

Der Einfluss der Konstruktionsmerkmale von Freileitungen auf deren elektrischen Kenndaten

Autor(en): **Hager, H. / Tlapa, J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **67 (1976)**

Heft 6

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915138>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Der Einfluss der Konstruktionsmerkmale von Freileitungen auf deren elektrische Kenndaten

Von H. Hager und J. Tlapa

621.315.1 : 621.3.013.7

Nach einer kurzen Erklärung der Theorie der symmetrischen Komponenten wird auf die Berechnung der Mitimpedanz, Nullimpedanz und kapazitiven Queradmittanz im Mitsystem und im Nullsystem an Hand typischer Freileitungen des schweizerischen Hochspannungsnetzes eingegangen. Dann wird die Abhängigkeit dieser Leitungsparameter von den Konstruktionsmerkmalen der Leitungen, wie Bündelleiter, Anzahl und Querschnitt der Erdseile, Durchhang sowie von der Bodenleitfähigkeit untersucht. Kurvenblätter veranschaulichen die quantitativen Zusammenhänge.

Après une brève explication de la théorie des composantes symétriques, les auteurs traitent le calcul de l'impédance directe, de l'impédance homopolaire et de l'admittance transversale capacitive dans le système direct et dans le système homopolaire, en se basant sur des lignes aériennes typiques du réseau suisse à haute tension. Ils examinent ensuite la relation entre ces paramètres et les particularités de construction des lignes, telles que conducteurs en faisceaux, nombre et section des câbles de garde, flèche et conductivité du sol. Des diagrammes mettent en évidence les relations quantitatives.

1. Symmetrische Komponenten

Bei der Berechnung von Drehstromkreisen wird oft angenommen, dass das Spannungssystem überall symmetrisch ist und durch die einzelnen Phasen gleich grosse Ströme fließen. In Wirklichkeit sind aber die Drehstromnetze oft unsymmetrisch belastet, besonders durch die einphasigen Kleinverbraucher, durch Schweißtransformatoren und Elektroöfen in Industrieunternehmungen, sowie durch die ungleichmässige Verteilung der Beleuchtung. Unsymmetrische Spannungs- und Stromverteilungen entstehen aber auch bei Erdschlüssen oder bei zweiphasigem Betrieb der Drehstromnetze. Im weiteren ist auch die Anordnung der Leiter unter sich und gegen Erde unsymmetrisch. Diese Unsymmetrie wird bei vielen Elektrizitätsversorgungs-Unternehmen durch *Verdrillung* bekämpft. Dabei wird nach einer gewissen Länge (10...20 km) die Anordnung der Leiter am Mast gegenseitig vertauscht, so dass jede Phase alle drei möglichen Positionen am Mast einnimmt.

Die unsymmetrischen Belastungen verursachen im Netz ein unsymmetrisches Spannungs- und Stromsystem. Die direkte Berechnung des unsymmetrischen Systems ist sehr schwierig, weil die Phasen R, S, T miteinander gekoppelt sind. Deshalb muss man das unsymmetrische System mit Hilfe der Theorie der symmetrischen Komponenten in symmetrische Systeme transformieren, wobei bei symmetrischem Aufbau der Netzelemente die Kopplungen zwischen den Systemen verschwinden.

Das unsymmetrische Drehstromsystem der Ströme und Spannungen kann man daher in drei symmetrische Systeme zerlegen, von denen jedes für sich einphasig berechnet werden kann. Das *Mitsystem* ist ein symmetrisches Drehstromsystem mit Vektoren gleicher Grösse mit einer Phasenverschiebung von je $1 \times 120^\circ = 120^\circ$; die Phasenfolge ist im Uhrzeigersinn definiert. Das *Gegensystem* ist für Netze mit nicht rotierenden Elementen gleich dem Mitsystem; es unterscheidet sich nur in der Phasenverschiebung von $2 \times 120^\circ = 240^\circ$, welche daher eine Phasenfolge im Gegenuhrzeigersinn verursacht. Das *Nullsystem* ist ein symmetrisches Drehstromsystem mit drei Vektoren, die gegeneinander um $3 \times 120^\circ = 360^\circ$ verschoben sind, d. h. in ihrer Richtung und Grösse übereinstimmen.

Die Theorie der symmetrischen Komponenten kann einerseits im mathematischen Sinn als Transformation aufgefasst werden, andererseits haben die Komponentenwerte auch eine physikalische Bedeutung, weil man sie messen kann [1; 2¹⁾]. Die im folgenden definierten Leitungsparameter stellen bereits transformierte Grössen dar, welche getrennt für das Mit- und Nullsystem gelten.

2. Die Berechnung der Leitungsparameter

Die Leitungsparameter, die das elektrische Verhalten von Freileitungen charakterisieren, können durch Berechnung oder direkte Messung einer bestehenden Leitung bestimmt werden. Für die Nachrechnung von Betriebszuständen, d. h. für die Berechnung bestehender Netze ist die Benützung von gemessenen Grössen selbstverständlich vorteilhafter, weil diese der Wirklichkeit besser entsprechen und genauer sind. Der Planungsingenieur, welcher Unterlagen für den Ausbau von neuen Leitungen oder den Umbau von veralteten Leitungen zu liefern hat, muss sich die nötigen Leitungsparameter beschaffen, um sie für Netzberechnungen verschiedener Art (Lastfluss, Kurzschluss, Stabilität usw.) zu verwenden [3; 4].

Eine Freileitung kann als System einer Anzahl parallel laufender Leiter aufgefasst werden (Fig. 9). Das elektrische Verhalten dieser Anordnung wird allgemein durch die Längsimpedanz-Matrix \mathbf{Z} und die Queradmittanz-Matrix \mathbf{Y} beschrieben (Gl. 1 und Gl. 4 im Anhang 2). Die Elemente der Matrizen sind durch die Gl. (2), (3), (5) und (6) bestimmt.

Für die weitere Berechnung eliminiert man die Zeilen und Spalten der Matrizen, welche den Erdseilen oder geerdeten Phasenleitern entsprechen, durch Gaußsche Elimination (Annahme: ΔU und U dieser Leiter gleich Null). Die reduzierten Matrizen werden in symmetrische Komponenten transformiert (Anhang 3). In den transformierten Matrizen befinden sich die Längsimpedanzen bzw. Queradmittanzen im Mit-, Gegen- und Nullsystem in der Hauptdiagonalen, während die übrigen Glieder entweder definitionsgemäss zu Null werden oder aber den Grad der Unsymmetrie der Leitung anzeigen.

Das elektrische Verhalten der Freileitungen wird durch die Matrizen \mathbf{Z}_{TR} und \mathbf{Y}_{TR} charakterisiert. In der Hauptdiagonalen liegen die Längsimpedanzen $\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0$ und $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$ bzw. die Queradmittanzen $\underline{Y}_0 = G_0 + jB_0$ und $\underline{Y}_1 = G_1 + jB_1$ mit den üblichen Bezeichnungen R ohmscher Widerstand, X Reaktanz, G ohmsche Ableitung und B kapazitive Admittanz. Die Nebendiagonale der \mathbf{Z}_{TR} -Matrix enthält auch Kopplungsglieder zwischen parallel laufenden Leitungen im Nullsystem. Die Berechnung dieser Parameter erfolgt zweckmässigerweise nach den Formeln in diversen Handbüchern [z. B. 5; 6].

Die ohmsche Ableitung G_1 bzw. G_0 ist im allgemeinen sehr klein und wurde, wie in den meisten Fällen üblich, auch in dieser Untersuchung vernachlässigt.

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes

3. Die Einflussgrößen

Die Größe der Leitungsparameter ist von folgenden Merkmalen abhängig:

- Mastkonstruktion
- Material und Aufbau der Leiterseile
- Anzahl, Material und Aufbau der Erdseile
- Anzahl von parallel geführten Leitungssträngen
- Bodenleitfähigkeit entlang der Leitung

Aus der Mastkonstruktion erhält man die geometrische Anordnung der Phasenleiter und Erdseile, womit die Distanz der Leiter untereinander für jedes System festgelegt ist (Fig. 1). Leiterseile und Erdseile sind in der Berechnung durch ihren Durchmesser, ihren Seilaufbau und ihr Material definiert. Die Größe der Bodenleitfähigkeit ist abhängig vom geologischen Aufbau des Gebietes, durch welches die Leitung führt.

Da die Anzahl Leitungen bei gleichbleibenden Platzverhältnissen ständig steigt, entsteht ein Trasseeproblem, das zur Kumulation von vielen Leitungen längs eines Trassees (oft auf einem Mast) führt. Dies hat eine induktive und kapazitive Kopplung zwischen den Systemen zur Folge, welche bei der Netzberechnung in bestimmten Fällen mitberücksichtigt werden muss.

Im folgenden wird die Frage untersucht, wie die Leitungsparameter von den erwähnten Merkmalen abhängen. Der Überblick über den Einfluss der Leitungsmerkmale auf das elektrische Verhalten ist aus mehreren Gründen interessant. Bei der Projektierung ist es z. B. wichtig zu wissen, wie die Konstruktionsmerkmale die Leitungsparameter beeinflussen und welche Tendenz und Stärke dieser Einfluss hat.

Um diesen Überblick gewinnen zu können, musste eine grosse Zahl von Vergleichsrechnungen mit variablen Konstruktionsmerkmalen und Bodenleitfähigkeiten durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wurde das Freileitungsdatenprogramm von IBM «Symmetrische Komponenten» auf einem IBM System 1130 verwendet. Parallel zu diesen Berechnungen wurden auch Vergleichsrechnungen mit dem BBC-Programm «Leitungskonstanten» ausgeführt, deren Formeln dem Lehrbuch [1] entnommen sind (Anhang). Die Resultate weichen nur unwesentlich voneinander ab.

Um eine einwandfreie Vergleichsgrundlage zu haben, musste die Anzahl der möglichen Leitungstypen reduziert werden. Als Grundlage der Berechnung wurden daher Masten und Seile angenommen, die im schweizerischen Höchstspannungsverteilsnetz verwendet werden. Die Grundelemente wurden folgendermassen gewählt:

Masten:	Gittermasten für 380 (220) kV gemäss Fig. 1
Leiterseile:	300 mm ² Aldrey einfach und Zweierbündel 600 mm ² Aldrey einfach, doppelt, dreifach und vierfach (Bündel)
Erdseil:	100 mm ² Al, 185 mm ² (nutzbar 147 mm ²) AwAd mit Koaxialkabel und 400 mm ² (nutzbar 364 mm ²) AwAd mit Koaxialkabel
Betriebsspannung:	220 und 380 kV, 50 Hz
Bodenleitfähigkeit:	10, 50, 100 und 500 μS/cm

Für jede ausgewählte Leitung wurden für das Mitsystem (Index 1) und Nullsystem (0) berechnet:

- Längsimpedanz $R + jX$
- Queradmittanz $G + jB$
- Die induktiven und kapazitiven Koppelwerte bei parallelen Leitungen

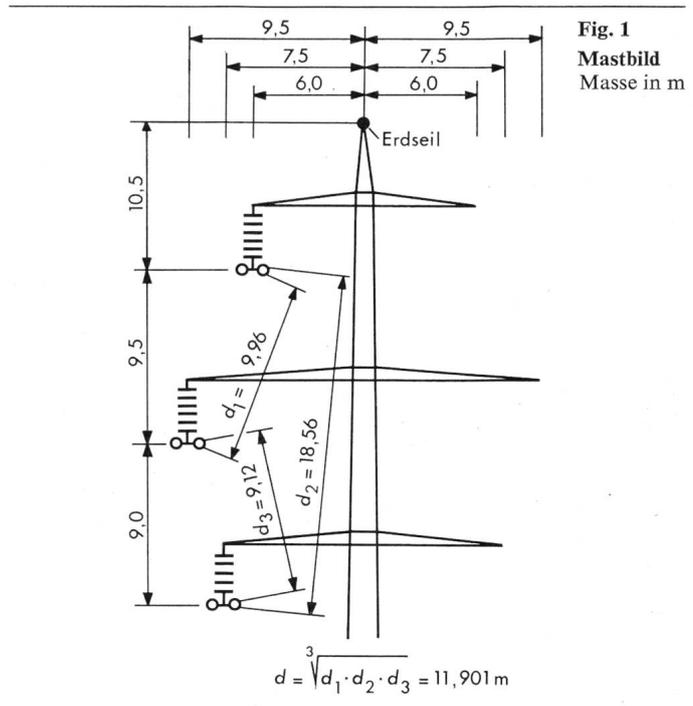


Fig. 1
Mastbild
Masse in m

4. Auswertung der Untersuchungen

In Tabelle I sind die qualitativen Einflüsse der Anzahl Bündelleiter, der Leiterdistanzen, des Querschnitts und der Anzahl der Erdseile, des Durchhanges sowie der Bodenleitfähigkeit auf die Leitungsparameter dargestellt. Die Untersuchung wurde unter Variation eines Merkmals bei Konstanthaltung aller anderen Merkmale durchgeführt.

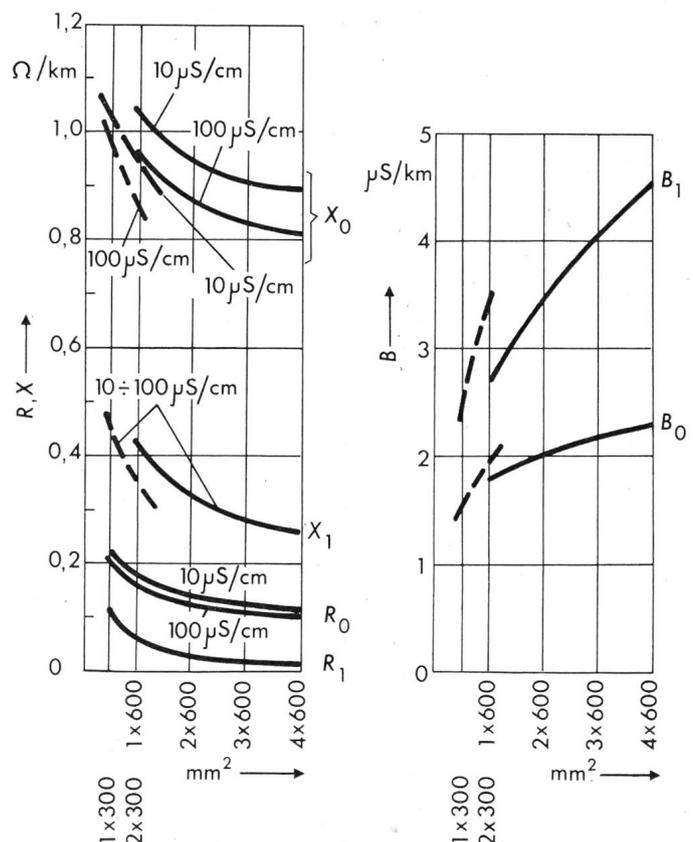


Fig. 2 Kenndaten in Abhängigkeit von der Anzahl Bündelleiter mit der Bodenleitfähigkeit als Parameter

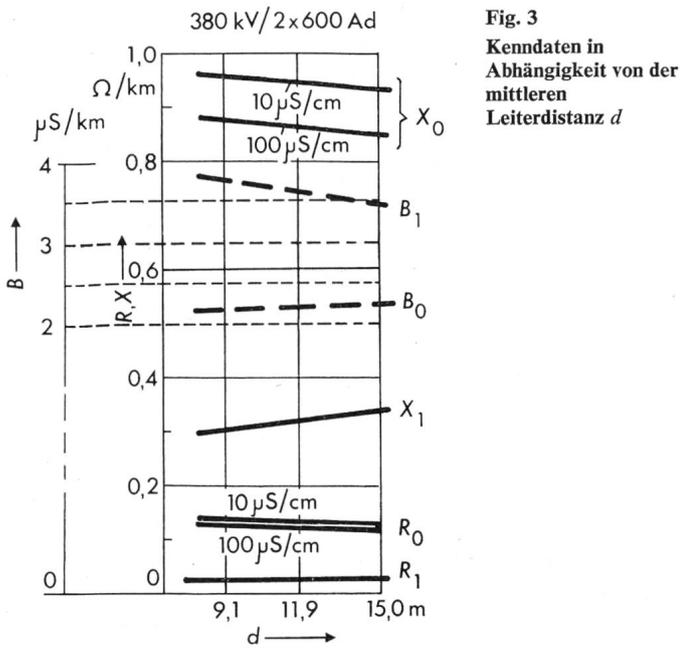


Fig. 3
Kenndaten in Abhängigkeit von der mittleren Leiterdistanz d

4.1 Anzahl Bündelleiter

Wie in Fig. 2 ersichtlich, sinken die Längsimpedanzen R_1 , X_1 , R_0 und X_0 mit steigender Anzahl Bündelleiter, die Queradmittanzen B_1 und B_0 steigen jedoch an. Dies hat seinen Grund in einem grösseren äquivalenten Radius eines Bündelleiters gegenüber einem einfachen Seil und wirkt sich stark auf die Parameter aus.

4.2 Leiterdistanzen

Neben den Normalabmessungen gemäss Fig. 1 wurden verkleinerte und vergrösserte Leiterabstände betrachtet (Fig. 3). Wachsende Leiterdistanzen bei gleicher durchschnitt-

licher Höhe über Boden führen zu einer zunehmenden Entkopplung der Leiter. Die Beträge von \underline{Z}_{ik} , P_{ik} nehmen rascher ab als diejenigen von \underline{Z}_{ii} , P_{ii} , weil die Abstände zwischen den Leitern schneller zunehmen als diejenigen zu den gespiegelten Leitern (Fig. 10). Gemäss Anhang 3 ergibt sich daraus ein Abfallen von \underline{Z}_0 und Y_1 und ein Ansteigen von \underline{Z}_1 und Y_0 . Dies betrifft jedoch die ohmschen Anteile nicht, weil diese nur in den Eigenimpedanzen eine Rolle spielen.

4.3 Anzahl und Querschnitt der Erdseile

Die Erdseile haben, grob gesprochen, denselben Effekt wie eine Annäherung der Leiterseile an die Erde. Davon werden zunächst die Queradmittanzen B_1 und B_0 betroffen, welche mit der Anzahl der Erdseile leicht ansteigen (Fig. 4). Die Nullimpedanz sinkt dagegen stark ab, da die Kombination Erdseil/Boden einen besseren Rückfluss des Nullstromes ermöglicht. R_0 und X_0 sinken bis zu einem Erdseilquerschnitt von $150 \text{ mm}^2 \text{ AwAd}$ relativ schneller, als bei grösseren Querschnitten (Fig. 5). Die Mitimpedanz ist vom Einfluss der Erdseile unabhängig.

Eine Vergrösserung des Querschnittes der Erdseile zeigt dieselbe Tendenz wie die Vergrösserung der Anzahl, ist aber weniger ausgeprägt.

4.4 Durchhang

Die Vergrösserung des Durchhanges hat eine Reduktion der mittleren Höhe der Freileitungsseile über Boden zur Folge und vergrössert daher die kapazitiven Queradmittanzen B_1 und B_0 (Fig. 6). Der Effekt ist jedoch bescheiden. Auf die Längsimpedanzen R_0 und X_0 konnte kein wesentlicher Einfluss festgestellt werden, während $R_1 + jX_1$ vom Durchhang unabhängig ist, weil bei symmetrischem Betrieb die Summe der durch die Leiter fliessenden Ströme Null ist und sich das Magnetfeld ohne Einbeziehung der Erde um die Leiter schliesst.

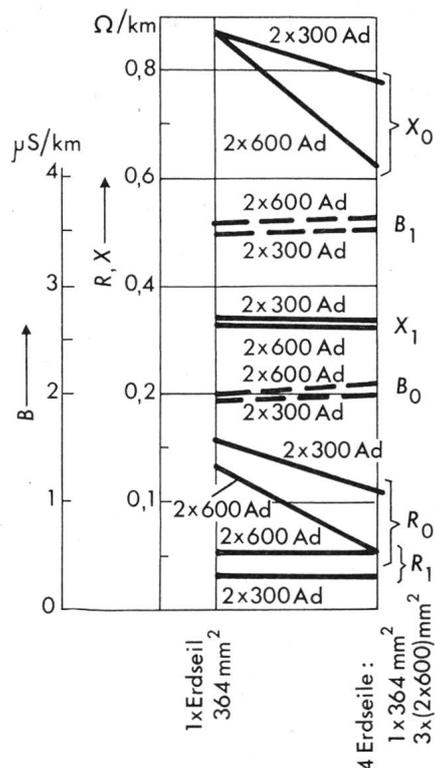


Fig. 4 Kenndaten in Abhängigkeit von der Anzahl der Erdseile

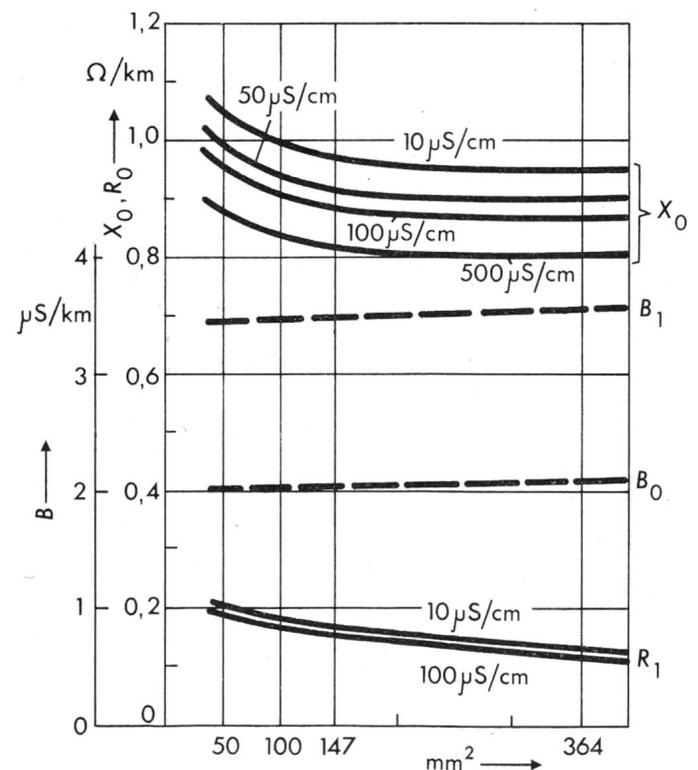


Fig. 5 Kenndaten in Abhängigkeit des Querschnittes des Erdseils

4.5 Bodenleitfähigkeit

Die zunehmende Bodenleitfähigkeit hat auf die Nullreaktanz X_0 einen stark vermindern Einfluss (Fig. 7). Die übrigen Parameter werden davon nicht beeinflusst (vgl. Carson'sches Korrekturglied c_2 im Anhang). Die grösste Abnahme der Nullreaktanz ist im Bereich der Bodenleitfähigkeit von 0...150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ festzustellen; dann ist die maximale Fähigkeit des Bodens erreicht, zur Verbesserung der Stromwege beizutragen.

In der Schweiz sind vor allem die Bodenleitfähigkeiten im Bereich 0...200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ interessant [1]. Bei Böden im Flachland und Schwemmland kommen jedoch auch höhere Leitfähigkeiten vor, so dass in Fig. 7 die Verhältnisse bis zu 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dargestellt wurden.

4.6 Parallel laufende Leitungen

Im Mitsystem kann man die elektrischen Werte für parallele Leitungen wegen der geringen Kopplung im allgemeinen nach den üblichen Regeln der Parallelschaltung ermitteln. Im Nullsystem sind jedoch für die Längsimpedanz $R_0 + jX_0$ Kopplungsglieder Z_{0k} zu berücksichtigen, welche 40...60% der Eigenimpedanz einer Leitung erreichen können (Fig. 8). Dies führt dazu, dass z. B. die Nullreaktanz zweier gleicher paralleler Leitungsstränge zusammen nur wenig kleiner ist als die der Einzelleitung. Z. B. sinkt die Nullreaktanz der Leitung $2 \times 3 \times (2 \times 600 \text{ mm}^2)$ Ad bei einer Bodenleitfähigkeit von 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ von 0,868 Ω/km für die Einfachleitung auf 0,668 Ω/km , wenn beide Leitungen elektrisch parallel laufen.

Wenn ein Strang einer Doppelleitung abgeschaltet wird, sind folgende Fälle möglich:

- die abgeschaltete Leitung ist an beiden Enden geerdet – z. B. wenn auf der Leitung gearbeitet wird, oder dies durch die Vorschriften verlangt wird;
- die Leitung wird abgeschaltet (ohne Erdung), damit sie später schnell wieder in Betrieb genommen werden kann.

Im Fall a) wird die betriebliche Leitung sozusagen vier Endseile haben – das eine, mit welchem die Leitung tatsächlich ausgerüstet ist, z. B. 400 m^2 AwAd, sowie die geerdeten Leiterseile der zweiten Leitung, z. B. $3 \times (2 \times 600 \text{ mm}^2)$ Ad. Wie sich dabei die Nullimpedanz verhält, ist aus Fig. 7 ersichtlich.

Im Fall b) wird die Nullreaktanz der in Betrieb stehenden Einfachleitung durch die Anwesenheit der parallelen, nicht geerdeten Leitung nicht verändert, weil in dieser kein Strom fließen kann, welcher sonst die gemeinsame Kopplungsimpedanz beanspruchen würde (Fig. 8).

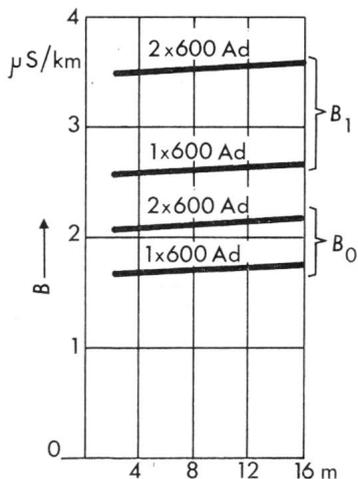


Fig. 6
Kenndaten in Abhängigkeit
des Durchhanges
Mitte Spannweite

5. Schlussfolgerungen

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass die Leitungsparameter nicht auf alle Einflussmerkmale gleich empfindlich reagieren. Relativ gross ist der Einfluss der Anzahl und Anordnung der Bündelleiter auf alle Parameter, der Anzahl der

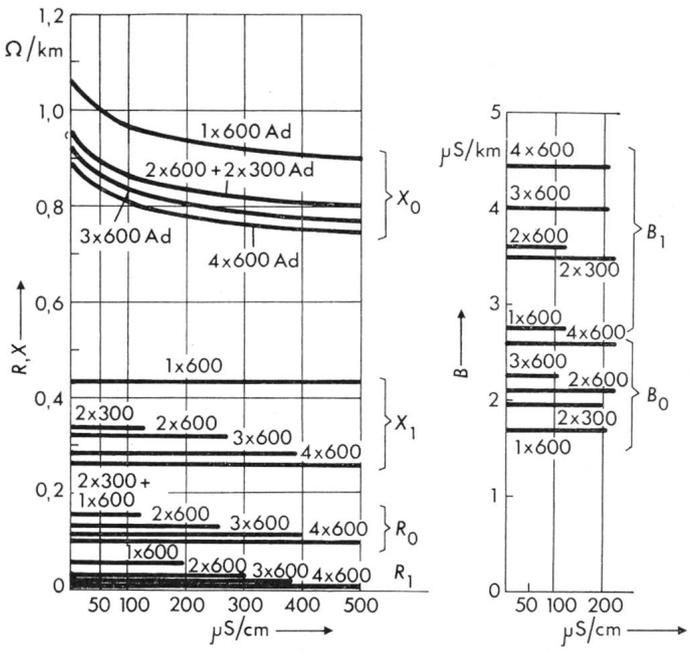


Fig. 7 Kenndaten in Abhängigkeit von der Bodenleitfähigkeit

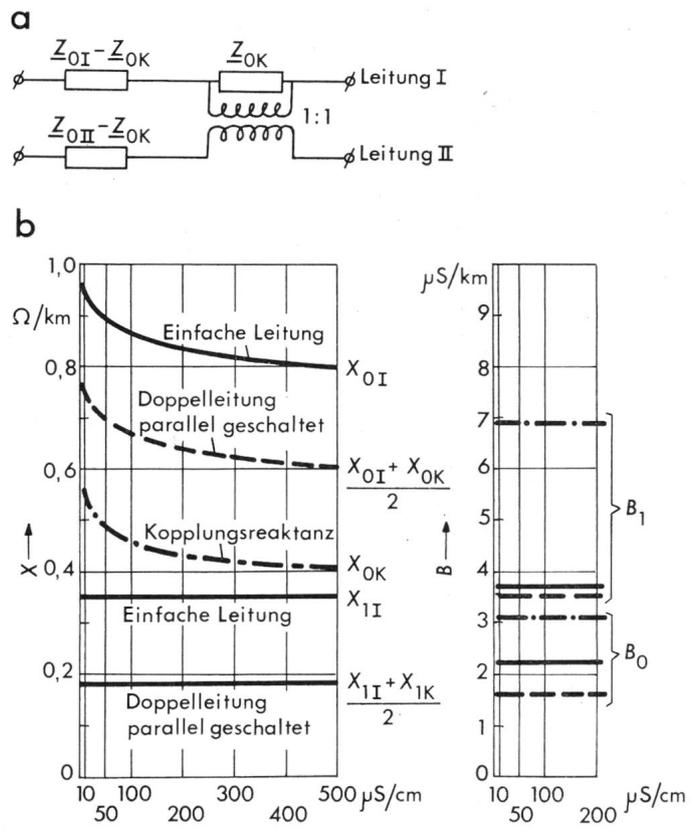


Fig. 8 Parallele Leitungen
a) Ersatzschaltbild für die Längsimpedanz im Nullsystem
 Z_{0I} Nullimpedanz der Leitung I allein
 Z_{0II} Nullimpedanz der Leitung II allein
 Z_{0K} Kopplungsimpedanz
b) Kenndaten einfacher und paralleler Leitungen
in Abhängigkeit der Bodenleitfähigkeit

Übersicht über die Abhängigkeit der Leitungsparameter

Zunehmendes Einflussmerkmal	R ₁	X ₁	R ₀	X ₀	B ₁	B ₀	Fig.
Bündel n = 1,2,3,4,	↘	↘	↘	↘	↗	↗	2
Distanzen	↔	↗	↔	↘	↘	↗	3
Anzahl Erdseile	—	—	↘	↘	↗	↗	4
Erdseil Querschnitt	—	—	↘	↘	↗	↗	5
Durchhang	—	—	↔	↔	↗	↗	6
Bodenleitfähigkeit	—	—	↔	↘	—	—	7

- kein Einfluss
- ↔ kein wesentlicher Einfluss
- ↗ steigende Tendenz
- ↘ fallende Tendenz
- ↗ stark steigende Tendenz
- ↘ stark fallende Tendenz

Erdseile auf die Nullimpedanz und der Bodenleitfähigkeit auf die Nullreaktanz. Für überschlägige Berechnungen genügt es also, diese Einflüsse zu erfassen und die übrigen zu vernachlässigen. Auch schwache Einflüsse samt ihrer Tendenz sind aus Tabelle I ersichtlich.

Anhang 1: Liste der verwendeten Symbole

- I** Matrix der Leiterströme $\underline{I}_A, \underline{I}_B$ [A]
- I'** Matrix der Ströme Leiter-Erde $\underline{I}'_A, \underline{I}'_B$ [A/km]
- P** Matrix der Potentialkoeffizienten P_{ii}, P_{ik} [km/F]
- c₁, c₂** Carsonsche Korrekturglieder für endliche Bodenleitfähigkeit [-]
- T** Entsymmetrierungsmatrix [-]
- U** Matrix der Spannungen Leiter-Erde $\underline{U}_A, \underline{U}_B$ [V]
- ΔU** Matrix der Spannungsabfälle längs der Leiter $\Delta U_A, \Delta U_B$ [V/km]
- X_i** Innere Selbstreaktanz eines Leiters [R/cm]
- Y, Y_{TR}** Queradmittanzmatrix Y_{ii}, Y_{ik} [S/km]
- Z, Z_{TR}** Längsimpedanzmatrix Z_{ii}, Z_{ik} [Ω/km]
- f, ω = 2πf** Netzfrequenz [Hz]
- n** Anzahl Bündelleiter/Phase [-]
- q** Querschnitt eines Leiters [mm²]
- ε₀** Dielektrizitätskonstante [F/km]
- μ₀** Permeabilität [H/cm]
- ρ** Spezifischer Leiterwiderstand [Ω · mm²/cm]
- κ** Spezifische Bodenleitfähigkeit [S/cm]
- r, D, h** Distanzen (Fig. 10) [m]

Anhang 2: Gleichungen zur Bestimmung der elektrischen Kenngrößen nach Fig. 9 [1]

Längsimpedanz $\Delta U = Z \cdot I$

$$\begin{bmatrix} \Delta U_A \\ \Delta U_B \\ \vdots \\ \Delta U_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{ik} & \dots & Z_{kk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ \vdots \\ I_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

Darin betragen

$$Z_{ii} = \left\{ \frac{\rho}{q \cdot n} + 2 \mu_0 f c_1 + j \left[\mu_0 f \left(\ln \frac{2h_i}{r} + 2c_2 \right) + X_i \right] \right\} 10^5 \quad (2)$$

$$Z_{ik} = \left\{ 2 \mu_0 f c_1 + j \mu_0 f \left(\ln \frac{D_{ik}'}{D_{ik}} + 2c_2 \right) \right\} 10^5 \quad (3)$$

mit $X_i = \mu_0 \cdot f \cdot \ln \frac{r}{r_q} \quad r_q \approx 0,779 r$

$c_1 \approx \frac{\pi}{8}, c_2 \approx -0,0386 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{\lambda}$

$\lambda = 1,6 \pi A \sqrt{\kappa \mu_0 f}$

$A = h_i$ für Z_{ii} und $A = \frac{D_{ik}}{2}$ für Z_{ik}

Queradmittanz $I' = j Y \cdot U = j \omega P^{-1} \cdot U$

$$U = -\frac{j}{\omega} P \cdot I'$$

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ \vdots \\ U_k \end{bmatrix} = -\frac{j}{\omega} \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{ik} & \dots & P_{kk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I'_A \\ I'_B \\ \vdots \\ I'_k \end{bmatrix} \quad (4)$$

Darin betragen

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r} \quad (5)$$

$$P_{ik} = \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \ln \frac{D_{ik}'}{D_{ik}} \quad (6)$$

Anhang 3: Transformation in symmetrische Komponenten

$$Z_{TR} = T^{-1} \cdot Z \cdot T \quad Y_{TR} = T^{-1} \cdot Y \cdot T$$

$$T = \frac{1}{b} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

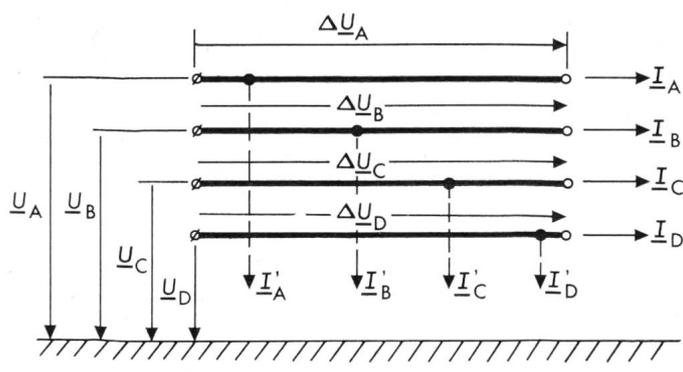


Fig. 9 Darstellung zur Definition der Eigen- und Kopplungseffekte

Reihenfolge in T: Null-, Mit-, Gegensystem

$b = 1$ für nichtnormierte Komponenten

$b = \sqrt{3}$ für normierte Komponenten

$$\underline{a} = e^{j \frac{2\pi}{3}}$$

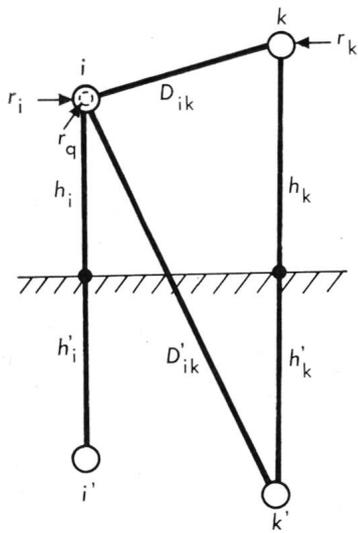


Fig. 10
Gegenseitige Lage
zweier Leiter mit Spiegelung
an der Erdoberfläche

Bei symmetrischen Leitungen ($\underline{Z}_{11}, \underline{Z}_{1k}, P_{11}$ und P_{1k} untereinander gleich) lautet das Ergebnis der Transformation:

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_{11} + 2 \underline{Z}_{1k} \quad (\underline{Z}_{1k} > 0)$$

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{1k}$$

$$Y_0 = Y_{11} + 2 \cdot Y_{1k} \quad (Y_{1k} < 0)$$

$$Y_1 = Y_{11} - Y_{1k}$$

Literatur

- [1] H. Koettitz und H. Pundt: Mathematische Grundlagen und Netzparameter. 2. Auflage. Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze, Band 1. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1973.
- [2] P. M. Anderson: Analysis of faulted power systems. Ames/Iowa, Iowa State University Press, 1973.
- [3] H. Hager: Untersuchung von Energieversorgungsnetzen mit digitalen Rechenprogrammen. Brown, Boveri Mitt. 56(1969)1, S. 19...24.
- [4] K. Reichert und H. Hager: Analyse elektrischer Energieversorgungssysteme auf einheitlicher Datenbasis mit dem Digitalrechner. Brown, Boveri Mitt. 59(1972)7, S. 332...336.
- [5] A. Hoppner: Handbuch für Planung, Konstruktion und Montage von Schaltanlagen. 3. Auflage. Herausgegeben von der Brown, Boveri & Cie. AG, Mannheim. Essen, Girardet-Verlag, 1964.
- [6] Electric transmission and distribution reference book. Pittsburgh, Westinghouse Electric Corporation, 1964.

Adressen der Autoren

Dipl. Ing. Helmut Hager, Abt. KCT, BBC Brown Boveri & Cie AG, 5401 Baden, und Josef Tlapa, Studien- und Planungsbüro der NOK Nordostschweizerische Kraftwerke AG, 5401 Baden

Corrigendum:

Im Aufsatz «Elektrische Phänomene des Knochens» (Heft 4/1976) hat sich auf S. 189 ein Irrtum eingeschlichen. Mit der dort erwähnten Ärztekommision des SEV ist die Ärztekommision zum Studium der Starkstromunfälle, des VSE, gemeint.