

Kontaktstudium Elektrische Energieübertragung

Leseprobe: Elektrische Betriebsmittel



Die Angebote der wissenschaftlichen Weiterbildung werden im Rahmen von KIC InnoEnergy entwickelt,
gefördert vom European Institute of Innovation & Technology (eit).

Autor

Prof. Dr.-Ing. Michael Schäfer

Nach einer Berufsausbildung zum Informationselektroniker und dem Studium der Elektrotechnik promovierte er 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 —

Impressum

Leseprobe: Elektrische Betriebsmittel

© Karlsruher Institut für Technologie – Fernstudienzentrum , alle Rechte vorbehalten

Karl-Friedrich-Str. 17 ▪ 76133 Karlsruhe ▪ Tel. 0721/608-48200, Fax 608-48210

1. Auflage 2014 (20140211)

Satz und fernstudiendidaktische Überarbeitung: Team des FSZ

Inhaltsverzeichnis

	Autor	2
	Abbildungsverzeichnis	3
	Tabellen	4
1	Elektrische Betriebsmittel	5
1.1	Leitungsparameter von Freileitungen und Kabeln	5
	Stichwortverzeichnis	16

- Leseprobe -

- Leseprobe -

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Wirbelstromeffekte/Stromverdrängungseffekte.....	7
Abb. 2:	Magnetfeld eines zylindrischen Leiters, der vom Strom I durchflossen wird.....	8
Abb. 3:	Herleitung der Induktivitäten eines Dreileitersystems.....	9
Abb. 4:	Geometrie von Bündelleiteranordnungen.....	11
Abb. 5:	Herleiten der Kapazitäten eines Dreileitersystems.....	12

- Leseprobe -

Tabellen

Tab. 1: Betriebsgrößen für einige Beispiele ausgeführter Leitungen.....15

- Leseprobe -

1 Elektrische Betriebsmittel

1.1 Leitungsparameter von Freileitungen und Kabeln

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.

Berechnung

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:

$$R = \frac{R}{l} = \frac{1}{\kappa_{\text{eff}} \cdot A} = \frac{1}{0,98 \cdot \kappa_{\text{Material}} \cdot A}$$

(1.1)

Widerstand

A : Querschnitt des Leiterseils
 l : Länge des Leiterseils
 κ_{Material} : Leitfähigkeit des Leitermaterials

Weiterhin ist die Leitfähigkeit κ_{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) (1.2)

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

ϑ_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°C gelten:

$$\begin{aligned} R' &= \frac{R}{l} = \frac{1}{54 \cdot A} \quad \text{für Kupfer} \\ R' &= \frac{R}{l} = \frac{1}{34 \cdot A} \quad \text{für Aluminium} \\ R' &= \frac{R}{l} = \frac{1}{31 \cdot A} \quad \text{für Alurey (Aluminiumlegierung)} \end{aligned} \quad (1.3)$$

mit A in mm^2 und R' in 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. Fehler: Referenz nicht gefunden, R_0 bezeichnet den Gleichstromwiderstand des Leiters und r_0 ist der Leiterradius).

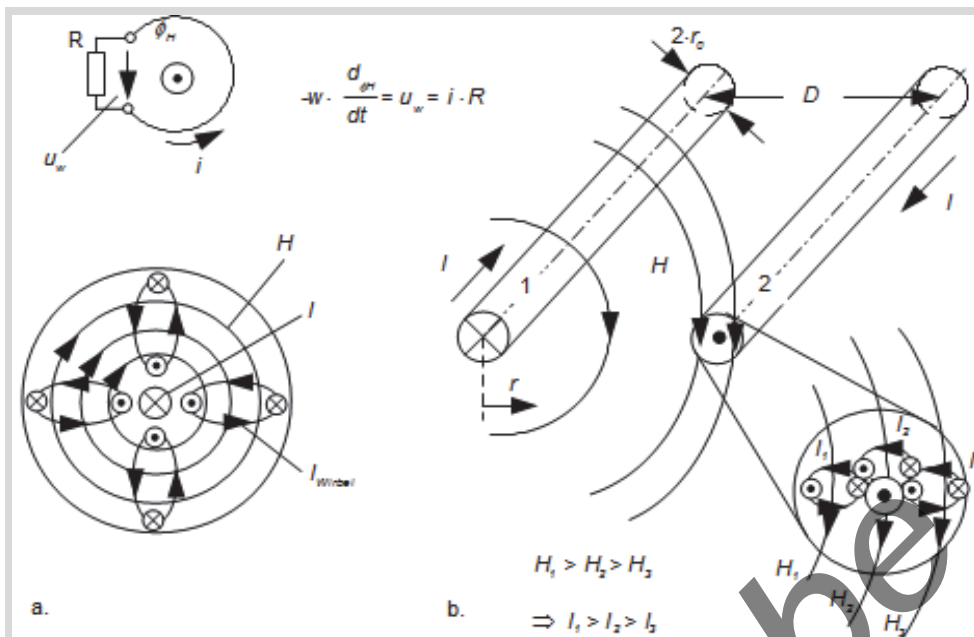


Abbildung 1: Wirbelstromeffekte/Stromverdrängungseffekte.

a) Skineffekt: außen wird I durch I_{wirbel} innen abgeschwächt.

b) Proximityeffekt: unterschiedlich starkes Magnetfeld über dem Leiterquerschnitt.

■ 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:

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

$$\frac{R_{skin}}{R_0} = \frac{r_0}{2 \cdot \delta} + \frac{1}{4} + \frac{3}{32} \cdot \frac{\delta}{r_0} \quad \text{für } r_0 > 2\delta \quad (1.4)$$

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

Induktivität

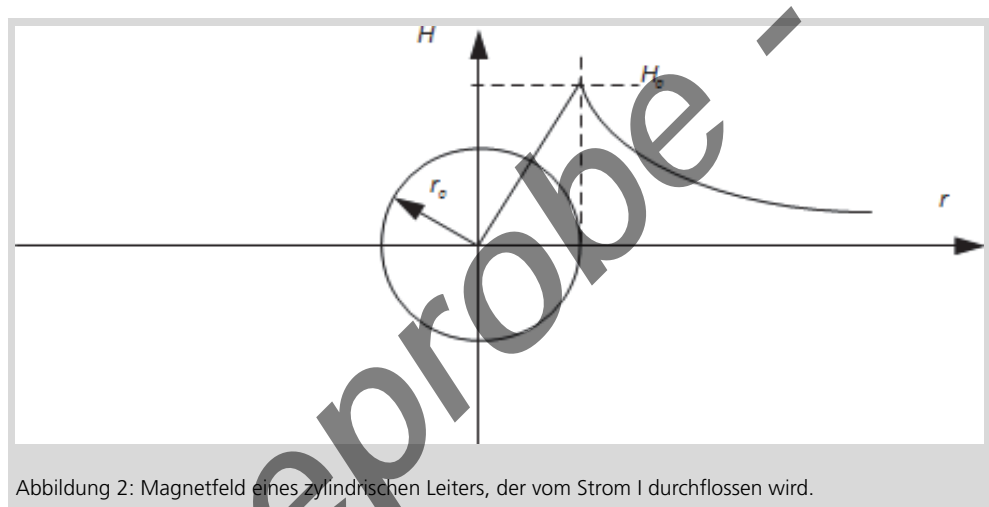


Abbildung 2: Magnetfeld eines zylindrischen Leiters, der vom Strom I durchflossen wird.

Grundlagen

Die innere Induktivität eines Leiters ist in Abbildung Fehler: Referenz nicht gefunden dargestellt. Es zeigt den Verlauf des magnetischen Feldes innerhalb und außerhalb eines zylindrischen, stromdurchflossenen Leiters.

Aus dem Durchflutungsgesetz folgt für die magnetische Feldstärke:

$$H(r) = H_\varphi(r) = \frac{I}{2\pi \cdot r_0^2} \cdot r \quad \text{für } 0 \leq r \leq r_0 \quad (1.5)$$

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

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

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} L_i \cdot I^2 = \frac{1}{2} \int_V H \cdot B \cdot dV = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_0 \cdot I^2}{4\pi^2 \cdot r_0^4} \right) \cdot \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} \int_0^l r^2 \cdot r \cdot d\varphi \cdot l \cdot dr \\ &= \frac{\mu_0}{16 \cdot \pi} \cdot I^2 \end{aligned} \quad (1.6)$$

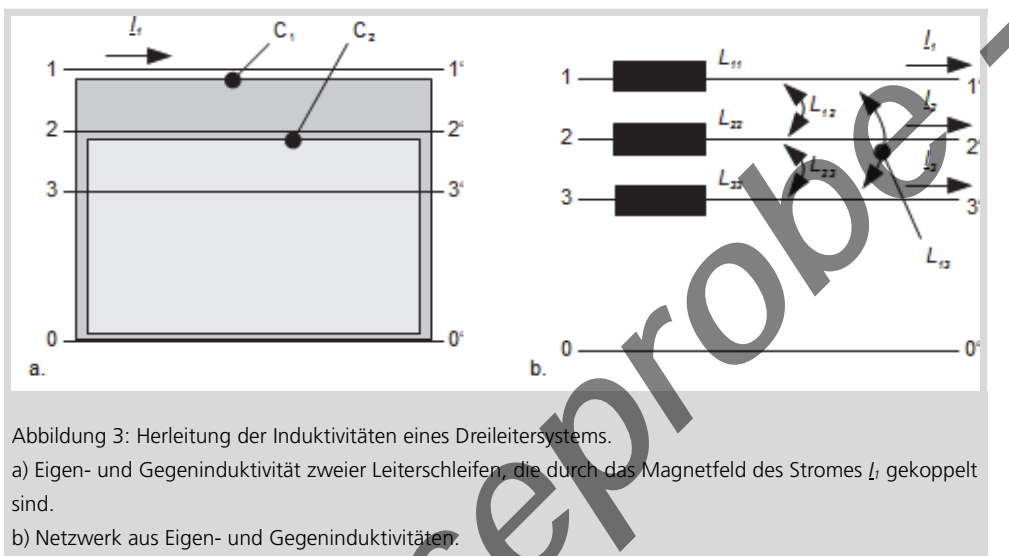
d. h. die innere Induktivität ist:

$$L_i = \frac{\mu_0 \cdot l}{8 \cdot \pi} \quad (1.7)$$

Betriebsinduktivität eines Dreileitersystems

Betrachtet wird ein System mit drei Leitern und einem Referenzleiter (0-0') gemäß Abb. Fehler: Referenz nicht gefunden. Der Leiterradius sei r_0 . Der Abstand d jedes Leiters zum Referenzleiter sei sehr groß.

Herleitung



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

$$\Phi = \mu_0 I_1 \int_{r_0}^d H_1(r) dr = \mu_0 I_1 \int_{r_0}^d \frac{I_1}{2\pi \cdot r} dr = I_1 \cdot \frac{\mu_0 I_1}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{r_0}\right) = L_a \cdot I_1 \quad (1.8)$$

Die sogenannte „äußere Induktivität“ ist demnach:

$$L_a = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{r_0}\right) \quad (1.9)$$

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

$$L_{11} = L_{22} = L_{33} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi} \left(\ln\left(\frac{d}{r_0}\right) + \frac{1}{4} \right) \quad (1.10)$$

Die Gegeninduktivität (oder auch Koppelinduktivität) ergibt sich aus dem Fluss Φ_{21} , den der Strom I_2 in der gedachten Leiterschleife C_2 aus dem Leiter 2 und dem Referenzleiter erzeugt.

$$\Phi_{21} = \mu_0 I_2 \cdot \int_{D_{12}}^d \frac{I_1}{2\pi \cdot r} dr = I_1 \cdot \frac{\mu_0 I_2}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{D_{12}}\right) = L_{21} \cdot I_2 \quad (1.11)$$

Magnetische Kopplungen

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

$$\begin{aligned} L_{21} &= L_{12} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{D_{12}}\right) \\ L_{31} &= L_{13} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{D_{13}}\right) \\ L_{32} &= L_{23} = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{D_{23}}\right) \end{aligned} \quad (1.12)$$

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

Damit ergibt sich eine Schaltung des Dreileitersystems gemäß Abb. Fehler: Referenz nicht gefunden. Der Spannungsabfall längs der einzelnen Leiter ist:

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= j\omega L_{11} \cdot I_1 + j\omega L_{12} \cdot I_2 + j\omega L_{13} \cdot I_3 \\ \Delta U_2 &= j\omega L_{12} \cdot I_1 + j\omega L_{22} \cdot I_2 + j\omega L_{23} \cdot I_3 \\ \Delta U_3 &= j\omega L_{13} \cdot I_1 + j\omega L_{23} \cdot I_2 + j\omega L_{33} \cdot I_3 \end{aligned} \quad (1.13)$$

Spannungsabfall

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.:

$$\begin{aligned} L_{ij} &= L = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{D}\right) \quad \text{für } i \neq j \\ L_{ii} &= L_0 = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\ln\left(\frac{d}{r_0}\right) + \frac{1}{4} \right) \quad \text{für } i = j \end{aligned} \quad (1.14)$$

Damit und mit der Gleichung für ein symmetrisches Drehstromsystem vereinfacht sich (Fehler: Referenz nicht gefunden) deutlich.

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (1.15)$$

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

$$\begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \end{bmatrix} = i \omega \cdot (L_0 - L) \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = j \omega \cdot L_B \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

mit:

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

Entkoppeltes System

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.

Korona

Bei Bündelleiteranordnungen mit n Teilleitern auf einem Kreis mit dem Radius r_T gemäß Abbildung Fehler: Referenz nicht gefunden angeordnet ist die Betriebsinduktivität L_B

Bündelleiter

$$L_B = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{D}{r_B} \right) + \frac{1}{4n} \right) \quad (1.17)$$

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

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

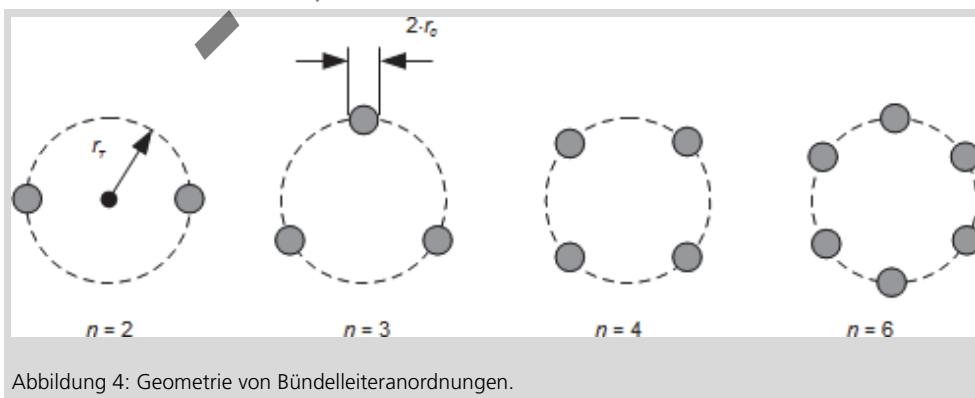


Abbildung 4: Geometrie von Bündelleiteranordnungen.

Kapazität

Die allgemeine Definition des Potentials ist:

$$\varphi = \varphi_B - \int_{r_B}^r E \cdot ds \quad (1.18)$$

Kapazität

Dabei ist φ_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 (Abbildung Fehler: Referenz nicht gefunden).

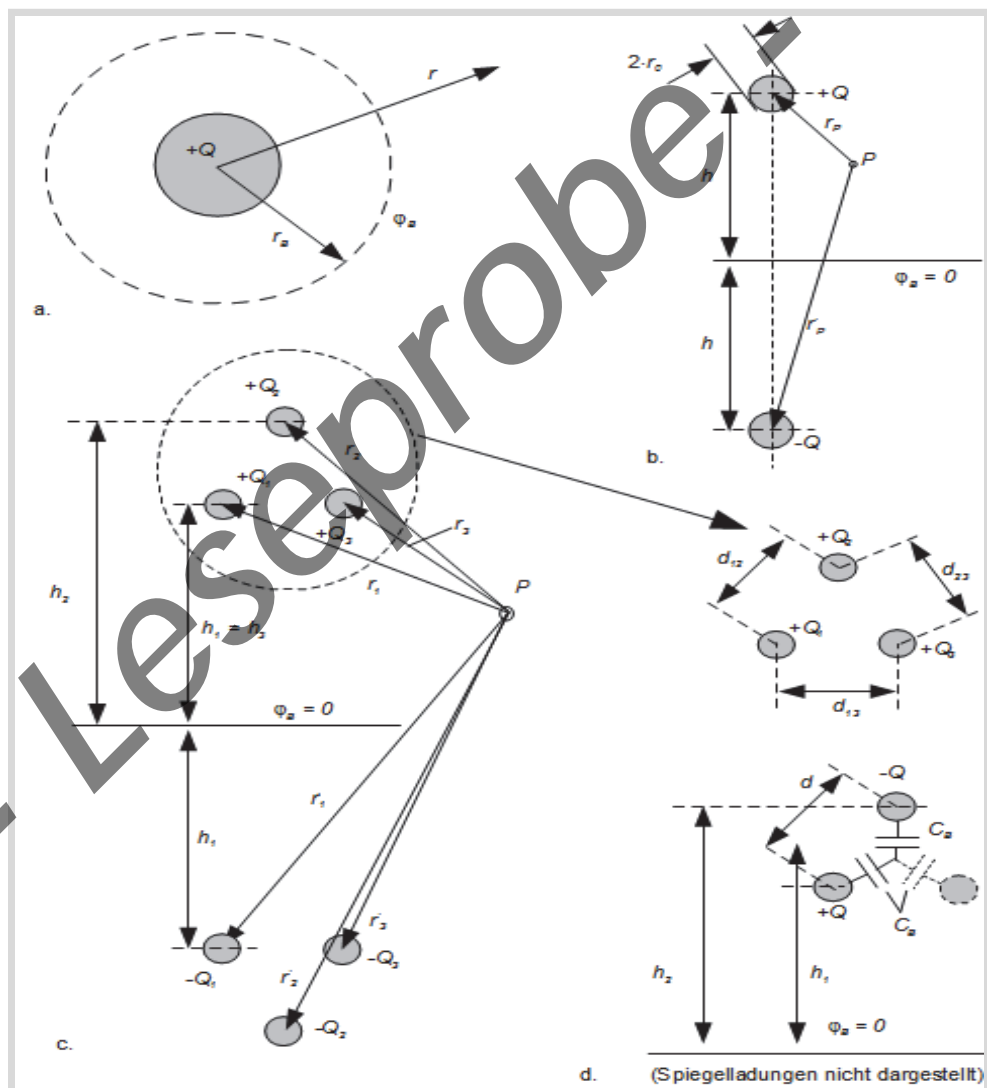


Abbildung 5: Herleitung der Kapazitäten eines Dreileitersystems.

- Leitung mit der Ladung Q und der Länge l .
- Spiegelungsmethode.
- Dreileiteranordnung (symmetrisch gezeichnet), mit Spiegelladungen.
- Herleitung der Koppelkapazität zwischen zwei Leitern.

Aus Symmetriegründen ist:

$$Q = \oint_A D \cdot dA = \epsilon_0 \cdot \oint_A E \cdot dA = 2\pi\epsilon_0 r \cdot l \cdot E_r \quad (1.19)$$

E_r ist die elektrische Feldstärke in radialer Richtung. Aus (Fehler: Referenz nicht gefunden) wird:

$$\varphi = \varphi_B - \int_{r_B}^r E \cdot ds = \varphi_B - \int_{r_B}^r \frac{Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} dr = \varphi_B + \frac{Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{r_B}{r}\right) \quad (1.20)$$

Das Bezugspotential φ_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. Fehler: Referenz nicht gefunden). Das Potential an einem bestimmten Punkt P berechnet sich zu:

Berechnungsmethode

$$\varphi(P) = \frac{+Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{r_B}{r_P}\right) + \frac{-Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{r_B}{r_P}\right) = \frac{Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{r_B}{r_P}\right) \quad (1.21)$$

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

$$\varphi_1 = \frac{Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{r_0}\right) \quad (1.22)$$

Für das Dreileitersystem (Abbildung Fehler: Referenz nicht gefunden) gilt für die Potentiale φ_1, φ_2 und φ_3 an der Oberfläche der drei Leiter:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{Q_1/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h_1}{r_0}\right) + \frac{Q_2/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{d'_{12}}{d_{12}}\right) + \frac{Q_3/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{d'_{13}}{d_{13}}\right) \\ \varphi_2 &= \frac{Q_1/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{d'_{21}}{d_{21}}\right) + \frac{Q_2/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h_2}{r_0}\right) + \frac{Q_3/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{d'_{23}}{d_{23}}\right) \\ \varphi_3 &= \frac{Q_1/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{d'_{31}}{d_{31}}\right) + \frac{Q_2/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{d'_{32}}{d_{32}}\right) + \frac{Q_3/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h_3}{r_0}\right) \end{aligned} \quad (1.23)$$

Spiegelungsmethode

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:

$$\begin{aligned} D &= \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{31}} \\ h &= \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3} \\ d'_{ik} &= 2 \cdot h \quad \text{für } i \neq k \\ \text{und } Q_1 &= Q_2 = Q_3 = Q \end{aligned} \quad (1.24)$$

Damit gilt für die Potentiale φ_1 , φ_2 und φ_3 der drei Leitungen:

$$\begin{aligned} \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 &= \frac{Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left(\ln\left(\frac{2 \cdot h}{r_0}\right) + \ln\left(\frac{2 \cdot h}{D}\right) + \ln\left(\frac{2 \cdot h}{D}\right) \right) \\ &= \frac{Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left(\ln\left(\frac{2 \cdot h}{r_0}\right) + 2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{D}\right) \right) \end{aligned} \quad (1.25)$$

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

$$C_\epsilon = \frac{Q}{\varphi} = \frac{Q}{\varphi} = \frac{2\pi\epsilon_0 \cdot l}{\ln\left(\frac{2 \cdot h}{r_0}\right) + 2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{D}\right)} = \frac{2\pi\epsilon_0 \cdot l}{3 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{\sqrt[3]{r_0 \cdot D^2}}\right)} \quad (1.26)$$

Erdkapazität

Die Koppelkapazität C_k zwischen zwei Leitern kann mit Hilfe der Anordnung gemäß Abbildung Fehler: Referenz nicht gefundend 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 φ_1 und φ_2 an den Oberflächen der beiden Leiter gilt:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left(\ln\left(\frac{2 \cdot h}{r_0}\right) - \ln\left(\frac{2 \cdot h}{D}\right) \right) \\ \varphi_2 &= \frac{Q/l}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left(\ln\left(\frac{2 \cdot h}{D}\right) - \ln\left(\frac{2 \cdot h}{r_0}\right) \right) \end{aligned} \quad (1.27)$$

Die Koppelkapazität C_k zwischen den Leitern berechnet sich daraus gemäß:

$$C_k = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{2\pi\epsilon_0 \cdot l}{2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{r_0}\right) - 2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{D}\right)} = \frac{2\pi\epsilon_0 \cdot l}{2 \cdot \ln\left(\frac{D}{r_0}\right)} \quad (1.28)$$

Koppelkapazität

Die Betriebskapazität C_B ist damit:

$$C_B = 2 \cdot C_k = \frac{2\pi\epsilon_0 \cdot l}{\ln\left(\frac{D}{r_0}\right)} \quad (1.29)$$

Ableitbelag

Ursache der Querverluste bei Freileitungen sind Koronaentladungen 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 ωC_B durch die Betriebskapazität vernachlässigt werden. Dies gilt sowohl für Kabel als auch für Freileitungen, d. h.:

Querverluste

$$G_B \approx 0 \quad (1.30)$$

Betriebsgrößen ausgeführter Leitungen

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

I_{gr} : Grenzstrom (dauernd) bei zulässiger Erwärmung der Leiter

Tabelle 1: Betriebsgrößen für einige Beispiele ausgeführter Leitungen.

Stichwortverzeichnis

A	
Ableitverluste.....	15
Äußere Induktivität.....	9
B	
Bündelleiteranordnungen.....	11
D	
Durchflutungsgesetz.....	8
I	
Innere Induktivität.....	8
K	
Korona-Entladungen.....	11
L	
Leckströme.....	15
P	
Proximityeffekt.....	7
Q	
Querverluste.....	15
S	
Skineffekt.....	7

- Leseprobe -

- Leseprobe -