

Kontaktstudium Elektrische Energieübertragung

# Kapitel 2: Elektrische Betriebsmittel

ZENTRUM FÜR MEDIALES LERNEN (ZML)



# Autor

## **Prof. Dr.-Ing. Michael Schäfer**

Nach einer Berufsausbildung zum Informationselektroniker und dem Studium der Elektrotechnik promovierte Prof. Dr.-Ing. Michael Schäfer an der Universität Stuttgart über die thermische Modellierung und Überwachung von Leistungstransformatoren. Von 2000 bis 2006 war er in mehreren Funktionen im Bereich Leistungstransformatoren bei der Siemens AG in Nürnberg tätig. In 2006 wechselte er zur EnBW Regional AG, wo er im Bereich Netzservice für technische Lösungen im Netzbau verantwortlich war. Seit 2011 leitet er die Abteilung Anlagentechnik beim Übertragungsnetzbetreiber TransnetBW. Er ist Mitglied in mehreren Gremien des VDE, der GIGRE und der ETG. Seit 2004 ist er Lehrbeauftragter und seit 2013 Honorarprofessor am Karlsruher Institut für Technologie.

Leseprobe Kapitel 2.5.6

---

## **Impressum**

Kapitel 2: Elektrische Betriebsmittel

© Karlsruher Institut für Technologie – Zentrum für Mediales Lernen (ZML), alle Rechte vorbehalten  
Karl-Friedrich-Str. 17 · 76133 Karlsruhe · Tel. 0721 608-48200 · Fax 0721 608-48210

2. überarbeitete Auflage 2015 (20150401)  
Satz: Presse, Kommunikation und Marketing  
Fernstudiendidaktische Überarbeitung: ZML

# Inhaltsverzeichnis

<b>Autor</b>	<b>3</b>
<b>Impressum</b>	<b>3</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>11</b>
<b>2 Elektrische Betriebsmittel</b>	<b>13</b>
2.1 Generatoren	14
2.1.1 Aufbau und Einsatz von Synchrongeneratoren	14
2.1.2 Funktion und Ersatzschaltung von Synchrongeneratoren	15
2.1.3 Zeigerdiagramm und Ortskurven	29
2.1.4 Betriebsverhalten von Synchrongeneratoren	34
2.2 Transformatoren	42
2.2.1 Theoretische Grundlagen und Ersatzschaltung	45
2.2.2 Ausführungsformen von Transformatoren	62
2.2.3 Ausgleichsvorgänge an Transformatoren	85
2.2.4 Parallelbetrieb von Transformatoren	90
2.2.5 Entwicklung und Zukunftsperspektiven	92
2.3 Drosselspulen	95
2.3.1 Reihendrosselspulen	95
2.3.2 Paralleldrosselspulen	98
2.3.3 Sternpunktterdungsrossel	99
2.3.4 Ausführungsformen von Drosselspulen	101
2.4 Kondensatoren	103
2.4.1 Reihenkondensatoren	103
2.4.2 Parallelkondensatoren	104

2.5	Leitungen	108
2.5.1	Bedeutung von Freileitungen und Kabeln bei der Energieübertragung	109
2.5.2	Leitungstheorie	109
2.5.3	Freileitungen	122
2.5.4	Kabel	124
2.5.5	Gasisolierte Leitungen	126
2.5.6	Leistungsparameter von Freileitungen und Kabeln	128
2.6	Wandler	139
2.6.1	Aufgaben, Beanspruchungen und Ausführungsformen von Wandlern	139
2.6.2	Sättigungserscheinungen an Stromwandlern	150
2.6.3	Resonanzerscheinungen an induktiven Spannungswandlern	151
2.7	Leistungsschalter	154
2.7.1	Bauformen, Löschmedien und Isolationsmedien in Leistungsschaltern	158
2.8	Trennschalter	164
2.8.1	Aufgabe von Trennschaltern im Netz	164
2.8.2	Aufbau und Beanspruchung von Trennschaltern	166
2.9	Überspannungsableiter	169
2.9.1	Isolationskoordination und Überspannungsableiter	169
2.9.2	Schutzbereich von Überspannungsableitern	171
2.9.3	Feldsteuerung an Überspannungsableitern	176
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>177</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>181</b>

- Übertragungsleistung: 500...4000 MVA
- Kurzschlussstrom: 63 KA während 1 s



Abbildung 77: Messeinrichtungen zur Überwachung der Gasräume in einer GIL

### 2.5.6 Leitungsparameter von Freileitungen und Kabeln

#### Berechnung

Im folgenden Abschnitt wird ausführlich auf die Berechnung der Leitungsparameter von Freileitungen und Kabeln eingegangen. Dabei werden die Effekte, die die Betriebsgrößen beeinflussen, beschrieben. Eine genaue Kenntnis der Leitungsparameter ist für den Netzbetrieb unerlässlich. Sie werden sowohl für die Modellierung des Netzes zur Lastflussberechnung und Kurzschlussstromberechnung benötigt als auch zur korrekten Einstellung der Netzschutzeinrichtungen und deren Staffelung zur Gewährleistung eines redundanten und sicher arbeitenden, selektiven Netzschutzes.

#### Ohmscher Widerstand

Die Strompfade verlaufen wegen der Übergangswiderstände von einem Seil zum benachbarten nicht parallel zur Achse des Seils, sondern längs der Einzeldrähte. Die Länge der Einzeldrähte unterscheidet sich etwas von der Länge des Seils. Um dem Rechnung zu tragen, kann die Berechnung des Widerstandes mit einer etwas reduzierten Leitfähigkeit erfolgen:

$$R' = \frac{R}{l} = \frac{1}{\kappa_{\text{eff}} \cdot A} = \frac{1}{0,98 \cdot \kappa_{\text{Material}} \cdot A} \quad (2.197)$$

$A$ : Querschnitt des Leiterseils  
 $l$ : Länge des Leiterseils  
 $\kappa_{\text{Material}}$ : Leitfähigkeit des Leitermaterials

Weiterhin ist die Leitfähigkeit  $\kappa_{\text{Material}}$  auch noch temperaturabhängig. Es gilt folgende Gleichung:

$$R(\vartheta_w) = R(\vartheta_k) \cdot \frac{\vartheta_w + \vartheta_0}{\vartheta_k + \vartheta_0}$$

mit:

$R(\vartheta_w)$ : ohmscher Widerstand bei der Temperatur  $\vartheta_w \in ^\circ\text{C}$   
 (Warmwiderstand)

$R(\vartheta_k)$ : ohmscher Widerstand bei der Temperatur  $\vartheta_k \in ^\circ\text{C}$   
 (Kaltwiderstand)

$\vartheta_0$ : Materialkonstante,  $\vartheta_0 = 235$  für Kupfer

$\vartheta_0 = 225$  für Aluminium

Im Allgemeinen wird der Widerstand auf die Leitungslänge bezogen und als Widerstandsbelag angegeben.

Für überschlägige Berechnungen eignen sich folgende Richtwerte (VDE 0102, DIN EN 60909), die für eine Temperatur von  $20^\circ\text{C}$  gelten:

$$R' = \frac{R}{l} = \frac{1}{54 \cdot A} \quad \text{für Kupfer}$$

$$R' = \frac{R}{l} = \frac{1}{34 \cdot A} \quad \text{für Aluminium} \quad (2.199)$$

$$R' = \frac{R}{l} = \frac{1}{31 \cdot A} \quad \text{für Aldrey (Aluminiumlegierung)}$$

mit  $A$  in  $\text{mm}^2$  und  $R'$  in  $\text{Ohm/m}$

Bei Wechselströmen verteilt sich der Strom nicht gleichmäßig auf den Leiterquerschnitt. Die sogenannte Stromverdrängung wird durch die Wechselwirkung von Stromfluss und magnetischem Feld erzeugt. Man unterscheidet zwei Effekte (Abb. 78,  $R_0$  bezeichnet den Gleichstromwiderstand des Leiters und  $r_0$  ist der Leiterradius).

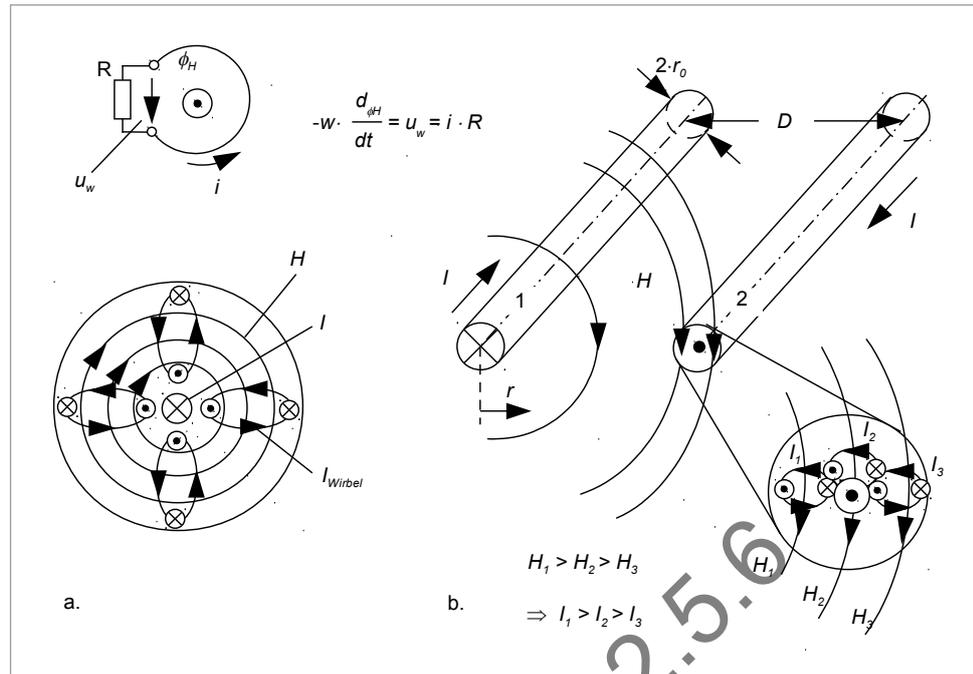


Abbildung 78: Wirbelstromeffekte/Stromverdrängungseffekte  
 a) Skineffekt: außen wird  $I$  durch  $I_{\text{Wirbel}}$  innen abgeschwächt  
 b) Proximityeffekt: unterschiedlich starkes Magnetfeld über dem Leiterquerschnitt

#### Magnetische Beeinflussungen

##### ■ Skineffekt:

Der im Leiter fließende Strom erzeugt ein Magnetfeld. Dieses induziert im Leiter einen Strom, der seiner Ursache, nämlich dem Stromfluss, entgegenwirkt (Lenz'sche Regel). Im Zentrum des Leiters wird der Strom durch die Wirbelströme abgeschwächt, nahe der Oberfläche addieren sich der Strom und die Wirbelströme. Insgesamt erhöht sich die Stromdichte zur Oberfläche des Leiters hin. Der Strom fließt quasi in einer Art Haut des Leiters, deshalb die Bezeichnung „Skineffekt“.

##### ■ Proximityeffekt:

Bei zwei parallelen Leitern beeinflusst das Magnetfeld des einen Leiters (1) den Stromfluss in dem anderen Leiter (2). Dieser Einfluss ist über dem Querschnitt des Leiters (2) etwas unterschiedlich, da die Feldstärke auf der dem Leiter (1) zugewandten Seite etwas größer, und auf der dem Leiter (1) abgewandten Seite etwas kleiner ist. Der Mechanismus ist derselbe wie beim Skineffekt, d. h. induzierte Ströme verstärken den Hauptstrom oder sie schwächen ihn ab. Bei Freileitungen spielt – im Gegensatz zu Kabeln – der Proximityeffekt aufgrund des großen Leiterabstandes praktisch keine Rolle.

Für homogene und kreiszylindrische Leiter gelten folgende Näherungen:

$$\frac{R_{skin}}{R_0} = 1 + \frac{1}{48} \cdot \left(\frac{r_0}{\delta}\right)^4 \quad \text{für } r_0 < \delta$$

$$\frac{R_{skin}}{R_0} = \frac{r_0}{2 \cdot \delta} + \frac{1}{4} + \frac{3}{32} \cdot \frac{\delta}{r_0} \quad \text{für } r_0 > 2\delta \quad (2.200)$$

mit  $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \kappa \cdot \mu}}$

### Induktivität

Die innere Induktivität eines Leiters ist in Abbildung 78 dargestellt. Es zeigt den Verlauf des magnetischen Feldes innerhalb und außerhalb eines zylindrischen, stromdurchflossenen Leiters.

Grundlagen

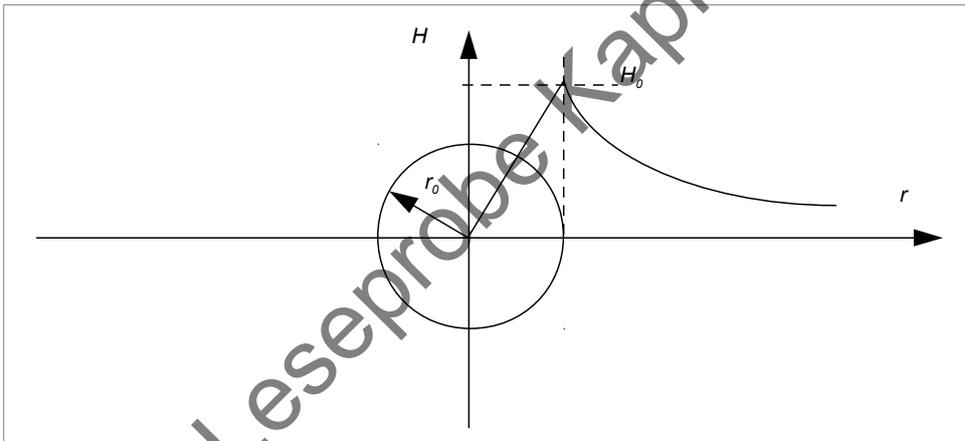


Abbildung 79: Magnetfeld eines zylindrischen Leiters, der vom Strom I durchflossen wird

Aus dem Durchflutungsgesetz folgt für die magnetische Feldstärke:

$$H(r) = H_\varphi(r) = \frac{I}{2\pi \cdot r_0^2} \cdot r \quad \text{für } 0 \leq r \leq r_0$$

$$H(r) = H_\varphi(r) = \frac{I}{2\pi \cdot r} \quad \text{für } r > r_0 \quad (2.201)$$

Die sogenannte „innere Induktivität“ kann über die Energie des Magnetfeldes im Leiter berechnet werden. Es gilt:

$$W = \frac{1}{2} L_i \cdot I^2 = \frac{1}{2} \int_V H \cdot B \cdot dV = \frac{1}{2} \left( \frac{\mu_0 \cdot I^2}{4 \pi^2 \cdot r_0^4} \right) \cdot \int_0^2 \pi \int_0^{r_0} r^2 \cdot r \cdot d\varphi \cdot I \cdot dr \quad (2.202)$$

$$= \frac{\mu_0 \cdot I}{16 \cdot \pi} \cdot I^2$$

d. h. die innere Induktivität ist:

$$L_i = \frac{\mu_0 \cdot l}{8 \cdot \pi} \quad (2.203)$$

**Betriebsinduktivität eines Dreileitersystems**

Herleitung

Betrachtet wird ein System mit drei Leitern und einem Referenzleiter (0-0') gemäß Abbildung 80. Der Leiterradius sei  $r_0$ . Der Abstand  $d$  jedes Leiters zum Referenzleiter sei sehr groß.

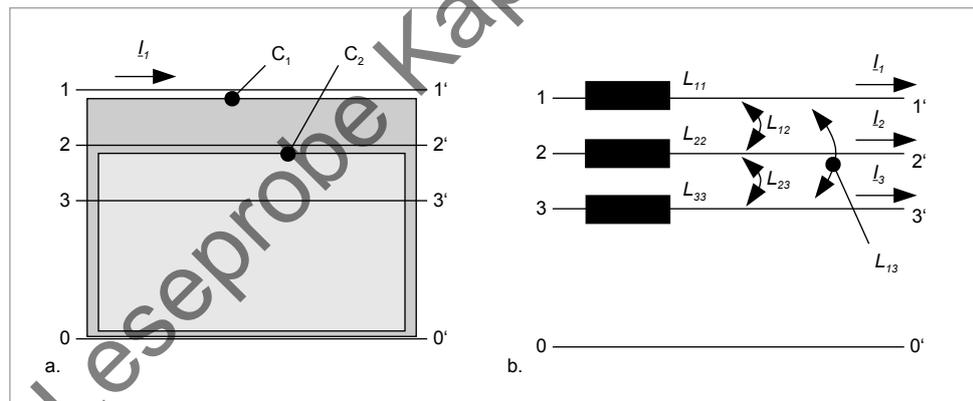


Abbildung 80: Herleitung der Induktivitäten eines Dreileitersystems

- a) Eigen- und Gegeninduktivität zweier Leiterschleifen, die durch das Magnetfeld des Stromes  $I_1$  gekoppelt sind
- b) Netzwerk aus Eigen- und Gegeninduktivitäten

Für den Fluss, den der Strom  $I_1$  in einer gedachten Leiterschleife  $C_1$  erzeugt, gilt:

$$\Phi = \mu_0 I \cdot \int_{r_0}^d H_1(r) dr = \mu_0 I \cdot \int_{r_0}^d \frac{I_1}{2 \pi \cdot r} dr = L_1 \cdot \frac{\mu_0 I}{2 \pi} \ln \left( \frac{d}{r_0} \right) = L_a \cdot I_1 \quad (2.204)$$

Die sogenannte „äußere Induktivität“ ist demnach:

$$L_a = \frac{\mu_0 I}{2 \pi} \ln \left( \frac{d}{r_0} \right) \quad (2.205)$$

Daraus kann, zusammen mit der inneren Induktivität eines Leiters, gemäß 2.203 die Eigeninduktivität des Leiters 1 berechnet werden. Aufgrund der identischen Abmessungen sind die Eigeninduktivitäten der drei Leiter identisch, d. h. es ist:

$$L_{11} = L_{22} = L_{33} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \left( \frac{d}{r_0} \right) + \frac{1}{4} \right) \quad (2.206)$$

Die Gegeninduktivität (oder auch Koppelinduktivität) ergibt sich aus dem Fluss  $\Phi_{21}$ , den der Strom  $I_1$  in der gedachten Leiterschleife  $C_2$  aus dem Leiter 2 und dem Referenzleiter erzeugt.

$$\Phi_{21} = \mu_0 I_1 \cdot \int_{D_{12}}^d \frac{I_1}{2\pi \cdot r} dr = I_1 \cdot \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \left( \frac{d}{D_{12}} \right) = L_{21} \cdot I_1 \quad (2.207)$$

Daraus ergibt sich die Gegeninduktivität zwischen den Leitern 1 und 2 und analog auch für die anderen Koppelinduktivitäten:

$$\begin{aligned} L_{21} &= L_{12} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \left( \frac{d}{D_{12}} \right) \\ L_{31} &= L_{13} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \left( \frac{d}{D_{13}} \right) \\ L_{31} &= L_{13} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \left( \frac{d}{D_{13}} \right) \end{aligned} \quad (2.208)$$

Darin sind  $D_{12}$ ,  $D_{13}$  und  $D_{23}$  die Abstände der einzelnen Leiter zueinander.

Damit ergibt sich eine Schaltung des Dreileitersystems gemäß Abbildung 80b. Der Spannungsabfall längs der einzelnen Leiter ist:

$$\begin{aligned} \Delta \underline{U}_1 &= j\omega L_{11} \cdot I_1 + j\omega L_{12} \cdot I_2 + j\omega L_{13} \cdot I_3 \\ \Delta \underline{U}_2 &= j\omega L_{12} \cdot I_1 + j\omega L_{22} \cdot I_2 + j\omega L_{23} \cdot I_3 \\ \Delta \underline{U}_3 &= j\omega L_{13} \cdot I_1 + j\omega L_{23} \cdot I_2 + j\omega L_{33} \cdot I_3 \end{aligned} \quad (2.209)$$

Das Dreileitersystem sei symmetrisch aufgebaut, d. h. die Leiter sind auf den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks angeordnet. Dann sind wegen  $D_{12} = D_{13} = D_{23} = D$  sämtliche Koppelinduktivitäten identisch, d. h.:

$$\begin{aligned} L_{ij} &= L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \left( \frac{d}{D} \right) \quad \text{für } i \neq j \\ L_{ij} &= L_0 = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \left( \frac{d}{r_0} \right) + \frac{1}{4} \right) \quad \text{für } i = j \end{aligned} \quad (2.210)$$

Damit und mit der Gleichung für ein symmetrisches Drehstromsystem vereinfacht sich (2.209) deutlich:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (2.211)$$

Das System ist entkoppelt, d. h. der Spannungsabfall längs des Leiters  $i$  hängt nur vom Strom  $I_i$  ab:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \end{bmatrix} = i\omega \cdot (L_0 - L) \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = j\omega \cdot L_B \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix}$$

Entkoppeltes System

mit: (2.212)

$$L_B = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left( \ln \left( \frac{D}{r_0} \right) + \frac{1}{4} \right)$$

Korona

Bei hohen Spannungen entstehen Korona-Entladungen durch die hohe elektrische Feldstärke an der Oberfläche der Leiterseile. Diese Korona-Entladungen erzeugen Lärm und zusätzliche Verluste, die bei großen Leitungslängen beträchtlich sein können. Man vergrößert daher die effektive Oberfläche durch Bündelleiter. Bündelleiter haben im Vergleich zu einem massiven Leiterseil mit der gleichen effektiven Oberfläche den Vorteil des weit geringeren Gewichtes.

Bündelleiter

Bei Bündelleiteranordnungen mit  $n$  Teilleitern auf einem Kreis mit dem Radius  $r_T$  gemäß Abbildung 81 angeordnet ist die Betriebsinduktivität  $L_B$

$$L_B = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left( \ln \left( \frac{D}{r_B} \right) + \frac{1}{4n} \right) \quad (2.213)$$

$$\text{mit: } r_B = \sqrt[n]{n \cdot r_0 \cdot r_T^{n-1}} \quad \text{und} \quad D = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}}$$

d. h. bei etwas unsymmetrischen Leiteranordnungen wird mit einem „mittleren“ Leiterabstand  $D$  gerechnet.

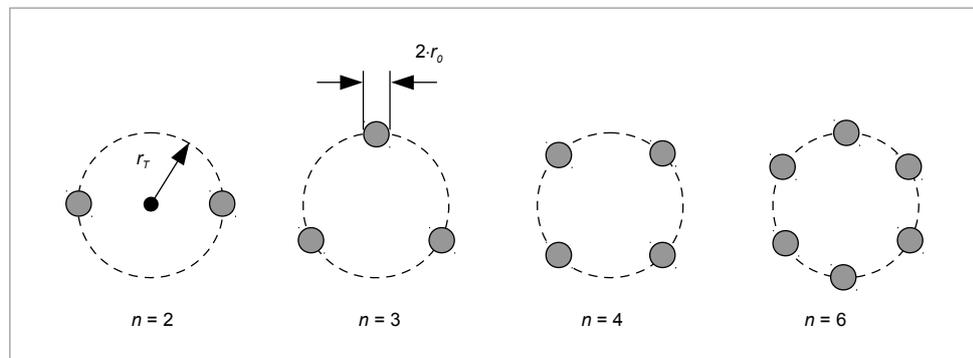


Abbildung 81: Geometrie von Bündelleiteranordnungen

## Kapazität

Die allgemeine Definition des Potentials ist:

$$\varphi = \varphi_B - \int_{r_B}^r E \cdot ds \quad (2.214)$$

Dabei ist  $\varphi_B$  das Bezugspotential am Punkt  $r_B$ . Es wird nun ein Leiter mit dem Radius  $r_0$  der Ladung  $Q$  und der Länge  $l$  betrachtet (Abb. 82).

Kapazität

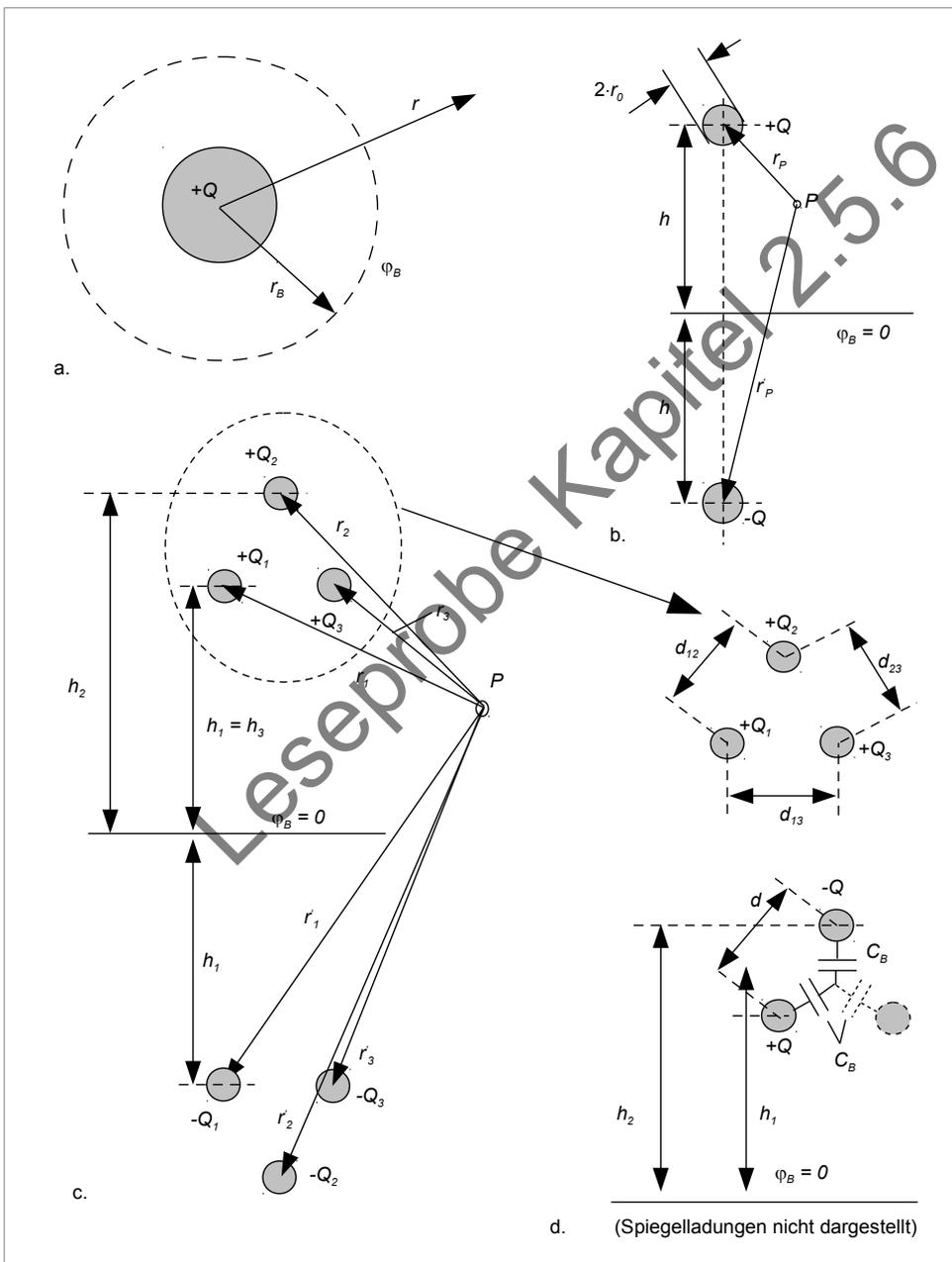


Abbildung 82: Herleitung der Kapazitäten eines Dreileitersystems

- Leitung mit der Ladung  $Q$  und der Länge  $l$
- Spiegelungsmethode
- Dreileiteranordnung (symmetrisch gezeichnet) mit Spiegel Ladungen
- Herleitung der Koppelkapazität zwischen zwei Leitern

Aus Symmetriegründen ist:

$$Q = \oint_A D \cdot dA = \epsilon_0 \cdot \oint_A E \cdot dA = 2\pi\epsilon_0 r \cdot l \cdot E_r \quad (2.215)$$

$E_r$  ist die elektrische Feldstärke in radialer Richtung. Aus (2.214) wird:

$$\varphi = \varphi_B - \int_{r_B}^r E \cdot ds = \varphi_B - \int_{r_B}^r \frac{Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} dr = \varphi_B + \frac{Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{r_B}{r}\right) \quad (2.216)$$

#### Berechnungsmethode

Das Bezugspotential  $\varphi_B$  am Ort  $r_B$  ist frei wählbar, z. B. kann man  $\varphi_B = 0$  setzen. Durch die Anwendung der Spiegelungsmethode wird die Erdoberfläche zur Symmetrieebene (Abb. 82b). Das Potential an einem bestimmten Punkt P berechnet sich zu:

$$\varphi(P) = \frac{+Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{r_B}{r_P}\right) + \frac{-Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{r_B}{r_P}\right) = \frac{Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{r_B}{r_P}\right) \quad (2.217)$$

An der Oberfläche des Leiters 1 gilt mit  $r_p = r_0$  und  $r_p = 2 \cdot h$

$$\varphi_1 = \frac{Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{r_0}\right) \quad (2.218)$$

Für das Dreileitersystem (Abbildung 82c) gilt für die Potentiale  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  und  $\varphi_3$  an der Oberfläche der drei Leiter:

$$\varphi_1 = \frac{Q_1/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h_1}{r_0}\right) + \frac{Q_2/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{d'_{12}}{d_{12}}\right) + \frac{Q_3/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{d'_{13}}{d_{13}}\right) \quad (2.219)$$

#### Spiegelungsmethode

$$\varphi_2 = \frac{Q_1/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{d'_{21}}{d_{21}}\right) + \frac{Q_2/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h_2}{r_0}\right) + \frac{Q_3/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{d'_{23}}{d_{23}}\right)$$

$$\varphi_3 = \frac{Q_1/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{d'_{31}}{d_{31}}\right) + \frac{Q_2/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{d'_{32}}{d_{32}}\right) + \frac{Q_3/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h_3}{r_0}\right)$$

Darin sind:

$d'_{ik}$ : Abstand des Leiters i vom Spiegelbild des Leiters k

$d_{ik}$ : Abstand des Leiters i vom Leiter k

Die Leiter sollen symmetrisch sein, d. h. die Leiter sind auf den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks angeordnet. Der Abstand  $d$  der Leiter zueinander ist klein gegenüber dem Abstand  $h$  von den drei Leitern zur Erde. Außerdem seien die Ladungen auf den drei Leitungen identisch:

$$D = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{31}}$$

$$h = \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3} \quad (2.220)$$

$$d'_{ik} = 2 \cdot h \quad \text{für } i \neq k$$

und  $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q$

Damit gilt für die Potentiale  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  und  $\varphi_3$  der drei Leitungen:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \frac{Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left( \ln\left(\frac{2 \cdot h}{r_0}\right) + \ln\left(\frac{2 \cdot h}{D}\right) + \ln\left(\frac{2 \cdot h}{D}\right) \right) \quad (2.221)$$

$$= \frac{Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left( \ln\left(\frac{2 \cdot h}{r_0}\right) + 2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{D}\right) \right)$$

Die Erdkapazität der einzelnen Leiter eines Dreileitersystems ohne Erdseil ist damit:

$$C_E = \frac{Q}{\varphi = \varphi_B} = \frac{Q}{\varphi} = \frac{2\pi\epsilon_0 \cdot l}{\ln\left(\frac{2 \cdot h}{r_0}\right) + 2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{D}\right)} = \frac{2\pi\epsilon_0 \cdot l}{3 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{\sqrt[3]{r_0 \cdot D^2}}\right)} \quad (2.222)$$

Erdkapazität

Die Koppelkapazität  $C_k$  zwischen zwei Leitern kann mit Hilfe der Anordnung gemäß Abbildung 81d berechnet werden. Die sogenannte Betriebskapazität  $C_b$  ist das Doppelte der Koppelkapazität  $C_k$ . Der Leiter 3 hat aufgrund der Symmetrie auf Leiter 1 und Leiter 2 dieselbe Auswirkung und kann deshalb für die folgende Betrachtung weggelassen werden.

Für die Potentiale  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  an den Oberflächen der beiden Leiter gilt:

$$\varphi_1 = \frac{Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left( \ln\left(\frac{2 \cdot h}{r_0}\right) - \ln\left(\frac{2 \cdot h}{D}\right) \right) \quad (2.223)$$

$$\varphi_2 = \frac{Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left( \ln\left(\frac{2 \cdot h}{D}\right) - \ln\left(\frac{2 \cdot h}{r_0}\right) \right)$$

Die Koppelkapazität  $C_k$  zwischen den Leitern berechnet sich daraus gemäß:

$$C_k = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{2\pi\epsilon_0 \cdot l}{2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{r_0}\right) - 2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{D}\right)} = \frac{2\pi\epsilon_0 \cdot l}{2 \cdot \ln\left(\frac{D}{r_0}\right)} \quad (2.224)$$

Koppelkapazität

Die Betriebskapazität  $C_B$  ist damit:

$$C_B = 2 \cdot C_k = \frac{2 \pi \epsilon_0 \cdot l}{\ln\left(\frac{D}{r_0}\right)} \quad (2.225)$$

### Ableitbelag

#### Querverluste

Ursache der Querverluste bei Freileitungen sind Korona-Entladung und Leckströme an den Isolatoren. Beides ist stark witterungsabhängig und bei Regen deutlich stärker ausgeprägt. Bei Kabeln sind Leitfähigkeits- und Polarisationsverluste des Dielektrikums Ursache für die Ableitverluste. Für Netzberechnungen kann dennoch der Ableitbelag  $G'$  üblicherweise gegenüber dem Leitwert  $\omega C'_B$  durch die Betriebskapazität vernachlässigt werden. Dies gilt sowohl für Kabel als auch für Freileitungen, d. h.:

$$G_B \approx 0 \quad (2.226)$$

### Betriebsgrößen ausgeführter Leitungen

Nenn- spg.	Art der Leitung	Leiter	$R'_B$ $\Omega/\text{km}$	$X'_B$ $\Omega/\text{km}$	$C'_B$ $\text{nF}/\text{km}$	$I'_{gr}$ $\text{A}$
10kV	Dreileitergürtel- kabel	3 x 120 mm <sup>2</sup> Cu	0,181	0,094	480	290
20kV	Dreimantelkabel	3 x 150 mm <sup>2</sup> Cu	0,158	0,116	440	325
20kV	Freileitung	95 Al	0,310	0,360	10	340
30kV	Freileitung	95/12 Al/St	0,320	0,370	10	350
110kV	Freileitung	240/40 Al/St	0,120	0,390	9	645
220kV	Freileitung	2er-Bündel 380/50 Al/St	0,060	0,300	12	1290
		3er-Bündel 380/50 Al/St	0,025	0,260	14	2520
380kV	Freileitung	4er-Bündel 240/40 Al/St	0,030	0,260	14	2580

$I'_{gr}$ : Grenzstrom (dauernd) bei zulässiger Erwärmung der Leiter

Tabelle 7: Betriebsgrößen für einige Beispiele ausgeführter Leitungen

## Literaturverzeichnis

Doemeland, W. (2010): Handbuch Schutztechnik: Grundlagen, Schutzsysteme, Inbetriebsetzung, VDE Verlag, 9. Auflage.

Entso-e (2011): [www.entsoe.eu](http://www.entsoe.eu). [Online],  
Available at: [www.entsoe.eu](http://www.entsoe.eu) [Zugriff am 02.02.2011].

Feser, K. (2000): Elektrische Energienetze 2. Stuttgart: Universität Stuttgart.

Fischer, R. (2011): Elektrische Maschinen, Carl Hanser Verlag, 15. Auflage.

Gremmel, H. (1992): ABB Schaltanlagen Handbuch, Cornelsen Lehrbuch, 10. Auflage.

Gremmel, H., Kopatsch, G. (2007): Schaltanlagen Handbuch, Cornelsen Verlag, 11. Auflage.

Herold, G. (2005): Elektrische Energieversorgung I: Drehstromsysteme, Leistungen, Wirtschaftlichkeit, Schlembach Fachverlag, 2. Auflage.

Herold, G. (2008): Elektrische Energieversorgung II: Parameter elektrischer Stromkreise, Freileitungen und Kabel, Transformatoren, Schlembach Fachverlag, 2. Auflage.

Herold, G. (2008): Elektrische Energieversorgung III: Drehstrommaschinen, Sternpunktbehandlung, Kurzschlussströme, Schlembach Fachverlag, 2. Auflage.

Herold, G. (2003): Elektrische Energieversorgung IV: Ein- und Ausschaltvorgänge, Überspannungen, Grundprinzipien des Selektivschutzes, Schlembach Fachverlag, 1. Auflage.

Herold, G. (2009): Elektrische Energieversorgung V: Stromrichter in Drehstromnetzen, Schlembach Fachverlag, 1. Auflage.

Heuck, D. S. (2010): Elektrische Energieversorgung. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, Springer Fachmedien GmbH.

Heuck, K. (2012): Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis, Vieweg + Teubner Verlag, 8. Auflage.

Hinrichsen, V. (2011): Metalloxid-Ableiter in Hochspannungsnetzen, Siemens AG, Power Transmission Division,  
Download über [www.siemens.com/energy/arrester](http://www.siemens.com/energy/arrester), 3. Auflage.

Hoffmann, R., Bergmann, A. (2009): Betrieb von elektrischen Anlagen, VDE Verlag, 10. Auflage.

- Karsai, K., Kerény, D., Kiss, L. (1987): Large Power Transformers, Elsevier.
- Kießling, F., Nefzger, P., Kaintzyk U. (2001): Freileitungen: Planung, Berechnung, Ausführung, Springer Verlag, 5. Auflage.
- Krämer, A. (2000): On-Load Tap Changers for Power Transformers, Operation Principles, Applications and Selection, Maschinenfabrik Rheinhausen Publication, 1. Auflage.
- Küpfmüller, K., Mathis, W., Reibinger, A. (2008): Theoretische Elektrotechnik: Eine Einführung, Springer Verlag, 18. Auflage.
- Lehner, G. (2010): Elektromagnetische Feldtheorie für Ingenieure und Physiker, Springer Verlag, 7. Auflage.
- Leibfried, T. (2012): Elektrische Anlagen- und Systemtechnik. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.
- Oechsle, F. (2010): Energietechnik. Stuttgart: Duale Hochschule BW.
- Oeding, D. Oswald, B. R. (2011): Elektrische Kraftwerke und Netze, Springer Verlag, 7. Auflage.
- Oswald, B. R. (2009): Berechnung von Drehstromnetzen: Berechnung stationärer und nichtstationärer Vorgänge mit Symmetrischen Komponenten und Raumzeigern, Vieweg + Teubner, 2009 Auflage.
- Rehtanz, C. (2009): Einführung in die elektrische Energietechnik. Dortmund: TU Dortmund.
- Roeper, R. (1984): Kurzschlußströme in Drehstromnetzen: zeitl. Verlauf und Berechnung der Größen, Siemens Aktiengesellschaft, 6. Auflage.
- Slamecka, E., Waterschek, W. (1992): Schaltvorgänge in Hoch- und Niederspannungsnetzen: Berechnungsgrundlagen, Publics Corporate Publishing.
- Speck, D. (2013): Netzführung. Esslingen: Hochschule Esslingen.
- Ungrad, H., Winkler, W., Wiszniewski, A. (1994): Schutztechnik in Elektroenergiesystemen: Grundlagen, Stand der Technik, Neuentwicklungen, Springer Verlag, 2. Auflage.
- Unbehauen, R. (1999): Grundlagen der Elektrotechnik 1: Allgemeine Grundlagen, Lineare Netzwerke, Stationäres Verhalten, Springer Verlag, 5. Auflage.
- Unbehauen, R. (2000): Grundlagen der Elektrotechnik 2: Nichtlineare Netzwerke, Theoretische Erweiterungen, Springer Verlag, 5. Auflage.
- VDE, 2011. VDE-AR-N 4400:2011-09 - Messwesen Strom (Metering Code). Berlin: VDE.

VDE-AR-N 4001 (2011): Anforderungen an die Qualifikation und die Organisation von Unternehmen für den Betrieb von Elektrizitätsversorgungsnetzen (S1000), VDE Verlag.

VDE-AR-N 4201 (2010): Netzdokumentation, VDE Verlag.

VDE FNN (2012): Technische Anforderungen an die automatische Frequenzentlastung, Bismarckstr. 33, 10625 Berlin: Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN).

VDE 0101-1 (2011): Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV, VDE Verlag.

VDE 0101-2 (2011): Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV, VDE Verlag.

Ziegler, G. (2008): Digitaler Distanzschutz, Publics Publishing, 2. Auflage

Leseprobe Kapitel 2.5.6