdot E_H$$

$$R_H = \frac{1}{n \cdot e_0}$$

$R_H \hat{=} \text{Hall - Konstante}$

$$U_H = R_H \cdot \frac{I \cdot B}{d}$$

$U_H \hat{=} \text{Hall - Spannung}$

4. Kontaktwerkstoffe

4.1 Kontaktwiderstand

$$R_{L1} = \frac{l}{\sigma \cdot A}$$

$$R_{L2} = R_{L1} + R_K$$

$$R_K = R_E + R_F$$

$R_K \hat{=}$ Kontaktwiderstand

$R_E \hat{=}$ Engewiderstand

$R_F \hat{=}$ Fremdschichtwiderstand

4.2 Engewiderstand

$$R_E \sim \frac{1}{A_{\text{Berührungsfläche}}}$$

$$R_E = \rho \cdot K \cdot \sqrt{\frac{H}{F}}$$

$\rho \hat{=}$ spez. Widerstand

$K \hat{=}$ Konstante < 1 , empirisch ermittelt

$H \hat{=}$ Härte

$F \hat{=}$ Kontaktkraft

2 Materialien : H kleinere Wert

ρ arithm. Mittelwert

4.3 Fremdschichtwiderstand

$$R_F = \rho_F \cdot \frac{d}{A}$$

$\rho_F \hat{=}$ spez. Widerstand der Schicht

$d \hat{=}$ Schichtdicke

$A \hat{=}$ wahre Berührungsfläche

5. Widerstandswerkstoffe

5.6 PTC-Widerstände

$$R_{\text{PTC}} = R_{\text{Kristallite}} + R_{\text{Korngrenze}}(T)$$

Bereich des steilen Anstiegs

$$R_{\text{PTC}} = R_{\text{Ref}} \cdot e^{(\alpha \cdot (T - T_{\text{Ref}}))}$$

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}, \text{ konstant}$$

5.7 NTC-Widerstand

$$R_{\text{NTC}} = R_V \cdot e^{\left(B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_V} \right) \right)}$$

$B = \text{Materialkonstante} [K]$

5.8 Varistoren

$$I = K \cdot U^a$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1}{K} \cdot U^{(1-a)}$$

6. Struktur und Leitungsvorgänge bei Halbleitern

6.2 Generation und Rekombination

$$g(T) = r \cdot n \cdot p$$

$$n \cdot p = \frac{g(T)}{r} = n \cdot i^2 = \text{konst.}$$

$g \hat{=}$ Generation
 $r \hat{=}$ Rekombinationskoeff.
 $n \hat{=}$ Anz. der Elektronen pro Volumen
 $p \hat{=}$ Anz. der Defektelektronen pro Volumen

6.4 Dotierung

El. Leitfähigkeit des HL

$$\sigma = q_e \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)$$

$q_e \hat{=}$ Elementarladung
 $\mu_{n,p} \hat{=}$ Beweglichkeit der Elektronen/Löcher

8. Dielektrische Eigenschaften der Werkstoffe

8.1 Modellvorstellung der el. Polarisation

Plattenkondensator im Vakuum

$$E = \frac{U}{d}$$

$$Q = \varepsilon \cdot A \cdot E$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_r$$

$$Q_0 = \varepsilon_0 \cdot A \cdot E$$

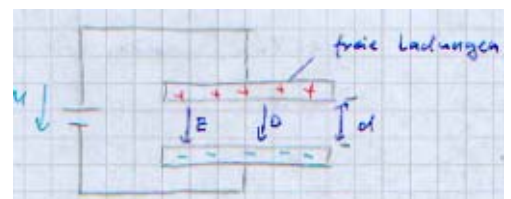
$$Q_0 = c_0 \cdot U$$

$E \hat{=}$ el. Feld
 $\varepsilon_0 \hat{=}$ abs. Permittivität
 $8,86 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$

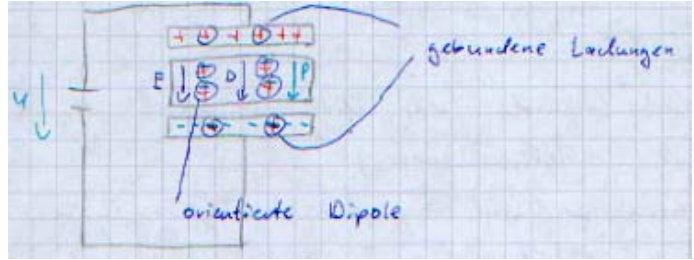
El. Verschiebungsdichte

$$D_0 = \frac{Q_0}{A} = \varepsilon_0 \cdot E$$

$$D \left[\frac{As}{m^2} \right]$$



Plattenkondensator mit Dielektrikum



$$D = \epsilon_0 \cdot E + P$$

$$P = \frac{Q - Q_0}{A}$$

$$P = \chi_e \cdot \epsilon_0 \cdot E$$

$$D = \epsilon_0 \cdot E + \chi_e \cdot \epsilon_0 \cdot E \\ = \epsilon_0 \cdot (\chi_e + 1) \cdot E$$

$$\epsilon_r = \chi_e + 1$$

$P \hat{=}$ Polarisation, gebundene Ladung pro Fläche

$\chi_e \hat{=}$ el. Suszeptibilität

$\epsilon_r \hat{=}$ rel. Permittivität [1]

$$P = N \cdot M_{\text{Dipol}}$$

$$M_{\text{Dipol}} = \alpha_{\text{el}} \cdot E$$

(Ladung \times Abstand)

$N \hat{=}$ Konzentration der Dipole [cm^{-3}]

$M_{\text{Dipol}} \hat{=}$ Dipolmoment

$\alpha_{\text{el}} \hat{=}$ Polarisation des Materials

Dispersionsspektrum

$$\chi_E = \chi_{\text{Elektronen}} + \chi_{\text{Ion}} + \chi_{\text{Dipol}} + \chi_{\text{Raum}}$$

$$\chi_e \text{ bzw. } \epsilon_r = f(f)$$

8.3.1 Isolatoren

Durchschlagfestigkeit

$$E_D = \frac{U_D}{d}$$

8.3.2 Dielektrika

Zeigerdiagramm

$$\underline{Y} = G + j\omega C$$

$$\tan \delta = \frac{G}{\omega C} = \frac{1}{\omega RC}$$

$\tan \delta \hat{=}$ Verlustfaktor

Leistungsdichten eines Dielektrikums ohne Restleitfähigkeit

$$P'_B = E^2 \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

$$P'_W = E^2 \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \tan \delta$$

$P'_B \hat{=}$ Blindleistungsdichte } [$\frac{W}{m^3}$]
 $P'_W \hat{=}$ Wirkleistungsdichte }

Komplexe relative Permittivität

Beschreibung der dielektrischen Verluste

$$\underline{\epsilon}_r = \epsilon_r - j \cdot \tan \delta \cdot \epsilon_r$$

$$\Rightarrow G + j\omega C = \omega \cdot \tan \delta \cdot \epsilon_r \cdot C_0 + j\omega \cdot \epsilon_r \cdot C_0$$

10. Magnetische Eigenschaften von Werkstoffen

10.1 Makroskopische Beschreibung der magn. Eigenschaften

Spule im Vakuum



$$B_0 = \mu_0 \cdot H$$

$$B_0 \hat{=} \text{magn. Flussdichte} \left[\frac{As}{m^2} \right]$$

$$H \hat{=} \text{magn. Feldstärke} \left[\frac{A}{m} \right]$$

$\mu_0 \hat{=} \text{absolute Permeabilität}$

$$1,256 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$$

$$B = \mu_0 \cdot H + J$$

$J \hat{=} \text{magn. Polarisation}$

$$J = \chi_m \cdot \mu_0 \cdot H$$

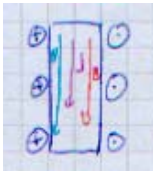
$\chi_m \hat{=} \text{magn. Suszeptibilität} [1]$

$$B = \mu_0 \cdot H + \chi_m \cdot \mu_0 \cdot H$$

$$= \mu_0 \cdot \underbrace{(1 + \chi_m)}_{\mu_r} \cdot H$$

$\mu_r \hat{=} \text{rel. Permeabilität}$

Spule mit Material



$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

$M \hat{=} \text{Magnetisierung}$

$$M = \frac{J}{\mu_0}$$

$$B = \mu_0 \cdot (H + M)$$

10.2 Atomisierte Beschreibung magn. Eigenschaften

Atomare magn. Dipole

$$\mu_M = I \cdot \bar{A}$$

$\mu_M \hat{=} \text{magn. Dipomoment} [Am^2]$

$$\bar{M} = N \cdot \bar{\mu}_M$$

$\bar{M} \hat{=} \text{Magnetisierung}$

$N \hat{=} \text{Anzahl der Elementardipole pro Volumeneinheit}$

Arten der magn. Dipole

Dipolmoment eines Elektrons durch Spin

$$\mu_e = \frac{e \cdot h}{4 \cdot \pi \cdot m_e} = 9,3 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$$

$\mu_e \hat{=} \text{Bohr'sches Magneton } \mu_B$

Dipolmoment durch Bahndrehimpuls

$$\mu_{\text{Bahn}} = \frac{n \cdot e \cdot h}{4 \cdot \pi \cdot m_e} = n \cdot \mu_e$$

$n \hat{=} \text{Hauptquantenzahl}$

Dipolmoment der Protonen durch Spin

$$m_p \gg m_e \Rightarrow \mu_p \approx \frac{1}{2000} \cdot \mu_B$$

$$B = \underbrace{\mu_0 \cdot \mu_r}_{\text{Steigung}} \cdot H$$

B-H-Kennlinie

$$\mu_r = f(H)$$

Magnetostriktion

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$l_0 \hat{=} \text{Länge vor der Magnetisierung}$

Verlustfaktor

$$\tan \delta = \frac{R}{\omega L} = f(\omega)$$