



OSTBAYERISCHE
TECHNISCHE HOCHSCHULE
REGENSBURG

FORMELSAMMLUNG ENERGIE NETZE

Wintersemester 21/22

Name:

Matrikelnummer:

Letzte Änderung:

26. Januar 2022

I. GRUNDLAGEN

A. Drehstrom (DS), 3-Phasen-System

1) Spannungen in DS (symmetrisch)

Leiter-Erde-Spannung $U_{LE} = 230V$

$$\underline{U}_{L1} = U_{LE} \angle 0^\circ$$

$$\underline{U}_{L2} = U_{LE} \angle -120^\circ = U_{LE} \angle 240^\circ$$

$$\underline{U}_{L3} = U_{LE} \angle -240^\circ = U_{LE} \angle 120^\circ$$

Leiter-Leiter-Spannung $U_{LL} = 400V$

$$U_{LL} = U_{LE} \cdot \sqrt{3}$$

$$\underline{U}_{12} = \underline{U}_{L1} - \underline{U}_{L2} = U_{LL} \angle 30^\circ$$

$$\underline{U}_{23} = \underline{U}_{L2} - \underline{U}_{L3} = U_{LL} \angle 270^\circ$$

$$\underline{U}_{31} = \underline{U}_{L3} - \underline{U}_{L1} = U_{LL} \angle 150^\circ$$

2) Ströme in DS (symmetrisch)

$$\underline{I}_{Lx} = \frac{\underline{U}_{Lx}}{\underline{Z}}$$

Lx : Stranggrößen L1, L2, L3

3) Effektivgrößen, Symmetrische Last

Stranggröße	Stern	Dreieck
Spannung U_{LE}	$U_{LE} = \frac{U_{LL}}{\sqrt{3}}$	$U_{LE} = U_{LL}$
Strom I_{str}	$I_{str} = I_r$	$I_{str} = \frac{I_r}{\sqrt{3}}$

I_r : Zuleitungs-, Betriebs-, Bemessungsstrom

4) Leistungen in DS

Scheinleistung S [VA]:

$$S = 3 \cdot U_{LE} \cdot I_L = \sqrt{3} \cdot U_{LL} \cdot I_L$$

$$= \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\underline{S} = 3 \cdot \underline{U}_{LE} \cdot \underline{I}_L^* = P + jQ$$

in Sternschaltung:

$$\underline{S}_{3\sim} = \frac{U_{LL}^2}{\underline{Z}_{LN}^*} \quad \underline{S}_{1\sim} = \frac{U_{LL}^2}{3 \cdot \underline{Z}_{LN}^*}$$

$\underline{S}_{3\sim}$: 3-Phasen-Scheinleistung

Wirkleistung P [W]: Realteil

$$P = S \cdot \cos \varphi = 3 \cdot U_{LE} \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

$$= \sqrt{3} \cdot U_{LL} \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

Blindleistung Q [var]: Imaginärteil

$$Q = S \cdot \sin \varphi = P \cdot \tan \varphi = 3 \cdot U_{LE} \cdot I_L \cdot \sin \varphi$$

$$= \sqrt{3} \cdot U_{LL} \cdot I_L \cdot \sin \varphi$$

$Q > 0$: induktiv $Q < 0$: kapazitiv

Leistungsfaktor, Winkel:

$\cos \varphi$	φ in Grad [°]
0,95	18,1949
0,9	25,8419
0,85	31,7883
0,8	36,8699
0,75	41,4096

B. Energiebedarf, Deckung

1) Tagesbelastungskurve

$$W = \int_0^{T_n} P(t) dt$$

$$= P_n \cdot T_a = P_{max} \cdot T_m = P_{mittel} \cdot T_n$$

P_n	Nennleistung
T_a	Ausnutzungsdauer
P_{max}	Höchstlast
T_m	Benutzungsdauer
P_{mittel}	mittlere Leistung
T_n	Nennbetriebsdauer (meist. 24h)

2) Frequenz-Wirkleistungs-Regelung

a) stationärer Zustand (Gleichgewicht)

$$W_{rot} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_{mech}^2 \quad \omega_{el} = p \cdot \omega_{mech}$$

$$W_{mech-zu} = W_{el-ab} \quad P_{mech-zu} = P_{el-ab}$$

p : Polpaarzahl J : Massenträgheitsmoment

b) Störung

$$W_{m-zu} \neq W_{el-ab} \quad P_{m-zu} \neq P_{el-ab}$$

$$\Delta W_{rot} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot (\omega_{stat} - \omega_{akt})$$

II. TRAFO

OS: Oberspannungsseite (Primär)

US: Unterspannungsseite (Sekundär)

Index 1: U_1 : auf OS

Index 2: $U'_2 = U_2 \cdot \ddot{u}$: auf US

A. Grundgleichungen, idealer Trafo

Windungsspannung

$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2} = U_W = 4,44 \cdot f \cdot \hat{B} \cdot A_{Fe}$$

Induktionsspannung, Effektivwert

$$U_{ieff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 2\pi f \cdot N \cdot A_{Fe} \cdot \hat{B}$$

$$= 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \hat{B} \cdot A_{Fe}$$

Transformation

Spannung	Strom	Impedanz
$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \ddot{u}$	$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{\ddot{u}}$	$R'_2 = \ddot{u}^2 \cdot R_2$
$\underline{U}'_2 = \ddot{u} \cdot \underline{U}_2$	$\underline{I}'_2 = \underline{I}_2 \cdot \frac{1}{\ddot{u}}$	$Z_1 = \ddot{u}^2 \cdot Z_2$

Durchgangsleistung

$$S_1 = S_2 = S_D$$

Bemessungsscheinleistung [VA]

$$S_{rT} = \sqrt{3} \cdot U_{LL,OS} \cdot I_{L,OS}$$

$$S_{rT} = 3 \cdot U_{LE,OS} \cdot I_{L,OS}$$

B. Ersatzschaltbild (ESB)

$$U_1 = U_{OS} \quad U'_2 = U_{US} \cdot \ddot{u}$$

$$R_T + jX_T = (R_1 + R'_2) + j(X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})$$

$$Z_T = R_T + jX_T$$

$$U_1 = (R_T + jX_T) \cdot I_1 + U'_2$$

Kurzschlussmessung (KS)

KS auf US. $\rightarrow \underline{U}_{K1}$ auf OS (meistens)

KS auf OS. $\rightarrow \underline{U}_{K2}$ auf US

Bemessungsspannung (r = rated)

$$U_{rT} = U_{LL} = U_{LE} \cdot \sqrt{3}$$

relative KS-Spannung [%]

$$u_K = \frac{\sqrt{u_{K,Re}^2 + u_{K,Im}^2}}{U_{rT}} \cdot 100\%$$

$$= \frac{Z_T \cdot I_r}{U_{rT}/\sqrt{3}}$$

$$\underline{u}_{K1} = \frac{\underline{U}_{K1}}{U_{rT1}/\sqrt{3}} = \frac{\underline{U}_{K1}}{U_{LE,T1}}$$

$$\underline{u}_{K2} = \frac{\underline{U}_{K2}}{U_{rT2}/\sqrt{3}} = \frac{\underline{U}_{K1} \cdot \ddot{u}}{U_{rT1} \cdot \ddot{u}/\sqrt{3}}$$

$$u_{K,Re} = \frac{P_K}{S_{rT}} \cdot 100\% = \frac{R_T \cdot I_r}{U_{rT}/\sqrt{3}}$$

$$u_{K,Im} = \sqrt{u_K^2 - u_{K,Re}^2}$$

KS-Größen

$$I_K = \frac{I_r}{u_K} = \frac{U_{rT}/\sqrt{3}}{Z_T}$$

$$U_K = \frac{u_K}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}}{\sqrt{3}}$$

Betriebskonstanten

$$Z_T = \frac{u_K}{100\%} \cdot \frac{U_{rT1}^2}{S_{rT}}$$

$$R_T = \frac{u_{K,Re}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT1}^2}{S_{rT}} = \frac{u_{K,Re}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT1}}{\sqrt{3} \cdot I_r}$$

$$= P_K \cdot \frac{U_{rT1}^2}{S_{rT}^2} = \frac{P_K}{3 \cdot I_r^2}$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad \left(= u_{K,Im} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \right)$$

Verlustleistung, Wirkungsgrad

$$P_{ab} = S_{rT} \cdot \cos \varphi$$

$$P_{K,OS} = 3 \cdot R_T \cdot I_{r,US}^2$$

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_{ab}}{P_{ab} + P_K + P_L}$$

$$\eta_{max} = \frac{P'_{ab}}{P'_{zu}} = \frac{S_{rT} \cdot \cos \varphi \sqrt{\frac{P_L}{P_K}}}{P'_{ab} + 2P_L} \leftarrow P_L = P_K$$

P_{ab} : abgegebene Wirkleistung

$P_{K,OS}$: KS-/Kupferverluste, Index: OS/US

I_r : Bemessungsstrom auf US, wenn P_K auf OS

P_L : Leerlaufverluste

η_{max} : bei $P_L = P_K$

C. Parallelbetrieb von 2 Trafos

Scheinleistungsteiler

$$|S_{T1}| = \frac{Z_{T2}}{Z_{T1} + Z_{T2}} \cdot |S_{Tges}|$$

$$|S_{T2}| = \frac{Z_{T1}}{Z_{T1} + Z_{T2}} \cdot |S_{Tges}|$$

$$|S_{Tges}| = |S_{T1}| + |S_{T2}|$$

max. Last, ohne Trafobelastung

$$\left(\frac{S_{rT1/2}}{S_{T1/2}}\right)_{\min} \Rightarrow S_{T,max} = \left(\frac{S_{rT}}{S_T}\right)_{\min} \cdot S_{T,ges}$$

$$S_{T1} = \frac{u_{K,min}}{U_{K,T1}} \cdot S_{rT1}$$

- 1) Schaltgruppe mit gleicher Kennzahl
- 2) Gleiches Übersetzungsverhältnis
- 3) annähernd gleiche Kurzschlussspannung (max. diff. 10%)
- 4) Bemessungsscheinleistung kleiner als 3:1

III. FREILEITUNG**A. Durchhang von Freileitungsseilen**

hängen hyperbolisch durch. (ab 110 kV:)

$$h_{min} = 6 \text{ m} + \left(\frac{U_{nLL} - 110 \text{ kV}}{150 \text{ kV}}\right) m$$

B. Resistanzbelag**DC-Widerstand**

A_{eff} : Wirksamer Querschnitt [mm^2]

F_{ϑ} : Widerstandserhöhung durch Erwärmung

ϑ_{max} : max. zul. Betriebstemp. des Leiterseils

$$R'_{\underline{=}} = \frac{R_{\underline{=}}}{l} = \frac{\rho_{20^\circ}}{A_{eff}} \cdot \frac{1}{km}$$

$$F_{\vartheta} = 1 + \alpha(\vartheta_{max} - 20^\circ C)$$

Material	$\rho_{20^\circ C}$ in $\frac{m\Omega \cdot mm^2}{m}$	α in K^{-1}
Alu	28,6	0,0038
Kupfer	17,8	0,0039
Silber	16	0,0038
Eisendraht	120	0,0052

weitere Kenngrößen siehe F39

AC-Widerstand

$$J = J \cdot e^{-x/\delta}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot f}} = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \kappa \cdot \mu_0 \cdot f}}$$

J : Stromdichte (Leiterrand)

x : Abstand vom Leiterrand (Oberfläche)

δ : Eindringtiefe (Skinneffekt)

Betriebs-Resistanzbelag

$$R'_b = R'_{\underline{=}} \cdot F_{\vartheta} \cdot F_S = \frac{R'_{bSeil}}{n_{Seil}}$$

F_S : Widerstandserhöhung durch Skinneffekt

C. Induktivität**Äußere Ind. Einzelleiter mag. Fluss****-||- Doppelleiter****Innere Ind. Einzelleiter verketteter mag. Fluss****-||- Doppelleiter**

$$\Phi_{a1} = \frac{\mu I l}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{D-r}{r}\right)$$

$$L_a = \frac{2\Phi_{a1}}{I} = \frac{\mu l}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{D}{r}\right)$$

$$\Psi_{i1} = \Psi_{i2} = \frac{\mu I l}{8\pi}$$

$$L_i = \frac{2\Psi_{i1}}{I} = \frac{\mu l}{8\pi}$$

gesamt Induktivität

$$\mu = \mu_0, D \gg r$$

$$L_{ges} = L_a + L_i = \frac{\mu l}{2\pi} \left(\ln\left(\frac{D}{r}\right) + \frac{1}{4} \right)$$

$$L' = \frac{L_{ges}}{l} = \frac{\mu}{2\pi} \left(\ln\left(\frac{D}{r}\right) + \frac{1}{4} \right)$$

D. Reaktanzbelag

Gleichungen für $f = 50 \text{ Hz}$

Metallmantel keine Schirmung! Für D nicht $\gg r$!

Radius r-Werte siehe F39

2-Phasig/Wechselstrom

$$L'_b = 4 \cdot 10^{-7} \left[\ln\left(\frac{D_m}{r}\right) + 0,25 \right] \left[\frac{H}{m} \right]$$

$$X'_b = \omega L'_b = \pi \left[4 \ln\left(\frac{D_m}{r}\right) + 1 \right] \cdot 10^{-2} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

Drehstrom**- Einfach-/Bündelleiter (Einfach-DS-System)**

$$X'_b = \frac{\pi}{2} \left(4 \ln\left(\frac{D_m}{r_B}\right) + \frac{1}{n} \right) \cdot 10^{-2} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

$$D_m = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}$$

$$r_B = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot r_T^{n-1}} \quad r_T = \frac{a}{2 \sin \frac{180^\circ}{n}}$$

$$r_B = \sqrt{r \cdot a} \quad \text{für } n = 2$$

n : Anzahl Teilleiter (wenn $n > 1 \Rightarrow$ Bündelleiter)

D_m : Abstände bei Symmetrie der Phasen zur Mastmitte

D_{12} : Abstand $L1 - L2$, Einheit: [m]

r_B : Ersatzradius (wenn $n = 1$, dann $r_B = r$)

r_T : Radius Teilleiter (bei $n > 1$)

a : Abstand Teilleiter (bei $n > 1$)

- Doppelleitung (Doppel-DS-System)

$$X'_b = \frac{\pi}{2} \left(4 \ln \left(\frac{D_m \cdot D_{L1/LII}}{r \cdot D_{L1/LI}} \right) + \frac{1}{n} \right) \cdot 10^{-2} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

$$D_{L1/LII} = \sqrt[3]{D_{1,II} \cdot D_{2,III} \cdot D_{3,I}}$$

$$D_{L1/LI} = \sqrt[3]{D_{1,I} \cdot D_{2,II} \cdot D_{3,III}}$$

Bei Asymmetrie (Phase zur Mastmitte)

$$D_{L1/LII} = \sqrt[6]{D_{1,II} \cdot D_{2,III} \cdot D_{3,I} \cdot D_{1,III} \cdot D_{2,I} \cdot D_{3,II}}$$

E. Kapazität

$$C'_{12} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \left(\frac{D}{r} \right)} \quad C'_{1E} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \left(\frac{2h}{r} \right)}$$

C'_{12} : Kapazität zw. L1 - L2

C'_{1E} : Kapazität zw. L1 - Erde

h : Höhe zw. L1 - Erde

F. Suszeptanzbelag (Blindleitwert)

2-Phasig/Wechselstrom

$$C'_b = C'_{1E}$$

$$B'_b = \omega \cdot C'_b = \frac{17,47}{\ln \left(\frac{D}{r} \right)} \left[\frac{\mu S}{km} \right]$$

B'_b : gilt für $f = 50$ Hz

Drehstrom

- Einfach-/Bündelleitung (Einfach-DS-System)

$$C'_b = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \left(\frac{D_m}{r} \right)}$$

$$B'_b = \omega \cdot C'_b = \frac{17,47}{\ln \left(\frac{D_m}{r_B} \right)} \left[\frac{\mu S}{km} \right]$$

$$D_m = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}$$

$$r_B = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot r_T^{n-1}} \quad r_T = \frac{a}{2 \sin \frac{180^\circ}{n}}$$

$$r_B = \sqrt{r \cdot a} \quad \text{für } n = 2$$

Bei Einfachleitung $n = 1 \Rightarrow r_B = r$

- Doppelleitung (Doppel-DS-System)

$$B'_b = \omega \cdot C'_b = \frac{17,47}{\ln \left(\frac{D_m \cdot D_{L1/LII}}{r_B \cdot D_{L1/LI}} \right)} \left[\frac{\mu S}{km} \right]$$

$$D_{L1/LII} = \sqrt[3]{D_{1,II} \cdot D_{2,III} \cdot D_{3,I}}$$

$$D_{L1/LI} = \sqrt[3]{D_{1,I} \cdot D_{2,II} \cdot D_{3,III}}$$

G. Konduktanzbelag (Wirkleitwert)

$$G'_b = \frac{P_{VI}}{U_{LL}^2} \left[\frac{S}{km} \right]$$

$$P_{VI} : \text{Korona-/Isolationsverluste} \left[\frac{W}{km} \right]$$

U_{LL} : Nennspannung, Leiter-Leiter (Bsp: 110kV, 220kV...)

IV. KABEL

A. Resistanzbelag

$$F_\vartheta = 1 + \alpha \cdot (\vartheta_{max} - 20^\circ C)$$

$$R'_b = R'_- \cdot F_\vartheta \cdot F_S \cdot F_P$$

F_S : Skineffekt (F35) R'_- : für Kabel (F34)

F_P : Proximity-Effekt (F37)

B. Reaktanzbelag

r : Radius des (Innen-)Leiters, nicht vom Mantel!

D : Abstand zw. 2 Innenleiter (vom Mittelpunkt)

$D, D_m, D_{L1LI}, D_{L1LII}$ wie bei Freileitung

Wechselstromkabel

$$X'_b = \pi \left(4 \ln \left(\frac{D}{r} - 1 \right) + 1 \right) \cdot 10^{-2} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

Einfach-Drehstromkabel

$$X'_b = \pi \left(2 \ln \left(\frac{D_m}{r} - 1 \right) + \frac{1}{2} \right) \cdot 10^{-2} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

Doppel-Drehstromkabel

$$X'_b = \pi \left(2 \ln \left(\frac{D_m \cdot D_{L1LII}}{r \cdot D_{L1LI}} - 1 \right) + \frac{1}{2} \right) \cdot 10^{-2} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

C. Suzeptanzbelag

Metallmantel/-folie schirmt E-Feld ab!

B'_b : gilt für $f = 50$ Hz

d : Schirm/Mantel-Durchmesser eines Leiters

R : Radius der Isolierung

Einleiter-/Dreimantel-/Radialfeldkabel

$$C'_b = C'_{LE} = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}{\ln \left(\frac{R}{r} \right)}$$

$$B'_b = \omega C'_b = \frac{17,47 \cdot \varepsilon_r \cdot \mu S}{\ln \left(\frac{R}{r} \right) \cdot km}$$

Wechselstromkabel - 2 Innenleiter

$$C'_b = 2 \cdot C_{LE} + C_{LL} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}{\ln \left(\left(\frac{D}{r} \right) \cdot \frac{(d^2 - D^2)}{(d^2 + D^2)} \right)}$$

$$B'_b = \omega C'_b = \frac{8,735 \cdot \varepsilon_r \cdot \mu S}{\ln \left(\left(\frac{D}{r} \right) \cdot \frac{(d^2 - D^2)}{(d^2 + D^2)} \right) \cdot km}$$

Einfach-Drehstromkabel - 3 Innenleiter

$$C'_b = C_{LE} + 3 \cdot C_{LL} = \frac{4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}{\ln \left(\left(\frac{D}{r} \right)^2 \cdot \frac{(0,75d^2 - D^2)^3}{(0,75d^2)^3 - (D^2)^3} \right)}$$

$$B'_b = \omega C'_b = \frac{34,94 \cdot \varepsilon_r}{\ln \left(\left(\frac{D}{r} \right)^2 \cdot \frac{(0,75d^2 - D^2)^3}{(0,75d^2)^3 - (D^2)^3} \right)} \frac{\mu S}{km}$$

keine Kopplung zum Nachbarsystem $B'_{EDL} = B'_{DDL}$

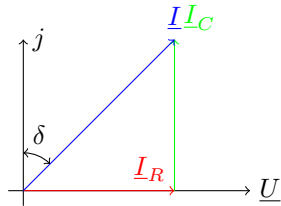
D. Konduktanzbelag

Ursache: Restleitfähigkeit der Isolierwerkstoffe
bzw. Polarisationsverluste

Verlustfaktor

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega C R} = \frac{G}{B}$$

$$G'_b = B'_b \cdot \tan \delta = \omega C'_b \cdot \tan \delta$$



Dielektrische Verluste

$$P_{Diel} = (\tan \delta \cdot \varepsilon_r) \cdot \omega \cdot C_{Vakuum} \cdot U^2 = G'_b \cdot U_{LE}^2 \quad \left[\frac{W}{km} \right]$$

$\tan \delta \cdot \varepsilon_r$: Verlustfaktor, siehe Tabelle F43

E. Leistung

geg: I_{max}, l, X'_b, G'_b ges: P_{max}

$$X_b = X'_b \cdot l \quad B_b = B'_b \cdot l$$

$$Q = 3 \cdot I_{max}^2 \cdot X_b - 3 \cdot U_{LE}^2 \cdot B_b$$

$$P_{max} = \sqrt{S^2 - Q^2}$$

V. BETRIEB VON LEITUNGEN

A. Kenngrößen

Leitung mit Verlusten

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(R'_b + jX'_b) \cdot (G'_b + jB'_b)} = \alpha + j\beta \left[\frac{1}{km} \right]$$

$$\underline{Z}_w = \sqrt{\frac{R'_b + jX'_b}{G'_b + jB'_b}} = |Z_w| \cdot e^{j\delta}$$

Falls Formel von \underline{Z}_w nicht über TR berechenbar \rightarrow

Betrag: erst \underline{Z}_w^2 , dann $\sqrt{|\underline{Z}_w^2|}$ ermitteln

Phase: $0,5 \cdot \arg(\underline{Z}_w^2)$

\Rightarrow Gilt analog auch für $\underline{\gamma}$.

γ : Ausbreitungskonstante $\left[\frac{rad}{km} = \frac{1}{km} \right]$

α : Dämpfungskonstante

β : Phasenkonstante $\left[\frac{rad}{km} = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \frac{1}{km} = \frac{^\circ}{km} \right]$

Z_w : Wellenwiderstand

δ : Phase des Wellenwiderstandes

Leitung ohne Verluste

$$R'_b = G'_b = 0 \rightarrow \alpha, \delta = 0$$

$$\underline{\gamma} = j\beta = j\sqrt{X'_b \cdot B'_b} = j\omega \cdot \sqrt{L'_b \cdot C'_b} \left[\frac{^\circ}{km} \right]$$

$$|\beta| = \sqrt{X'_b \cdot B'_b} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = \omega \cdot \sqrt{L'_b \cdot C'_b}$$

$$|Z_w| = \sqrt{\frac{X'_b}{B'_b}} = \sqrt{\frac{L'_b}{C'_b}}$$

$$\text{Richtwerte: } Z_w \approx 400 \Omega \quad \beta = 0,06 \frac{^\circ}{km}$$

natürliche Leistung, Blindleistungsverluste

- gilt bei Leitung ohne Verlusten, DS-System

- natürlicher Betrieb bei $Q_L = Q_C$

$$I_{nat} = \frac{U_{LE}}{\sqrt{X_L/B_L}} = \frac{U_{LE}}{Z_w} \neq f(l)$$

$$P_{nat} = 3 \cdot U_{LE} \cdot I_{nat} = \frac{U_{LL}^2}{Z_w} = \frac{3 \cdot U_{LE}}{Z_w}$$

$$Q_L = 3 \cdot X_L \cdot I_L^2 \quad Q_C = 3 \cdot B_L \cdot U_{LE}^2$$

$$\frac{Q_V}{Q_C} = \left(\frac{S_u}{P_{nat}} \right)^2 - 1$$

$$Q_v = Q_1 - Q_2 = Q_L - Q_C = Q_C \cdot \left(\frac{Q_L}{Q_C} - 1 \right)$$

$$S_v = S_1 - S_2 = P_v + jQ_v$$

$$S_u = 3 \cdot U_{LE} \cdot I_L = \sqrt{3} \cdot U_{LL} \cdot I_L$$

Q_v : Blindleistungsverluste

S_u : Übertragungsscheinleistung

B. Ersatzschaltbilder (ESB)

Kenngrößen

	Längszweig	Querzweig
Wirk	$R_L = R'_b \cdot l$	$G_L = G'_b \cdot l$
Blind	$X_L = X'_b \cdot l$	$B_L = B'_b \cdot l$

R_L : Resistanz X_L : Reaktanz

B_L : Suszeptanz G_L : Konduktanz

R_L, X_L in Reihen-, B_L, G_L in Parallelschaltung

Index 1/2: Größe am Anfang/Ende der Leitung ($U_{LE}!!$)

Index L: Größen bezogen auf Leitung

dU : Spannung am Längszweig

MS-/NS-Leitungen mit Verlusten

$$I_G, I_C \ll I_L \Rightarrow G'_b = B'_b = 0$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{I}_L = \underline{I}_2 & \underline{U}_1 &= d\underline{U} + \underline{U}_2 \\ d\underline{U} &= (R_L + jX_L) \cdot \underline{I}_L = (R'_b + jX'_b) \cdot l \cdot \underline{I}_L \\ \underline{Z}_L &= R_L + jX_L & \varphi_Z &= \arctan \frac{X_L}{R_L} = \arctan \frac{X'_b}{R'_b} \end{aligned}$$

Kurze HS-/HöS-DS-Freileitungen

$$U_{LL} > 100 \text{ kV für } l \leq 220 \text{ km}$$

ohne Verluste: ($R'_b = G'_b = 0$)

$$\begin{aligned} B'_1 &= B'_2 = \frac{B'_b}{2} & \underline{I}_{C1/2} &= j B_{1/2} \cdot \underline{U}_{1/2} \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_{C1} + \underline{I}_L & \underline{I}_L &= \underline{I}_{C2} + \underline{I}_2 \end{aligned}$$

bei Leerlauf: $\underline{I}_2 = 0 \rightarrow \underline{I}_{C2} = \underline{I}_L$

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \left(1 - \frac{X_L \cdot B_L}{2}\right) \cdot \underline{U}_2 \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_2 + j 0.5 \cdot B_L \cdot (\underline{U}_1 + \underline{U}_2) \\ Q_1 &= 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \end{aligned}$$

\underline{I}_1 : Ladestrom Q_1 : Ladeleistung

bei Betrieb mit natürlicher Leistung: $R_2 = Z_w = \underline{Z}_2$

$$\begin{aligned} S_1 &= S_2 = P_1 = P_2 = P_{nat} & |\underline{U}_1| &= |\underline{U}_2| & |\underline{I}_1| &= |\underline{I}_2| \\ \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot B_L \cdot X_L + j \frac{X_L}{Z_w}\right) \\ \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_2}{Z_w} + j \frac{B_L}{2} \cdot (\underline{U}_1 + \underline{U}_2) \\ \underline{I}_L &= \frac{\underline{U}_2}{Z_w} + j \frac{B_L}{2} \cdot \underline{U}_2 \end{aligned}$$

Lange HS-/HöS-DS-Freileitungen

$$U_{LL} > 100 \text{ kV für } l > 220 \text{ km}$$

ohne Verluste ($R'_b = G'_b = 0$)

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \cdot \cos(\beta l) + j \cdot \underline{I}_2 \cdot Z_w \cdot \sin(\beta l) \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_2 \cdot \cos(\beta l) + j \cdot \frac{\underline{U}_2}{Z_w} \cdot \sin(\beta l) \end{aligned}$$

bei Leerlauf: $\underline{I}_2 = 0, \underline{Z}_2 \rightarrow \infty$

bei Betrieb mit natürlicher Leistung: $\varphi = \beta l \left[\frac{^\circ}{\text{km}} \cdot \text{km} = ^\circ \right]$

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= |\underline{U}_2| \cdot e^{j\varphi} & \underline{I}_1 &= |\underline{I}_2| \cdot e^{j\varphi} \\ \underline{S}_1 &= \underline{S}_2 = \frac{3 \cdot U_{2,LE}^2}{Z_w} = P_{nat} \end{aligned}$$

mit Verlusten

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \cdot \cosh(\underline{\gamma} l) + \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_w \cdot \sinh(\underline{\gamma} l) \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_2 \cdot \cosh(\underline{\gamma} l) + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_w} \cdot \sinh(\underline{\gamma} l) \end{aligned}$$

Nicht direkt mit komplexen Modus des TR einsetzbar!

Lösung: $\alpha \cdot l$ und $\beta \cdot l [^\circ]$ einzeln berechnen, dann:

$$\begin{aligned} \cosh(\underline{\gamma} l) &= \frac{1}{2} [e^{\alpha l} \cdot e^{j\beta l} + e^{-\alpha l} \cdot e^{-j\beta l}] \\ \sinh(\underline{\gamma} l) &= \frac{1}{2} [e^{\alpha l} \cdot e^{j\beta l} - e^{-\alpha l} \cdot e^{-j\beta l}] \end{aligned}$$

$e^{\pm \alpha l}$: Betrag $e^{\pm j\beta l}$: Winkel (\angle im TR)

Wichtig: Winkel von β umrechnen für $\beta \cdot l$!

$$[\beta] = \frac{\text{rad}}{\text{km}} \Rightarrow \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \frac{1}{\text{km}} = \frac{^\circ}{\text{km}}$$

HS-/HöS-DS-Kabel

$l > 95 \text{ km}$: langes Kabel

ESB lange/kurze Kabel analog zu Freileitungen (FL)

lange Kabel \Rightarrow Formeln lange FL

kurze Kabel \Rightarrow Formeln kurze FL

$Q_V = Q_L - Q_C$ wie FL, aber $Q_K > Q_{FL}$

$$\begin{aligned} S_{th} &= 3 \cdot U_{LE} \cdot I_{Dauer} \\ P_{max} &= \sqrt{S_{th}^2 - Q_V^2} = \sqrt{S_{th}^2 - Q_V'^2 \cdot l^2} \\ Q_V &= Q_V' \cdot l & l_{max} &= \frac{S_{th}}{Q_V'} \end{aligned}$$

S_{th} : thermisch, max. Scheinleistung

P_{max} : max. übertragbare Wirkleistung

l_{max} : max. Kabellänge, wenn $P_{max} = 0$

VI. GENERATOR

Induktionsgesetz

$$U_{i_{eff}} = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot B_m \cdot \hat{A}_{Fe}$$

mechanische Leistung, Wirkungsgrad

$$P_{mech} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M = \omega \cdot M \quad [n] = \frac{1}{s}$$

$$\eta_{gen} = \frac{P_{el}}{P_{mech}} \quad [M] = Ws = Nm = J$$

Polpaarzahl

$$n = \frac{f}{p} = \frac{3000}{p} \left[\frac{1}{min} \right] \quad \text{für } f = 50Hz$$

A. Ersatzschaltbild (ESB)

$$R_S = 0 \quad \text{WICHTIG! } U = U_{LE} = U_{LL} / \sqrt{3}$$

$$\underline{I} = I_w + jI_b \quad I_w = I \cdot \cos(\varphi) \quad I_b = \underline{I} \cdot (\pm \sin(\varphi))$$

$$\underline{U}_p = \underline{U} + jX_s \cdot \underline{I} \quad U_p = \sqrt{(U + X_s \cdot I_b)^2 + (X_s \cdot I_w)^2}$$

$\underline{U}, \underline{I}$: Klemmen U_p : Polrad (Quelle) X_s : Statorreaktanzen
 φ : $\angle(U, I)$ ϑ : $\angle(U, U_p)$: Polradwinkel

B. Allein-/Inselbetrieb

Belastungskennlinie ($U_p = \text{const.}$):

$$1 = \left(\frac{U}{U_p} \right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{U}{U_p} \right) \cdot \left(\frac{I}{I_k} \right) \cdot (\pm \sin(\varphi)) + \left(\frac{I}{I_k} \right)^2$$

1) *Reine Wirkleistung*: $\sin(\varphi) = 0 \Rightarrow$ Kreis

$$\frac{U}{U_p} = \sqrt{1 - \left(\frac{I}{I_k} \right)^2} \quad I_k = \frac{U_p}{X_s}$$

2) *Reine Blindleistung*: $\sin(\varphi) = \pm 1 \Rightarrow$ Gerade

$$\frac{U}{U_p} = 1 \mp \left(\frac{I}{I_k} \right)$$

– : induktiv + : kapazitiv I_k : Kurzschluss

C. Netzbetrieb, Betrieb am starren Netz

Regulierungskennlinie ($U = \text{const.}$):

$$\frac{U_p}{U} = \sqrt{1 + 2 \cdot \frac{I}{I_B} \cdot \sin(\varphi) + \left(\frac{I}{I_B} \right)^2} \quad I_B = \frac{U}{X}$$

1) *Reine Wirkleistung*: $\sin(\varphi) = 0 \Rightarrow$ Kreis

$$\frac{U_p}{U} = \sqrt{1 + \left(\frac{I}{I_B} \right)^2}$$

2) *Reine Blindleistung*: $\sin(\varphi) = \pm 1 \Rightarrow$ Gerade

$$\frac{U_p}{U} = 1 \pm \left(\frac{I}{I_B} \right)$$

+ : induktiv – : kapazitiv I_B : Bezugsstrom

D. Leistung

$P_{mech, zu} = P_{el, ab} = P \neq f(\vartheta) \rightarrow$ für $\vartheta < 90^\circ$ stabil

Wichtig! $S_{Bez} \neq S$

$$\sin(\vartheta) = \frac{I_w \cdot X}{U_p} = \frac{P \cdot X}{3 \cdot U \cdot U_p} \quad \cos(\vartheta) = \frac{U + X \cdot I_b}{U_p}$$

$$P = 3 \cdot \frac{U \cdot U_p}{X} \cdot \sin(\vartheta) = P_{Kipp} \cdot \sin(\vartheta)$$

$$S_{Bez} = 3 \cdot \frac{U^2}{X} \quad P_{Kipp} = P_{max} = 3 \cdot \frac{U \cdot U_p}{X}$$

$$\frac{P}{S_{Bez}} = \left(\frac{U_p}{U} \right) \cdot \sin(\vartheta) \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\frac{Q}{S_{Bez}} = \left(\frac{U_p}{U} \right) \cdot \cos(\vartheta) - 1 \quad \sin(\vartheta) = \frac{P}{P_{Kipp}}$$

E. Regelung

$$\vartheta = \arcsin \left(\frac{P \cdot X}{3 \cdot U \cdot U_p} \right)$$

$$Q = \left(\frac{3 \cdot U^2}{X_s} \right) \cdot \left(\frac{U_p}{U} \cdot \cos(\vartheta) - 1 \right)$$

Konstante Scheinleistung

$S = S_{max} = \text{const}$

$\underline{U} = \text{const}, |\underline{I}| = \text{const}$

$I_w = \text{var.} \rightarrow P_{zu} = \text{var.}$

$I_b(I_{err}) = \text{var.} \rightarrow U_p = \text{var.}$

Regelung Polradspannung

$I_{err}(I_b) \sim U_p$

$P = \text{const} \rightarrow I_w = \text{const}$

$U_p = \text{var.} \rightarrow I_b(I_{err}) = \text{var.} \rightarrow Q = \text{var.}$

bei $1 \leq \frac{U_p}{U} \leq 2$ ergibt sich

$$-0,5(kap.) \leq \frac{Q}{S_{Bez}} \leq +0,75(ind.)$$

Regelung Turbinenleistung (Ventilregelung)

$U_p = \text{const} \rightarrow I_b = f(I_w)$

$P = \text{var.} \rightarrow I_w = \text{var.} \rightarrow Q = \text{var.}$

bei $0,9 \leq \frac{P}{S_{Bez}} \leq 1,75$ ergibt sich

$$0 \leq \frac{Q}{S_{Bez}} \leq +0,75(ind.)$$

U_p, P, Q und v sind abhängig voneinander.

Aus zwei Größen \rightarrow die anderen Beiden

Reine Blindleistung (Phasenschieberbetrieb)

$P = 0 \rightarrow I_w = 0$

U, U_p phasengleich

$Q = \text{var.} \rightarrow I_b = \text{var.} \rightarrow U_p \text{ var.}$

Bei Leerlauf: $I_b = 0 \rightarrow U = U_p$

VII. THEORIE

A. Grundlagen

Kriterien für Einteilung Energieversorgungsnetze:

- Spannungsart
- Spannungshöhe
- Funktion
- Topologie

Arten der Netztopologien:

- Strahlennetz (z.B. Kfz-Bordnetz)
- Ringnetz
- Maschennetz

Spannungshöhe:

- Höchstspannung (HöS) 380/220 kV
- Hochspannung (HS) 100 kV
- Mittelspannung (MS) 10/20 kV
- Niederspannung (NS) < 1 kV

Tages-Lastungsdiagramm:

- Grundlast: Kernenergie, Braunkohle, Laufwasser produzieren konstant Strom, träge Wärmeprozesse
- Mittellast: Erdgas, Steinkohle, Heizöl vorhersehbar schwankender Teil der benötigten Leistung
- Spitzenlast: Pumpspeicher, Gasturbinen schnell zuschaltbar, Abdeckung Lastspitzen (bei Mittag, Abend)

Residuallast: Netzlast abzüglich fluktuierender Einspeiseleistung der erneuerbaren Energien, entspricht der Last, die konventionelle Kraftwerke abdecken müssen

B. Trafos

Kühlungsart

O: Ölisolierung N: Natürlich durch Auftrieb
A: Luft W: Wasser F: Fremd durch Lüfterpumpen

Beispiel:

ONAN: Ölkreislauf natürlich, Kühler (Radiatoren) natürlich

OFWF: Ölkreislauf gepumpt, Wasserkühler mit Pumpen

Schaltgruppen

OS: Y, YN, D US: y, yn, d, zn, a

N/n: mit Sternpunktleiter

zn: Zick-Zack (nur Sternpunktschaltung)

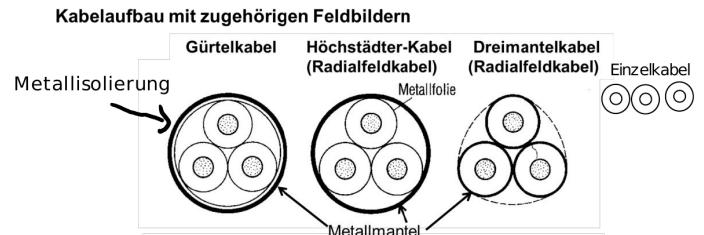
a: Sparwicklung

Beispiel: Dy5 → Dreieck OS, Stern US, $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$
Phasenversatz zwischen OS/US.

C. Kabel

Leiterprofile (Aufbau-Kurzzeichen)

R: Rundleiter O: Ovalleiter S: Segmentleiter
H: Hohlleiter E: Eindrätig M: Mehrdrätig
V: Verdichtet → weitere Kurzzeichen: siehe F34



	Freileitung	Kabel
Reaktanzbelag	groß	klein
Kapazitätsbelag	klein	groß
Wellenwiderstand	groß	klein
Natürliche Leistung	klein	groß

D. Generator

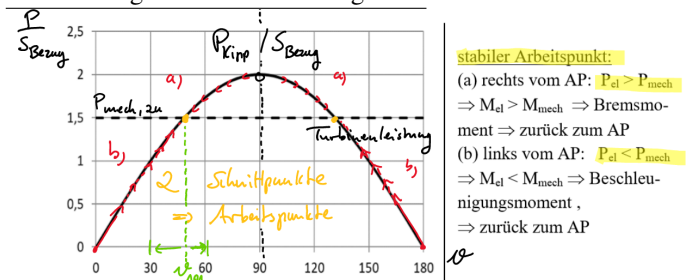
Polradspannung U_p : Im Stator induzierte Spannung

Polradwinkel ϑ : Winkel Polrad- zu Klemmenspannung

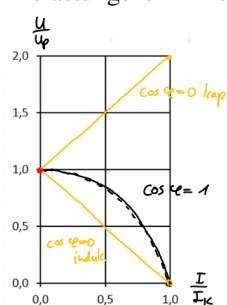
Aufbau	Stator	Rotor
Innenpol	Induktionsspule	Permanentmagnet
Außenpol	Permanentmagnet	Induktionsspule

⇒ Drehstrom-Synchronmaschinen als Innenpolgenerator!

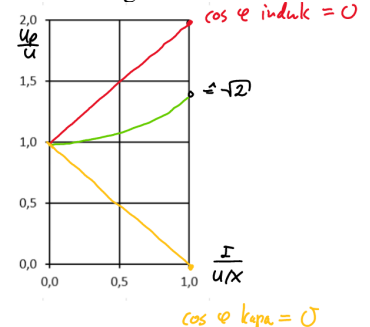
Wirkleistungs-Polradwinkel-Diagramm



Belastungskennlinie



Regulierkennlinie



E. Schaltgeräte

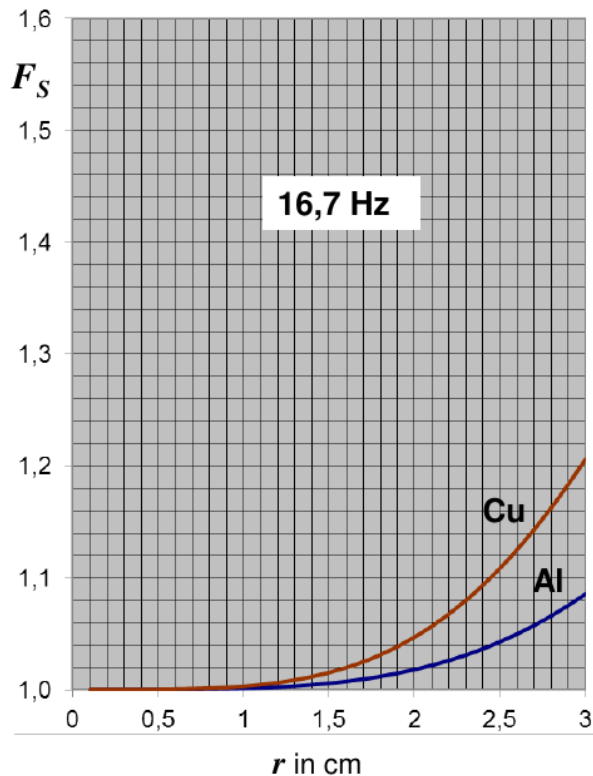
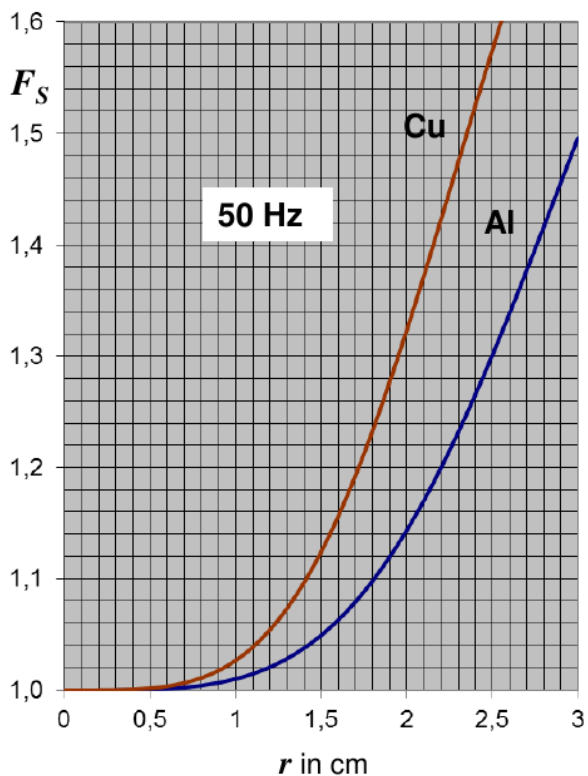
Löschen des Lichtbogens (LiBo):

- Verlängerung des LiBo (thermischer Auftrieb)
- Kühlung des LiBo (Öl, MS)
- Aufteilen des LiBo (Löschbleche, in NS)

VIII. TABELLEN, ANHÄNGE

F39 - Gleichstromwiderstand, Seildurchmesser, Sollquerschnitt (Freileitung)

Nennquerschnitt = Bezeichnung A_{Al}/A_{St} [mm ²]	Sollquerschnitt Aluminium [mm ²]	Sollquerschnitt Stahl [mm ²]	Sollquerschnitt gesamt [mm ²]	Seildurchmesser $D = 2 r$ [mm]	Al/St-Seile $R'_{20^\circ C}$ [Ω/km]
16/2,5	15,27	2,54	17,8	5,4	1,874
25/4	23,86	3,98	27,8	6,8	1,203
35/6	34,35	5,73	40,1	8,1	0,835
50/8	48,25	8,04	56,3	9,6	0,595
70/12	69,89	11,40	81,3	11,7	0,413
95/15	94,39	15,33	109,7	13,6	0,306
120/20	121,57	19,85	141,4	15,5	0,237
150/25	148,86	24,25	173,1	17,1	0,194
185/30	183,78	29,85	213,6	19,0	0,157
210/35	209,10	34,09	243,2	20,3	0,138
230/30	230,91	29,85	260,8	21,0	0,125
240/40	243,05	39,49	282,5	21,8	0,119
265/35	263,66	34,09	297,8	22,4	0,109
300/50	304,26	49,48	353,7	24,5	0,095
380/50	381,70	49,48	431,2	27,0	0,076
435/55	434,29	56,30	490,6	28,8	0,067
490/65	490,28	63,55	553,8	30,6	0,059
560/50	561,70	49,48	611,2	32,2	0,051
680/85	678,58	85,95	764,5	36,0	0,043
1045/45	1045,58	45,28	1090,5	43,0	0,028

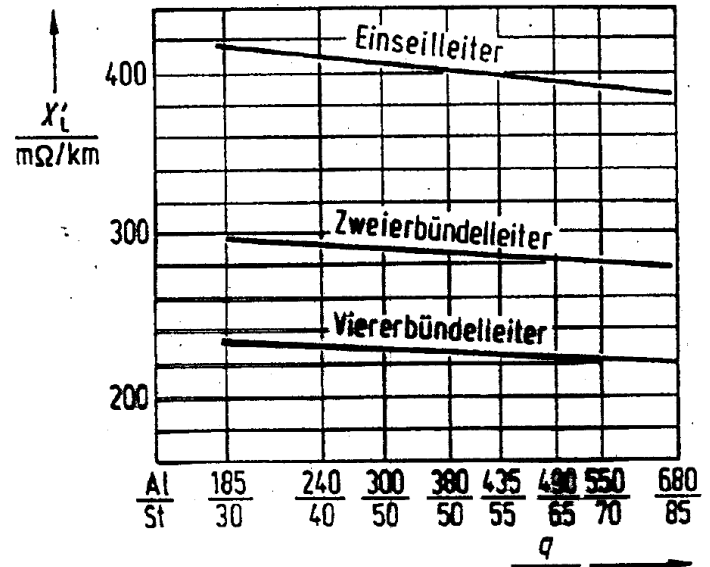
F42 - Widerstandserhöhung durch Skineffekt (Freileitung, Kabel)

F43 - Resistanzbelag, Richtwerte Seilbelegungen (Freileitung)

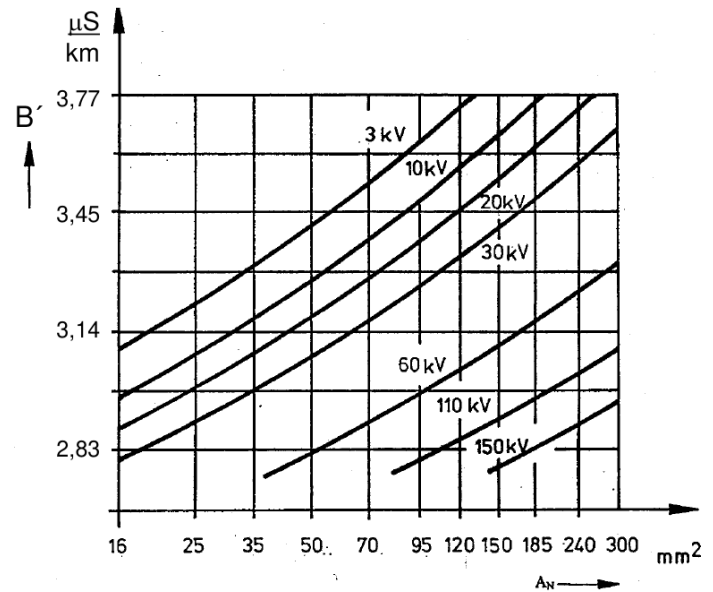
Leitung [kV]	Seiltyp	$R'_b \left[\frac{\Omega}{km} \right]$
10/20	Einfach	0,3 - 0,6
110	Einfach	0,2 - 0,15
220	Zweierbündel	0,09
380	Viererbündel	0,03

F46 - Reaktanzbelag, Richtwerte Hochspannungsleitungen (Freileitung)

Seiltyp	$X'_b \left[\frac{\Omega}{km} \right]$ je Leiter
Einerseil	0,40
Zweierbündel	0,30
Viererbündel	0,23


F48 - Suszeptanzbelag, Richtwerte Einfachseil bei f=50Hz (Freileitung)

Richtwerte $U_{Betrieb}$	$B'_b \left[\frac{\mu S}{km} \right]$ je Leiter
< 30 kV	3,5
> 30 kV	3


F49 - Konduktanzbelag, Richtwerte (Freileitung)

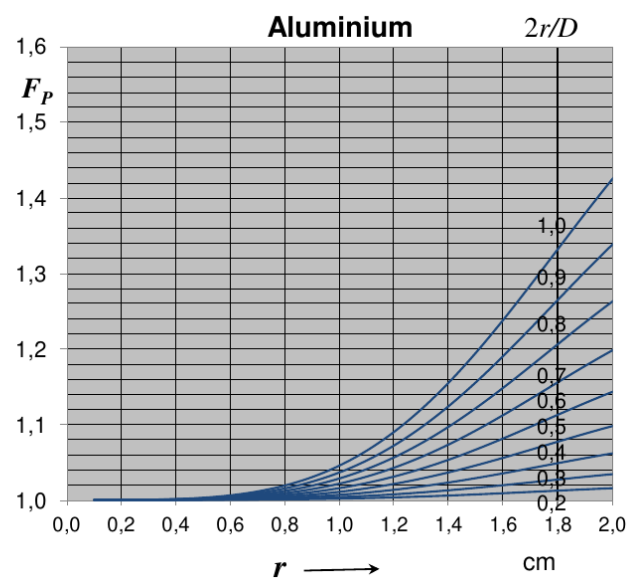
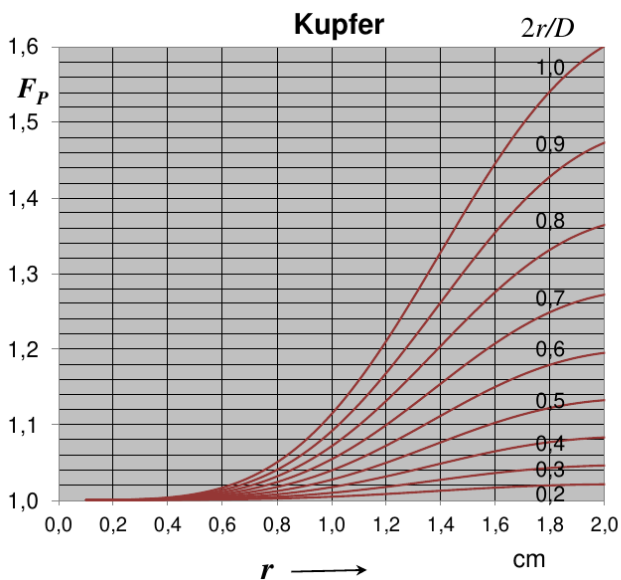
Richtwerte $U_{Betrieb}$	$G'_b \left[\frac{nS}{km} \right]$ je Leiter
< 30 kV	vernachlässigbar
110 kV	4 - 5
220 kV	2,5 - 3,5
380 kV	1 - 2

- Strom über Isolation (hier Luft) gegen Erde
- Ursachen: Korona- und Isolationsverluste

F34 - Resistanzbelag R'_{Ω} in $\frac{\Omega}{\text{km}}$ (Kabel)

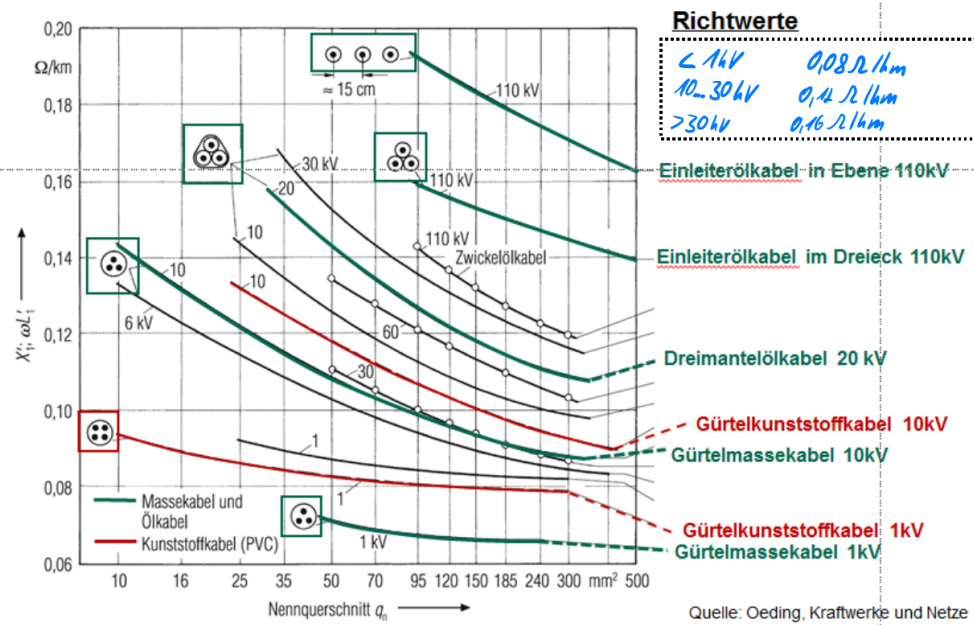
Nennquerschnitt [mm ²]	Kupferleiter	Aluminiumleiter
10	1,830	3,080
16	1,150	1,910
25	0,727	1,200
35	0,524	0,886
50	0,387	0,641
70	0,268	0,443
95	0,193	0,320
120	0,153	0,253
150	0,124	0,206
185	0,0991	0,164
240	0,0754	0,125
300	0,0601	0,100
400	0,0470	0,0778
500	0,0366	0,0605
630	0,0283	0,0469
800	0,0221	0,0367
1000	0,0176	0,0291

Buchstabe	Bedeutung (Ohne A → Leiter aus Kupfer)
A	Leiter aus Aluminium
Y	Aderisolierung aus PVC (Polyvinylchlorid)
2Y	Aderisolierung aus PE (Polyethylene)
2X	Aderisolierung aus VPE (Vinyl Polyethylene)
S	Schirm aus Kupfer
C	Konzentrischer Kupferleiter
CW	Konzentrischer Kupferleiter, wellenförmiger
K	Bleimantel
KL	Gepresster, Glatter Aluminiummantel
B	Bewehrung aus Stahlband
F	Bewehrung aus Stahlflachdraht - geschlossen
-J	Kabel mit grün-gelbem Schutzleiter
-O	Kabel ohne grün-gelbem Schutzleiter

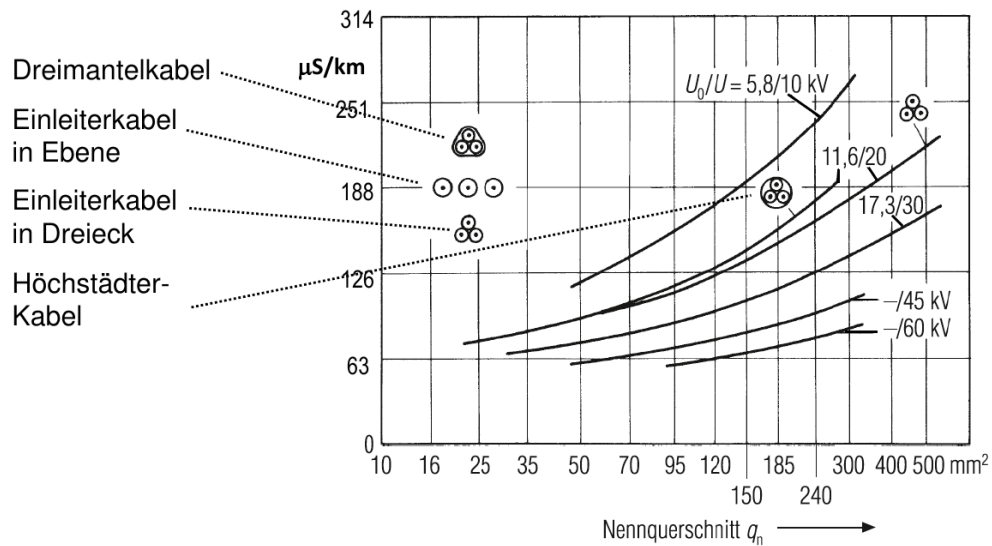
F37 - Widerstandserhöhung durch Proximityeffekt F_P (Kabel)

F42 - Verlustfaktor/ ε –Konstante von Isolierstoffen (Kabel)

Isolierstoff	$\tan\delta \times 10^3$	ε_r	$(\varepsilon_r \tan\delta) \times 10^3$
Masse-Papier	10	4	40
Öl-Papier	1,5 ... 3	3,3 ... 3,7	5 ... 11
PP(LP)	0,5 ... 0,6	2,6	1,3 ... 1,6
PVC	20 ... 100	3 ... 4	60 ... 400
PE	0,2 ... 0,4	2,2 ... 2,3	0,4 ... 0,9
VPE	0,3 ... 0,4	2,3 ... 2,4	0,7 ... 1,2
EPR	4 ... 6	2,7 ... 3	11 ... 18

F40 - Reaktanzbelag X'_b , Richtwerte (Kabel)



F43 - Suszeptanzbelag B'_b - Richtwerte Radialfeldkabel mit Masseisolierung $\epsilon_r = 4$



F44 - Suszeptanzbelag B'_b - Richtwerte (Kabel)

