

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 60 (1969)
Heft: 8

Artikel: Ortung von Fehlern in Energie-Verteilnetzen
Autor: Linder, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916139>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Ortung von Fehlern in Energie-Verteilnetzen ¹⁾

Von H. Linder, Fällanden
2539 - 2567

621.317.334.4:621.316.1

1. Vorbemerkungen

Im Folgenden sollen Methoden aufgezeigt werden, welche gestatten, den Fehlerort von dauernden Störungen im Leitungsnets messtechnisch vom Unterwerk aus zu orten. Dabei sollen unter dauernden Störungen Erd- oder Kurzschlüsse verstanden werden, bei denen die Schnellwiedereinschaltung erfolglos verläuft. Erdschlüsse in Mittelspannungsnetzen mit nicht starr geerdetem Sternpunkt, die nicht weggeschaltet, sondern nur angezeigt werden, sollen hier ebenfalls zu den dauernden Störungen gerechnet werden. Der mit Erdschluss behaftete Leitungsstrang muss dann zunächst lokalisiert werden, was durch Betätigung der Schnellwiedereinschaltung der einzelnen Leitungsfelder geschehen kann. Verschwindet während dem Schaltvorgang die Erdschlussanzeige kurzzeitig, so handelt es sich um das mit Erdschluss behaftete Leitungsfeld. Für die Durchführung der Ortung muss der betreffende Strang ausgeschaltet werden.

Zu den dauernden Störungen sind auch intermittierende Erd- und Kurzschlüsse (z. B. durch Windeinfluss), sowie hochohmige Widerstände zwischen den Phasen (verkohlte oder verschmutzte Isolation), die durch lokale Hitzewirkung den eigentlichen Kurzschluss erst einleiten, zu rechnen. Ferner sind Annäherungen zwischen Leitern denkbar, die ohne zu berühren einen Überschlag zur Folge haben können. Alle diese Störungen können jedoch mit den nachstehend untersuchten Methoden nicht erfasst werden.

2. Allgemeines

Die Ortung setzt eine vom Fehlerort abhängige Größe voraus, die an den Abgangsklemmen der zu untersuchenden Leitung gemessen werden kann. Solche Leitungen — in Anbetracht der vielfachen Verzweigungen zutreffender als Leitungsnets bezeichnet — können durch Einsatzbilder nach Art der Fig. 1 A dargestellt werden. Diese Netzdarstellung eignet sich für die Untersuchung von betriebsfrequenten Vorgängen.

Es sind vor allem zwei Umstände, die eine messtechnische Ortung auf dieser Grundlage als ungeeignet erscheinen lassen. Erstens sind die Ersatzimpedanzen der Transformatoren keine konstanten Größen, sondern vom Belastungszustand der betreffenden Sekundärnetze abhängig. Zweitens ist die genügend genaue Berechnung der Induktivitäten der Leitungsstrecken umständlich, zumal die Phasenunsymmetrien meistens nicht vernachlässigt werden können. Demgegenüber treten bei Messungen mit Gleichstrom nur die rein Ohmschen Widerstände in Erscheinung und das Netz kann durch ein vereinfachtes Ersatzbild nach Fig. 1 B dargestellt werden. Die Widerstände der Leitungsstrecken sind praktisch vollkommen phasensymmetrisch und lassen sich einfach berechnen. Dies gilt auch für die Widerstände der primären Transformatorenwicklungen.

¹⁾ Von der Denzler-Stiftung des SEV preisgekrönte Arbeit.

Durch das Wegfallen der komplexen Größen werden die Untersuchungen erheblich vereinfacht.

Die Netzwiderstände sind natürlich temperaturabhängig. Die klimatisch bedingten Temperaturunterschiede von etwa 50 °C entsprechen einem Widerstandsunterschied von ca. 20 %, also im Extremfall einer Abweichung vom Mittelwert von etwa 10 %. Auch der der Messung vorausgegangene Belastungszustand hat einen Einfluss auf die LeiterTemperatur.

Wie noch gezeigt wird, können die Messungen meist so durchgeführt werden, dass im Prinzip der Widerstand eines Netzteiles mit dem Gesamtwiderstand des Netzes verglichen wird. Der störende Temperatureinfluss kann sich dann nur in beschränktem Masse auswirken.

3. Die Messeinrichtung

Bevor auf die theoretische Untersuchung der Gleichstrom-Methoden eingegangen wird, sollen einige Bemerkungen über die praktische Durchführung der Messungen und die Gestaltung der Messeinrichtung vorausgeschickt werden.

Der Anschluss der Messeinrichtung an die drei Abgangsklemmen wird in den meisten Fällen in den Schalterzellen erfolgen, wobei die Sammelschienentrenner geöffnet, bzw. der Schalterwagen ausgefahren sein muss.

Da die Abgangsklemmen während des Messvorganges weder kurzgeschlossen noch geerdet werden können, müssen sie im Sinne der Sicherheitsvorschriften als unter Spannung stehend betrachtet werden. Der Anschluss an die Abgangsklemmen muss deshalb mittels isolierter Zangen erfolgen und die Messeinrichtung soll so ausgebildet sein, dass während dem Messvorgang nur isolierte Teile berührt werden müssen.

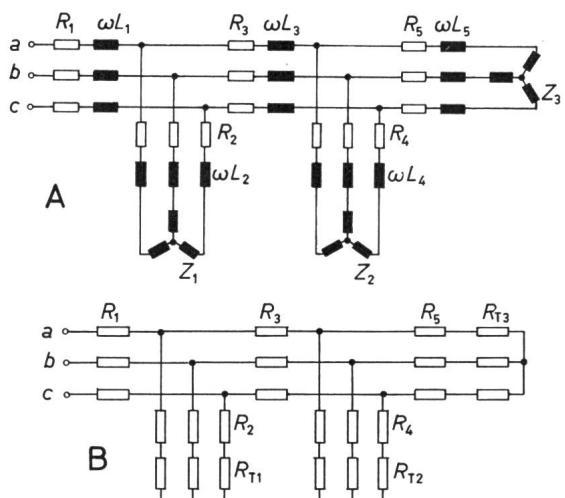


Fig. 1
Dreipoliges Netzschemabild

A für Betriebsfrequenz; B für Gleichstrom
a, b, c Abgangsklemmen im Unterwerk; R₁...R₅ Widerstände der Leitungsstrecken; ωL_1 ... ωL_5 induktive Reaktanzen der Leitungsstrecken; Z₁, Z₂ Ersatzimpedanzen der Transformatoren; R_{T1}, R_{T2} Widerstände der Primärwicklungen der Transformatoren

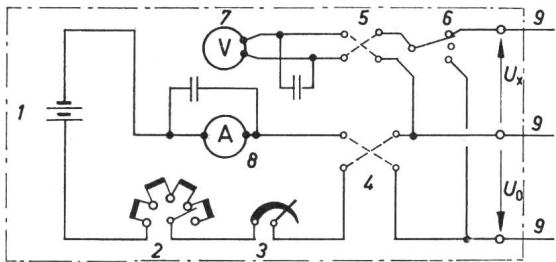


Fig. 2

Prinzipschema der Messeinrichtung

*U*₀ einstellbare Meßspannung; *U*_x Ortungs-Spannung; 1 Batterie; 2 Grob-Einstellwiderstand; 3 Fein-Einstellwiderstand; 4 Polwender für die Messung; 5 Polwender für das Voltmeter; 6 Voltmeter-Umschalter; 7 Voltmeter mit Schutz für überlagerte Wechselströme; 8 Ampèremeter mit Schutz für überlagerte Wechselströme; 9 Anschlusskabel mit Isolierzangen

Die Gleichstrominstrumente können durch Kondensatoren und Drosselpulen vor Überbeanspruchung durch überlagerte Wechselströme geschützt werden.

Das Prinzipschema der Messeinrichtung ist aus Fig. 2 ersichtlich. Es wird zweckmässig sein, die gesamte Einrichtung auf einen kleinen Wagen zu montieren, der vor die zu messende Abgangszelle gefahren werden kann.

4. Die Potentialabtastung oder lineare Methode

Als linear kann diese Methode bezeichnet werden, weil die messbare Ortungsgrösse proportional mit der Entfernung zunimmt. Mit der linearen Methode können Erdschlüsse und zweipolige Kurzschlüsse mit Erdberührung erfasst werden.

4.1 Das Messprinzip

Werden zwei Phasen eines symmetrischen Drehstromnetzes an eine Stromquelle angeschlossen (Fig. 3), so ist die Stromverteilung in diesen Phasen symmetrisch. Sämtliche Leitungszweige der nicht angeschlossenen Phase sind stromlos und nehmen, wie auch alle Sternpunkte, halbe Spannung an.

Die Anzeige des Voltmeters, das die Spannung U_x zwischen dem Leitungsanfang a und einem Netzpunkt x misst, kann auch als Potential V_x des betreffenden Netzpunktes aufgefasst werden, wenn das Potential der Abgangsklemme a mit Null bezeichnet wird. Das Potential V_x nimmt proportional mit dem Abstand x zu (mit positivem oder negativem Vorzeichen) und erreicht im Sternpunkt den Wert $V_0' = \frac{1}{2} V_0$, wobei V_0 das Potential der anderen Leitungsklemme bedeutet. Jedem Netzpunkt entspricht ein bestimmtes Potential V_x . Statt mit dem absoluten Wert von V_x zu rechnen ist es zweckmässiger, den relativen, auf das Potential V_0' des Sternpunktes bezogenen Wert v_x einzuführen.

$$v_x = \frac{V_x}{V_0'}$$

Mit dem relativen Potential v_x ist jedem Netzpunkt, unabhängig von der Durchführung der Messung, eine bestimmte dimensionslose Grösse zugeordnet, die in ihrer Gesamtheit charakteristisch für das betreffende Netz ist. Diese charakteristische Grösse v_x bleibt sogar dann noch erhalten, wenn alle Netzwiderstände — z. B. infolge gleichmässiger Temperaturänderung über das gesamte Netz — proportional verändert werden.

Die praktische Ortung eines Erdschlusses kann nach Fig 4a erfolgen. Dem Erdreich entspricht das Potential V_x der Fehler-

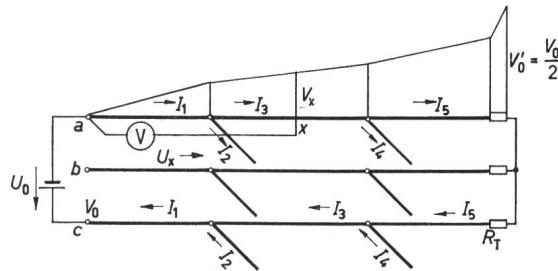


Fig. 3

Prinzip der Potentialabtastung

a, b, c Leitungsklemmen im Unterwerk; $I_1 \dots I_5$ Ströme in den Leitungsstrecken; R_T Sternersatzwiderstand der primären Transformatorwicklung; U_0 eingestellte Meßspannung (die Einstellungswiderstände sind weg gelassen); V_x Potential an der Stelle x der Leitung; U_x mit Voltmeter gemessene Potentialdifferenz $V_x - V_a$; V'_0 Potential der (meist fiktiven) Transformersternpunkte

stelle. Es kann mit dem Voltmeter im Unterwerk gemessen werden. Das Erdreich ersetzt somit die in Fig. 3 eingezeichnete Voltmeterleitung. Die Erdübergangswiderstände haben keinen Einfluss auf das Messergebnis, da sie im Verhältnis zum Voltmeterwiderstand immer klein sind. Dagegen muss die Messung mit beiden Polaritäten durchgeführt und mit dem Mittelwert der beiden Ablesungen gerechnet werden, um elektrolytische Spannungen der Erdelektroden zu kompensieren.

Bei der Erdschlussortung nach Fig. 4a beträgt das Sternpunktpotential $V_0' = \frac{2}{3} V_0$ und das relative Potential v_x wird dann $v_x = 1,5 \frac{U_x}{U_0}$. Bei Einregulierung der Meßspannung U_0 auf genau 150 Skalenteile, ergibt die Ablesung von U_x direkt das relative Potential in Prozent, d. h. ein Skalenteil entspricht 1 %. Analog ist dann bei der Kurzschlussortung nach Fig. 4b 1 Skalenteil gleich 2 %.

4.2 Potentialdiagramm des Netzes

Das relative Potential v_x muss für das Netz in seiner gesamten Ausdehnung bekannt sein und in übersichtlicher Form dargestellt werden.

Für ein willkürlich angenommenes Netz sind nachstehend die Unterlagen ausgearbeitet, wofür die einpolige Betrachtung genügt.

Fig. 5 zeigt den etwas stilisierten Situationsplan des ange- nommenen Verteilnetzes. Fig. 6 zeigt das gleiche Netz in der abstandorientierten Darstellung. Fig. 7 gibt das Netz im Widerstandsmaßstab wieder. Die Widerstände der Leitungsstrecken sind ausgezogen, diejenigen der Transformatoren gestrichelt gezeichnet. Ferner sind die hinter den Abzweigungen liegenden

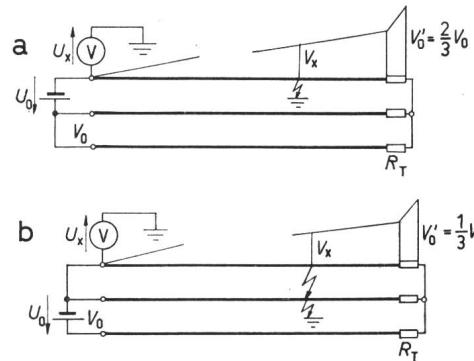


Fig. 4

Messanordnung für die Ortung

a von Erdschläussen; *b* von zweipoligen Kurzschläussen mit Erdberührung
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 3

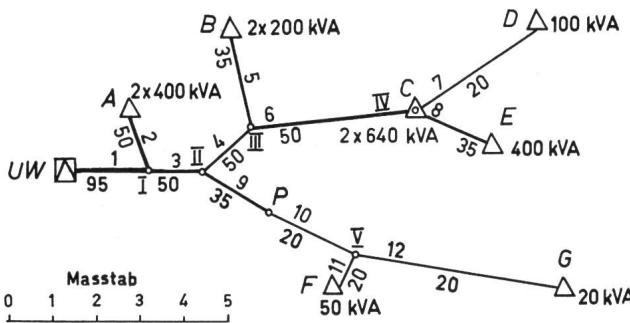


Fig. 5

Situationsplan des Leitungsnetzes

I...12 Nummer der Leitungsstrecken (unter jeder Streckennummer ist der Cu-Querschnitt in mm^2 angegeben); I...V Abzweigungen; A...G Stationen (mit Nennleistung der eingeschalteten Transformatoren); P Punkt mit Querschnittsänderung

Gesamtwiderstände des Netzes strichpunktiert dargestellt. Wegen der Linearität auf den Leitungsstrecken müssen die bezogenen Potentiale v_x nur für die Abzweigungen und Enden der Strecken, allenfalls noch bei Querschnittsveränderungen (Punkt P), bestimmt werden. Die Berechnung von v_x kann direkt aus den Widerständen der Fig. 7 erfolgen, ausgehend von der Tatsache, dass v_x beim Unterwerk gleich null ist, an den Enden der Transformator- und Ersatzwiderstände dagegen 100 % beträgt.

Statt die ermittelten v_x als Ordinaten über den Leitungsstrecken als Abszissen aufzuzeichnen wie dies in Fig. 3 geschah, kann das Netz wegen der Proportionalität direkt im Maßstab des relativen Potentials v_x , d. h. im Potentialabstand dargestellt werden (Fig. 8).

4.3 Erweiterte Messung

In vielen Fällen genügt das Ergebnis einer einfachen Messung für die Ortung der Fehlerstelle, wobei unter «einfacher Messung» die Untersuchungen verstanden werden, die am Netz mit unverändertem Schaltzustand durchgeführt werden können. Wenn aber das gemessene v_x im Potentialdiagramm mehrdeutig ist, kann eine erweiterte Messung für die eindeutige Ortung notwendig werden.

Für die «erweiterte Messung» wird durch eine vorbereitete Änderung im Netz eine Verschiebung der Potentiale v_x bewirkt, so dass die mehrdeutigen Stellen nicht mehr zusammenfallen. Im vorliegenden Fall besteht diese Änderung im Kurzschliessen des Transformators G.

Im Diagramm der Fig. 8a ist der Potentialbereich auf dem langen, zwischen der Abzweigung II und der Station G liegenden Leitungsstrang auf einen sehr kleinen Wert zusammengezerrt. Bei einer Störung auf diesem Strang würde die «einfache Messung» $v_x \approx 32\%$ ergeben (Fig. 8a). Die «er-

weiterte Messung» nach dem Diagramm in Fig. 8b ermöglicht dann die genaue Ortung auf dem fraglichen Strang.

5. Der ortsabhängige Kurzschlusswiderstand

Bei isolierten Kurzschlüssen fehlt die als Meßsonde zur Potentialabtastung benützbare Erdleitung. Hier bietet der vom Fehlerort abhängige Widerstand zwischen den kurzgeschlossenen Leitern eine Möglichkeit für die Ortung. Dieser im Unterwerk messbare Kurzschlusswiderstand ist eindeutig vom Kurzschlussort abhängig, wenn satt Kurzschlüsse mit vernachlässigbarem Übergangswiderstand vorausgesetzt werden.

5.1 Verlauf des Kurzschlusswiderstandes

Im Netzbild nach Fig. 9a bedeuten R_1, R_3, R_5 die Streckenwiderstände des zu untersuchenden Leitungszuges, während die Abzweigungen durch die Querwiderstände R_2, R_4 dargestellt sind. Fig. 9b zeigt den Verlauf des (einpoligen) Kurzschlusswiderstandes W_{1c} , wenn sich ein gedachter Kurzschluss von links beim Unterwerk beginnend nach rechts bewegt. Bis zur ersten Abzweigung ist W_{1c} gleich dem kurzgeschlossenen Teil des Streckenwiderstandes R_1 . Nach der Abzweigung an der

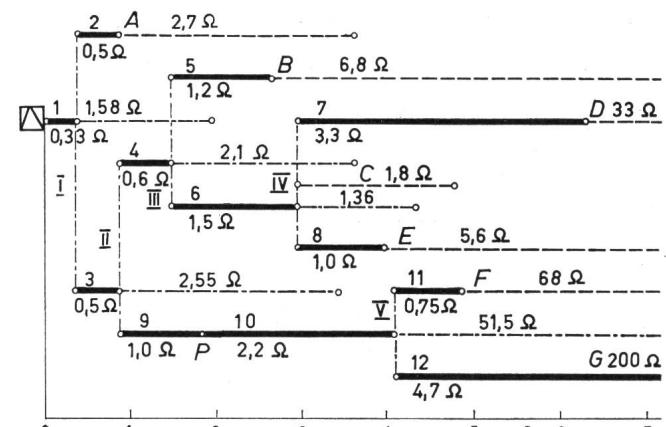


Fig. 7

Leitungsnetz im Widerstandsmaßstab

— Widerstand der Leitungsstrecken; - - - Widerstand der Transformatorenwicklungen; - - - Gesamtwiderstand
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 5
Einpoliger Netzwiderstand: $W_N = 0,33 + 1,58 = 1,91 \Omega$
Berechnung der bezogenen Potentiale v_x :

$$\text{Abzweig I : } v_x = \frac{0,33}{0,33 + 1,58} = 0,173 \triangleq 17,3\%$$

$$\text{Abzweig II : } v_x = \frac{0,5}{0,5 + 2,55} (1,0 - 0,173) + 0,173 = 0,309 \triangleq 30,9\%$$

$$\text{Abzweig III: } v_x = \frac{0,6}{0,6 + 2,1} (1,0 - 0,309) + 0,309 = 0,462 \triangleq 46,2\%$$

beliebigen Stelle x mit X als kurzgeschlossenem Teil des Streckenwiderstandes R_3 wird dann der Kurzschlusswiderstand:

$$W_{1c} = R_1 + \frac{R_2 X}{R_2 + X} = \frac{(R_1 + R_2) X + R_1 R_2}{X + R_2} \quad (1)$$

Das ist mit X und W_{1c} als Variablen die Gleichung einer Hyperbel mit achsparallelen Asymptoten, deren Scheitel bei $X = 0$ liegt und die für $X \rightarrow \infty$ dem asymptotischen Wert $R_1 + R_2$ zustrebt.

Auch nach der zweiten Abzweigung nimmt W_{1c} auf einem Hyperbelast zu (in Fig. 9b gestrichelt). Deren asymptotischer Wert ist aber kleiner und der Anstieg wird demzufolge etwas flacher. In den Abzweigpunkten berühren sich die Hyper-

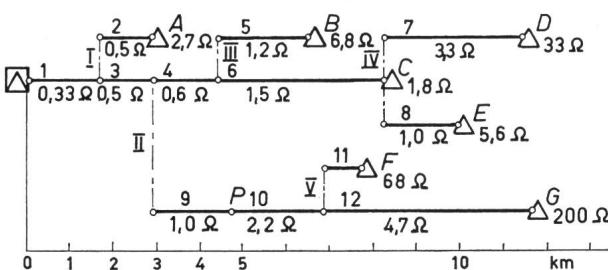


Fig. 6

Abstandorientierter Netzplan des Leitungsnetzes in Fig. 5
Bezeichnungen siehe Fig. 5

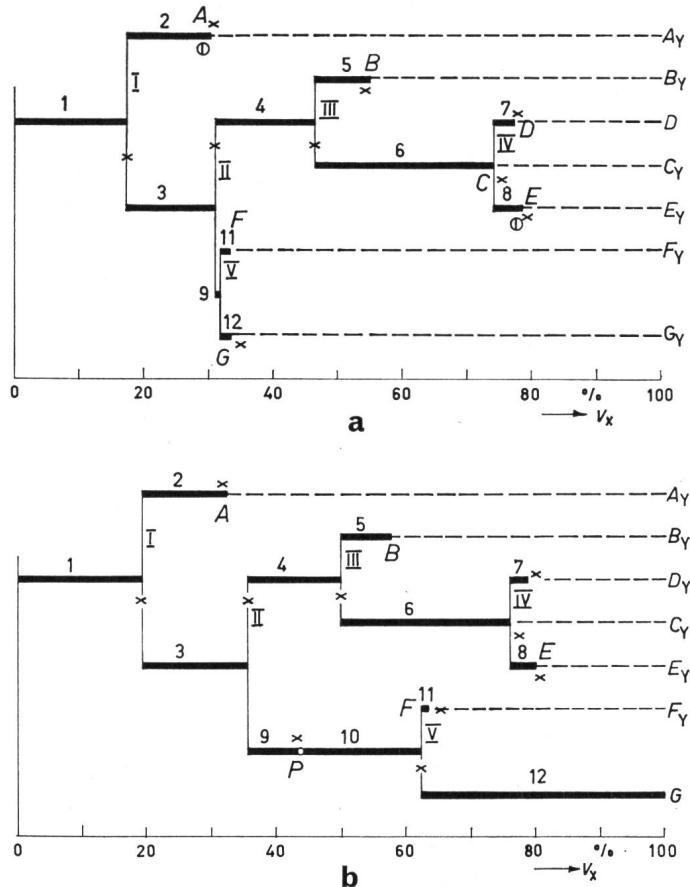


Fig. 8
Berechnete Potentialdiagramme für das Leitungsnetz

a für die einfache Messung (normaler Betriebszustand); b für die erweiterte Messung (Transfomator G kurzgeschlossen)
 v_x relatives Potential; \times im Netzmodell gemessene Punkte der Abzweigungen und Transfomatorstationen; Φ im Netzmodell gemessener Doppelpol bei A und E

beln, sie haben eine gemeinsame Tangente. Das gilt auch für alle weiteren Abzweigungen.

5.2 Berechnung des Kurzschlusswiderstandes W_{1c}

Wegen der Nichtlinearität wäre die direkte Berechnung von W_{1c} für ein vielfach verzweigtes Netz umständlich und zeitraubend. Es wird deshalb nachstehend ein Berechnungsverfahren angegeben, für dessen Ableitung einige Regeln der Vierpoltheorie benötigt werden [1; 2].

Man kann sich das Netzbild in Fig. 10 an einer beliebigen Stelle x durchschnitten denken, und den zwischen den Klemmen 1, 1' (Unterwerk) und der Schnittstelle liegenden Netzteil als Vierpol betrachten.

Für die Untersuchung eignen sich die Vierpol-Gleichungen in der Kettenform. Sie lauten:

$$U_1 = A_{11} U_2 + A_{12} I_2 \quad (2)$$

$$I_1 = A_{21} U_2 + A_{22} I_2 \quad (3)$$

Die Bezugsrichtungen der Ströme und Spannungen auf der Eingangs- oder Primärseite und der Ausgangs- oder Sekundärseite des Vierpols sind in Fig. 10 eingetragen. Durch die Konstanten A_{11}, A_{12}, \dots sind die Eigenschaften des Vierpols bestimmt. Im vorliegenden Falle handelt es sich bei diesen Konstanten um ortsabhängige Parameter.

Bei passiven Vierpolen hat die Determinante der Kettenmatrix den Wert 1, d. h. $A_{11}A_{22} - A_{21}A_{12} = 1$. Der Vierpol

ist somit bereits durch drei Konstanten bestimmt. Die Bedeutung und die Dimension der Vierpolkonstanten — hier alles reelle Größen — kann durch Leerlauf- und Kurzschlussbetrieb veranschaulicht werden.

Bei primär gespeistem Leerlauf ist:

$I_2 = 0$, die übrigen Größen sind U_{10}, I_{10} und U_{20} . Diese Werte, in die Gl. (2) und (3) eingesetzt, ergeben:

$$A_{11} = \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad \text{primäres Leerlaufspannungsverhältnis (dimensionslos)} \quad (4)$$

$$A_{21} = \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad \text{gegenseitiger Leerlauf-Leitwert} \quad (5)$$

Bei primär gespeistem Kurzschluss ist:

$U_2 = 0$, die übrigen Größen sind U_{1C}, I_{1C}, I_{2C} .

Diese Werte, in die Gl. (2) und (3) eingesetzt, ergeben:

$$A_{12} = \frac{U_{1C}}{I_{2C}} \quad \text{gegenseitiger Kurzschlusswiderstand} \quad (6)$$

$$A_{22} = \frac{I_{1C}}{I_{2C}} \quad \text{primäres Kurzschlußstromverhältnis (dimensionslos)} \quad (7)$$

Dividiert man Gl. (4) durch Gl. (5), so erhält man:

$$\frac{A_{11}}{A_{21}} = \frac{U_{10}}{I_{10}} = W_{10} \quad \text{primärer Leerlaufwiderstand} \quad (8)$$

Ferner ergibt die Division der Gl. (6) durch Gl. (7):

$$\frac{A_{12}}{A_{22}} = \frac{U_{1C}}{I_{1C}} = W_{1C} \quad \text{primärer Kurzschlusswiderstand} \quad (9)$$

Bis dahin wurde noch nichts gewonnen, als dass in Gl. (9) der primäre Kurzschlusswiderstand des Vierpols, der mit dem gesuchten Kurzschlusswiderstand des Netzes identisch ist, durch Vierpolkonstanten ausgedrückt wird.

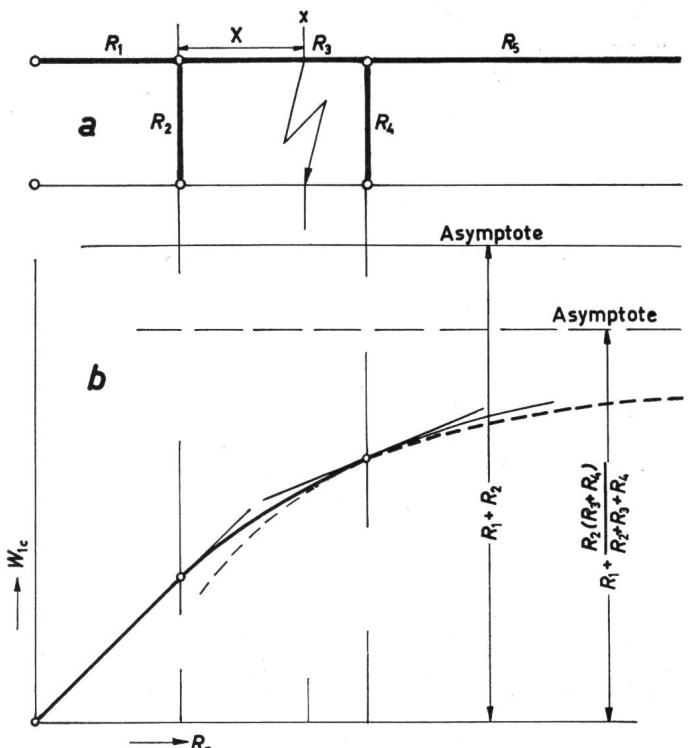


Fig. 9
Verlauf des Kurzschlusswiderstandes
a Schaltbild; b Diagramm

R_1, R_3, R_5 Streckenwiderstände des untersuchenden Leitungszuges; R_2, R_4 Querwiderstände; X kurzgeschlossener Teil von R_3 ; x Kurzschlussstelle; W_{1c} Kurzschlusswiderstand; R_n Streckenwiderstand

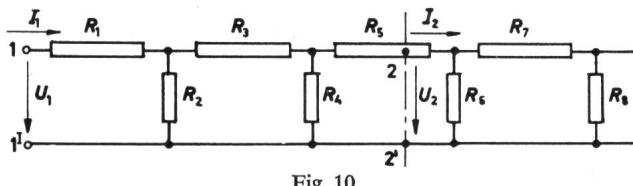


Fig. 10
Das Netz als variabler Vierpol

U_1 Eingangsspannung; U_2 Ausgangsspannung; I_1 Eingangsstrom; I_2 Ausgangstrom; R_1, R_3, R_5, R_7 Streckenwiderstände des zu untersuchenden Leitungszuges; R_2, R_4, R_6, R_8 Widerstände der Abzweigungen; $1, 1'$ Eingangsklemmen (beim Unterwerk); $2, 2'$ Ausgangsklemmen an der Stelle x

Der Vierpol kann aber auch rechtsseitig d. h. sekundär gespeist werden, während die Eingangsklemmen offen bleiben bzw. kurzgeschlossen sind.

Bei sekundär gespeistem Leerlauf sind:

$$I_1 = 0, \quad U_1 = U_{10}, \quad U_2 = U_{20} \quad \text{und} \quad I_2 = -I_{20}$$

Der sekundäre Leerlaufstrom fliesst entgegen der Zählrichtung, deshalb das negative Vorzeichen.

Mit diesen Werten, eingesetzt in die Gl. (2) und (3), erhält man:

$$A_{22} = \frac{U_{20}}{U_{10}} \quad \text{sekundäres Leerlaufspannungsverhältnis} \quad (10)$$

$$A_{21} = \frac{I_{20}}{U_{10}} \quad \text{gegenseitiger Leerlaufleitwert} \quad (11)$$

$$\frac{A_{22}}{A_{21}} = \frac{U_{20}}{I_{20}} = W_{20} \quad \text{sekundärer Leerlaufwiderstand} \quad (12)$$

Bei sekundär gespeistem Kurzschluss sind:

$$U_1 = 0, \quad U_2 = U_{2c}, \quad I_1 = -I_{1c}, \quad I_2 = -I_{2c}$$

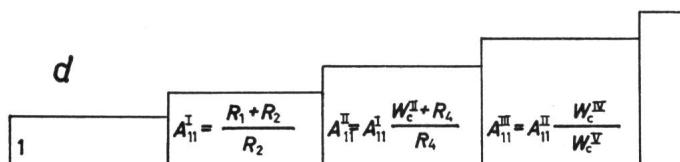
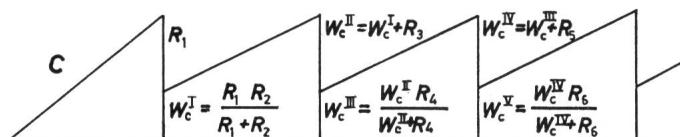
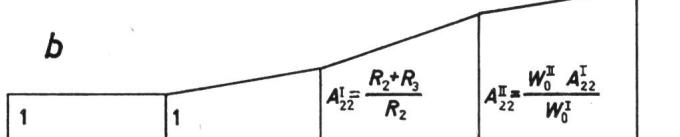
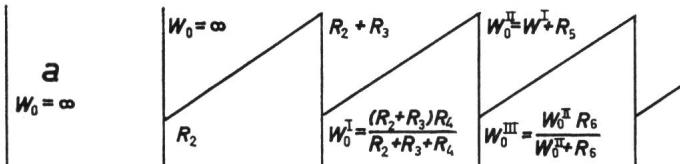


Fig. 11
Berechnung der Vierpol-Parameter des Netzes

a sekundärer Leerlaufwiderstand: W_{20} ; b sekundäres Leerlaufspannungsverhältnis: $A_{22} = \frac{U_{20}}{U_{10}}$; c sekundärer Kurzschlusswiderstand: W_{2c} ;

d sekundäres Kurzschlußstromverhältnis: $A_{11} = \frac{I_{1c}}{I_{1c}}$
Bezeichnungen siehe im Text

Mit diesen Werten, eingesetzt in die Gl. (2) und (3) erhält man:

$$A_{11} = \frac{I_{2c}}{I_{1c}} \quad \text{sekundäres Kurzschlußstromverhältnis} \quad (13)$$

$$A_{12} = \frac{U_{2c}}{I_{1c}} \quad \text{gegenseitiger Kurzschlusswiderstand} \quad (14)$$

$$\frac{A_{12}}{A_{11}} = \frac{U_{2c}}{I_{2c}} = W_{2c} \quad \text{sekundärer Kurzschlusswiderstand} \quad (15)$$

Ein Vergleich der bei primärseitiger Einspeisung abgeleiteten Beziehungen (4) bis (9) mit den entsprechenden sekundärseitigen (10) bis (15) zeigt folgendes:

Das primäre Leerlaufspannungsverhältnis ist identisch mit dem sekundären Kurzschlußstromverhältnis und umgekehrt.

Der gegenseitige Leerlaufleitwert A_{21} ist bei primärer und sekundärer Einspeisung identisch. Er entspricht dem Querleitwert der π -Ersatzschaltung.

Der gegenseitige Kurzschlusswiderstand A_{12} ist bei primärer und sekundärer Einspeisung identisch. Er entspricht dem Längswiderstand der π -Ersatzschaltung.

Gemäss den Gl. (8) und (12) kann der primäre Leerlaufwiderstand aus dem sekundären ermittelt werden:

$$W_{10} = \frac{A_{11}}{A_{22}} W_{20} \quad (16)$$

Gemäss den Gl. (9) und (15) kann der primäre Kurzschlusswiderstand aus dem sekundären ermittelt werden.

$$W_{1c} = \frac{A_{11}}{A_{22}} W_{2c} \quad (17)$$

Der sekundäre Leerlaufwiderstand W_{20} und der sekundäre Kurzschlusswiderstand W_{2c} stehen in linearer Beziehung mit den Leiterstrecken und lassen sich, bei den Klemmen 1, 1' beim Unterwerk beginnend, mit einfachen arithmetischen Beziehungen ermitteln (Fig. 11a und 11c). Ebenso einfach lassen

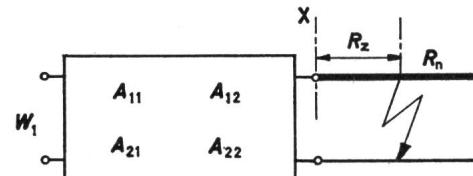


Fig. 12
Ableitung von W_{1c} nach veränderlichem R_z
 W_1 wird W_{1c} für $R_z \rightarrow 0$; R_z Belastungswiderstand; R_n Streckenwiderstand; x untersuchte Netzstelle; $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$ Konstanten der Kettenmatrix

sich die Koeffizienten A_{22} (Fig. 11b) und A_{11} (Fig. 11d) bestimmen. Aus Gl. (17) kann der gesuchte Kurzschlusswiderstand W_{1c} für jeden beliebigen Netzpunkt errechnet werden. Eine Kontrollmöglichkeit bieten die Endpunkte, d. h. die Sternpunkte der Transformatoren, weil hier der Kurzschlusswiderstand dem bereits bekannten Netzwiderstand W_N entsprechen muss.

Der Differentialquotient $\frac{dW_{1c}}{dR_x}$ für die Konstruktion der Tangenten könnte durch Differenzieren der Gleichung (17) nach den variablen Parametern des Vierpols gebildet werden. Noch einfacher ist es aber, den Vierpol für die Netzstelle x als konstant anzunehmen und dessen Eingangswiderstand W_1 nach dem veränderlichen Belastungswiderstand R_z abzuleiten (Fig. 12).

Den Eingangswiderstand W_1 des Vierpols gewinnt man durch Division der Gl. (2) und (3).

Man erhält:

$$W_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{A_{11} U_2 + A_{12} I_2}{A_{21} U_2 + A_{22} I_2} \quad (18)$$

Mit der sekundärseitigen Belastung des Vierpols durch den Widerstand R_z wird:

$$U_2 = R_z I_2 \quad (19)$$

und dies in Gl. (18) eingesetzt, ergibt:

$$W_1 = \frac{A_{11} R_z + A_{12}}{A_{21} R_z + A_{22}} \quad (20)$$

Die Ableitung von W_1 nach dem variablen Belastungswiderstand R_z wird:

$$\frac{dW_1}{dR_z} = \frac{A_{11} A_{22} - A_{12} A_{21}}{(A_{21} R_z + A_{22})^2} \quad (21)$$

Nach der Bemerkung in Abschnitt 5.2 muss der Zähler gleich 1 sein, damit wird:

$$\frac{dW_1}{dR_z} = \frac{1}{(A_{21} R_z + A_{22})^2} \quad (22)$$

Mit der Belastung $R_z = 0$, dem Punkt der interessiert, geht der Eingangswiderstand des Vierpols W_1 in den Kurzschlusswiderstand W_{1c} über und die Ableitung wird:

$$\frac{dW_{1c}}{dR_z} = \frac{1}{(A_{22})^2} \quad (23)$$

Damit kann die Tangente für jeden beliebigen Netzpunkt konstruiert werden. Man wird vor allem die Tangenten in den Abzweigpunkten, wo sie allen drei hier zusammentreffenden Hyperbeln gemeinsam sind, aufzeichnen.

Im Diagramm von Fig. 13 ist der Kurzschlusswiderstand W_{1c} als Ordinate über den Streckenwiderständen als Abszissen für das gesamte Netz nach Fig. 5 aufgezeichnet. Auch in dieser

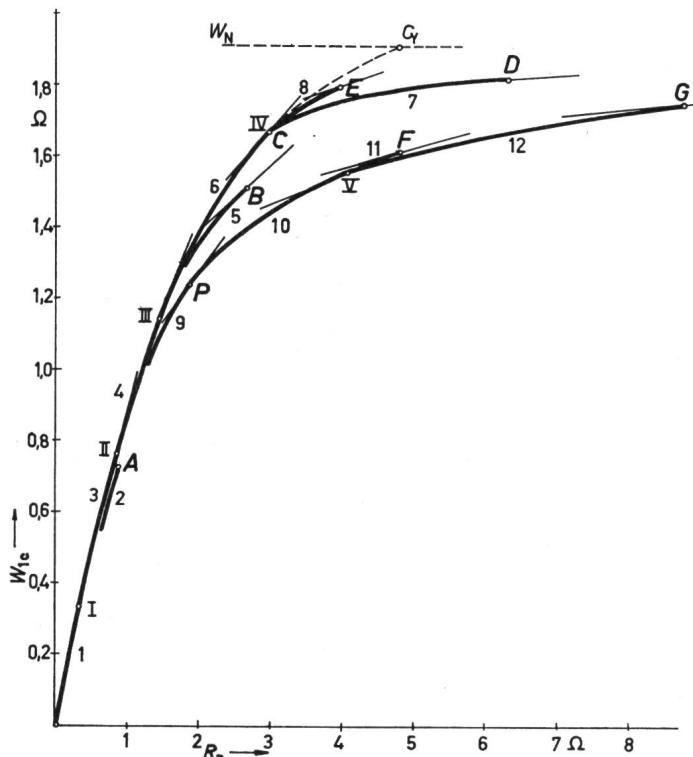


Fig. 13
Kurzschlusswiderstand W_{1c} vom Netz wie Fig. 5
 R_n Streckenwiderstand; W_N Netzwiderstand; C_y Sternpunkt von Transformator C

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 5

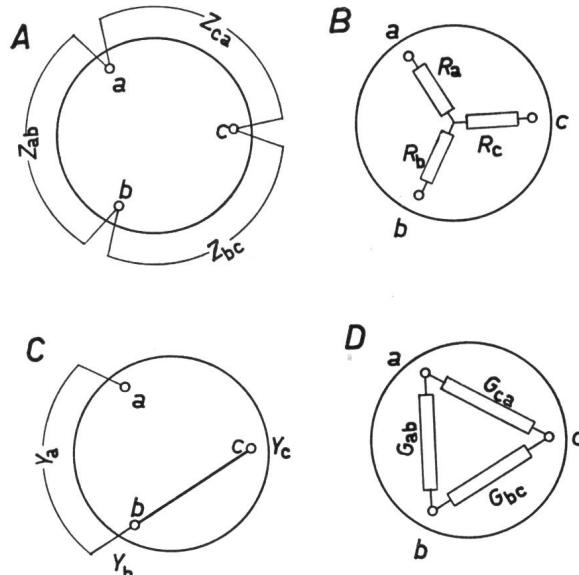


Fig. 14
Darstellung des Dreipols

A durch die äusseren Widerstände Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} (Z immer reell); B durch die Sternersatzwiderstände R_a , R_b , R_c ; C durch die äusseren Kurzschlussleitwerte Y_a , Y_b , Y_c (Y immer reell); D durch die Dreieckersatzleitwerte G_{ab} , G_{bc} , G_{ca} ; a, b, c Klemmen

Darstellung ist der Netzcharakter deutlich erkennbar. Die messtechnische Auswertung wird in Abschnitt 7 behandelt. Vorher werden noch die dazu erforderlichen Beziehungen zwischen den Widerständen eines Dreipols zusammengestellt.

6. Beziehungen zwischen den Widerständen eines Dreipols

Ein Netzwerk von dem drei Klemmen oder Pole zugänglich sind, kann als Dreipol aufgefasst werden, sofern nur die äusseren, d. h. die an den Klemmen messbaren Vorgänge betrachtet werden. Irgend eine Schaltung mit drei Klemmen, die sich gleich verhält in bezug auf diese Klemmen, ist eine äquivalente Schaltung oder ein identischer Dreipol.

6.1 Leerlaufwiderstände und Stern-Ersatzschaltung

Durch die Messung der drei Widerstände zwischen je zwei Klemmen ist ein Dreipol eindeutig bestimmt. Diese Widerstände können als äussere (Leerlauf-)Widerstände des Dreipols bezeichnet werden und sie sollen hier zur deutlichen Unterscheidung von den inneren Widerständen mit Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} bezeichnet werden (Fig. 14a). Die Z sollen im weiteren immer reelle Widerstände bedeuten.

Das Arbeiten mit den direkt messbaren äusseren Widerständen ist aber unbequem und nicht anschaulich. Es ist deshalb allgemein üblich mit den meist fiktiven inneren Widerständen zu rechnen, die auch Ersatzwiderstände genannt werden.

Die einfachste Möglichkeit einen Dreipol nachzubilden und mit den äusseren Widerständen in Beziehung zu bringen, bietet die Stern-Ersatzschaltung, gebildet aus den drei inneren Widerständen R_a , R_b und R_c (Fig. 14B). Zwischen den äusseren (Leerlauf-)Widerständen Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} und den inneren (Sternersatz-)Widerständen R_a , R_b , R_c bestehen die folgenden Beziehungen:

$$\left. \begin{aligned} Z_{ab} &= R_a + R_b \\ Z_{bc} &= R_b + R_c \\ Z_{ca} &= R_a + R_c \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

$$\left. \begin{aligned} R_a &= \frac{Z_{ab} - Z_{bc} + Z_{ca}}{2} \\ R_b &= \frac{Z_{ab} + Z_{bc} - Z_{ca}}{2} \\ R_c &= \frac{-Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Die Summe von zwei äusseren Widerständen Z ist immer grösser, oder mindestens gleich wie der verbleibende Dritte. Das sind die gleichen Beziehungen wie sie zwischen den Seiten eines ebenen Dreiecks bestehen.

Man kann die Klemmen eines Dreipols im Abstand proportional zu den äusseren Widerständen aufzeichnen. Aus diesem Widerstandsdreieck erhält man durch Konstruktion des eingeschriebenen Kreises die Stern-Ersatzwiderstände (Fig. 15A). Die Beziehungen (24) und (25) sind damit geometrisch dargestellt. Diese Stern-Ersatzwiderstände können, unabhängig von einander, alle Werte zwischen 0 und ∞ annehmen.

6.2 Kurzschlussleitwerte und Dreieck-Ersatzschaltung

Die Eigenschaften eines Dreipols sind auch durch Messung der drei äusseren Kurzschlussleitwerte bestimmt. Als Kurzschlussleitwerte Y_a, Y_b, Y_c werden die zwischen der Klemme a (bzw. b, c) einerseits, und den beiden übrigen kurzgeschlossenen Klemmen anderseits, gemessenen Leitwerte bezeichnet (Fig. 14c). Die Y bedeuten hier immer reelle Leitwerte.

Die einfachste Art einen Dreipol durch innere Leitwerte nachzubilden und mit den äusseren Leitwerten in Beziehung zu bringen, besteht in der Dreieck-Ersatzschaltung, gebildet aus den drei inneren Leitwerten G_{ab}, G_{bc}, G_{ca} (Fig. 14D).

Zwischen den äusseren (Kurzschluss-)Leitwerten Y_a, Y_b, Y_c und den inneren (Dreieckersatz-)Leitwerten G_{ab}, G_{bc}, G_{ca} bestehen folgende Beziehungen:

$$\left. \begin{aligned} Y_a &= G_{ab} + G_{ca} \\ Y_b &= G_{ab} + G_{bc} \\ Y_c &= G_{bc} + G_{ca} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} G_{ab} &= \frac{Y_a + Y_b - Y_c}{2} \\ G_{bc} &= \frac{-Y_a + Y_b + Y_c}{2} \\ G_{ca} &= \frac{Y_a - Y_b + Y_c}{2} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Bildet man aus den Kurzschlussleitwerten Y_a, Y_b, Y_c als Seitenlängen proportional dem Leitwert ein Dreieck, so erhält man mit Hilfe des eingeschriebenen Kreises die Dreieck-Ersatzleitwerte G_{ab}, G_{bc}, G_{ca} (Fig. 15B). Diese können unabhängig voneinander alle Werte zwischen 0 und ∞ annehmen.

6.3 Beziehungen zwischen Stern- und Dreieck-Ersatzschaltung

Indem man die äusseren Widerstände durch die Sternersatzwiderstände R und die Dreieckersatzleitwerte G ausdrückt und diese Ausdrücke einander gleichsetzt, erhält man die Beziehungen zwischen den R und G .

Zur Abkürzung können folgende Bezeichnungen eingeführt werden:

$$R_*^2 = R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a \quad (28)$$

R_*^2 entspricht der Determinante der Widerstandsmatrix des aus den Widerständen R_a, R_b, R_c gebildeten T-Gliedes.

$$G_*^2 = G_{ab} G_{bc} + G_{bc} G_{ca} + G_{ca} G_{ab} \quad (29)$$

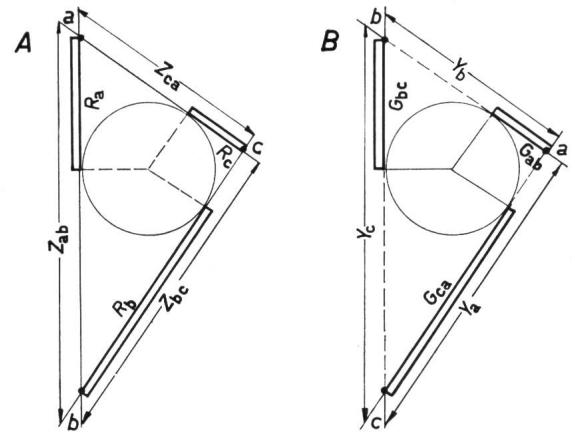


Fig. 15
Geometrische Beziehungen

A zwischen den äusseren und inneren Widerständen; Maßstab k_R in Ω/cm
B zwischen den äusseren und inneren Leitwerten; Maßstab k_G in S/cm
Bezeichnungen siehe Fig. 14

G_*^2 entspricht der Determinante der Leitwertmatrix des aus den Leitwerten G_{ab}, G_{bc}, G_{ca} gebildeten π -Gliedes.

Daraus folgt auch:

$$R_*^2 G_*^2 = 1 \quad (30)$$

Mit diesen Abkürzungen lauten die Beziehungen:

$$\left. \begin{aligned} R_a &= \frac{G_{bc}}{G_*^2} \\ R_b &= \frac{G_{ca}}{G_*^2} \\ R_c &= \frac{G_{ab}}{G_*^2} \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

$$\left. \begin{aligned} G_{ab} &= \frac{R_c}{R_*^2} \\ G_{bc} &= \frac{R_a}{R_*^2} \\ G_{ca} &= \frac{R_b}{R_*^2} \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Aus den Beziehungen (31) und (32) folgt, dass die Dreiecke der Fig. 15a und 15b einander ähnlich sein müssen, wenn sie sich auf identische Dreipole beziehen. In bezug auf die Klemmen sind sie aber seitenverkehrt.

Bei kongruenten Dreiecken wie in Fig. 15A und 15B findet man den Leitwertmaßstab k_G bei gegebenem Widerstandsmaßstab k_R folgendermassen:

$$R_a = l_a k_R$$

$$R_b = l_b k_R$$

$$R_c = l_c k_R$$

l_a, l_b, l_c sind Längen in cm, k_R in Ω/cm

$$R_*^2 = k_R^2 (l_a l_b + l_b l_c + l_c l_a) = k_R^2 A \quad (33)$$

A entspricht einer Fläche in cm^2

Analog ist:

$$G_*^2 = k_G^2 A \quad (34)$$

$$k_G \text{ in } S/cm$$

Mit Gl. (30) erhält man:

$$k_G = \frac{1}{k_R A} \quad (35)$$

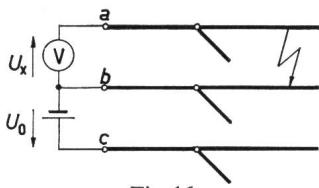


Fig. 16

Messanordnung für die nichtlineare Ortung

a, b, c Abgangsklemmen des Leitungsnetzes; Spannungsverhältnis

$$u_x = \frac{U_x}{U_0}$$

Für die Bestimmung eines Dreipols braucht es immer drei Größen, wobei es sich um die Z , R , Y oder G handeln kann. Auch Größen verschiedener Art sind möglich, sofern sie voneinander unabhängig sind. Ferner kann ein Dreipol auch durch eine der erwähnten absoluten Größen und zwei Verhältniszahlen ausgedrückt werden.

Bei einem *phasensymmetrischen Dreipol* sind die beiden Verhältniszahlen 1 und es genügt somit noch eine absolute Größe zu seiner Bestimmung. Die Beziehungen (31) und (32) gehen über in die trivialen Formen:

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{1}{3G} \\ G &= \frac{1}{3R} \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

und

Bei einem *schenkelsymmetrischen Dreipol* ist eine Verhältniszahl gegeben als 1 und es sind noch zwei weitere Größen bzw. Gleichungen zu seiner Bestimmung notwendig.

Gehen die beiden symmetrischen Schenkel von den Klemmen a und b aus, so ist:

$$Z_{bc} = Z_{ca} = Z$$

$$R_a = R_b = R$$

und die Beziehungen (24) und (25) vereinfachen sich zu:

$$\left. \begin{aligned} Z_{ab} &= 2R \\ R &= \frac{Z_{ab}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

$$Z = R + R_c$$

$$R_c = \frac{2Z - Z_{ab}}{2} \quad (38)$$

Ferner ist:

$$G_{ca} = G_{bc} = G$$

$$Y_a = Y_b = Y$$

und die Beziehungen (26) und (27) vereinfachen sich zu:

$$\left. \begin{aligned} Y &= G + G_{ab} \\ G_{ab} &= \frac{2Y - Y_c}{2} \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

$$Y_c = 2G$$

$$G = \frac{Y_c}{2} \quad (40)$$

Aus Gl. (28) und (29) wird:

$$R_*^2 = R(R + 2R_c)$$

$$G_*^2 = G(G + 2G_{ab})$$

Die Gl. (31) und (32) reduzieren sich auf:

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{1}{G + 2G_{ab}} \\ R_c &= \frac{G_{ab}}{G(G + 2G_{ab})} \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

$$\left. \begin{aligned} G_{ab} &= \frac{R_c}{R(R + 2R_c)} \\ G &= \frac{1}{R + 2R_c} \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Ein schenkelsymmetrischer Dreipol kann durch den äußeren Widerstand Z_{ab} und den äußeren Leitwert Y_c gegeben sein. Die Sternsatzwiderstände sind dann:

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{Z_{ab}}{2} \\ R_c &= \frac{1}{Y_c} - \frac{Z_{ab}}{4} \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

Gl. (43) wird im nächsten Abschnitt benutzt.

7. Die nichtlineare Ortung von isolierten zweipoligen Kurzschlüssen

Für die Ortung von zweipoligen Kurzschlüssen muss der Kurzschlusswiderstand des Netzes nicht direkt gemessen werden, sondern es genügt nach Fig. 16 eine einfache Spannungsmessung. Mit dem Spannungsverhältnis $u_x = U_x/U_0$ ist dann auch hier, analog wie bei der linearen Methode, der Ortungsparameter eine dimensionslose Größe.

Die Berechnung des Spannungsverhältnisses u_x in Funktion des Kurzschlussortes im Netz kann unter Benutzung der in Abschnitt 5 ermittelten Kurzschlusswiderstände W_{1c} erfolgen.

Durch einen Kurzschluss, z. B. zwischen den Leitern a und b , wird das Netz zu einem in bezug auf diese Klemmen schenkelsymmetrischen Dreipol, der durch Z_{ab} und Y_c bestimmt ist, wobei:

$$Z_{ab} = 2W_{1c}$$

$$Y_c = \frac{2}{3W_N}$$

worin

W_{1c} ist nach Abschnitt 5 der einpolige Kurzschlusswiderstand Y_c wird durch den Kurzschluss nicht berührt und bleibt konstant

W_N einpoliger Netzwiderstand

Mit den Beziehungen (43) erhält man die Sternsatzwiderstände:

$$R = W_{1c}$$

$$R_c = \frac{3W_N}{2} - \frac{W_{1c}}{2}$$

und daraus das gesuchte Spannungsverhältnis:

$$\left. \begin{aligned} u_x &= \frac{R}{R + R_c} \\ u_x &= \frac{2W_{1c}}{W_{1c} + 3R_N} \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

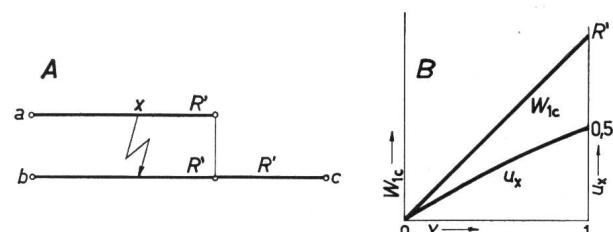


Fig. 17
Einfache Leitung

x Kurzschlußstelle; R' einpoliger Widerstand; a, b, c Abgangsklemmen; W_{1c} Kurzschlusswiderstand; u_x Spannungsverhältnis

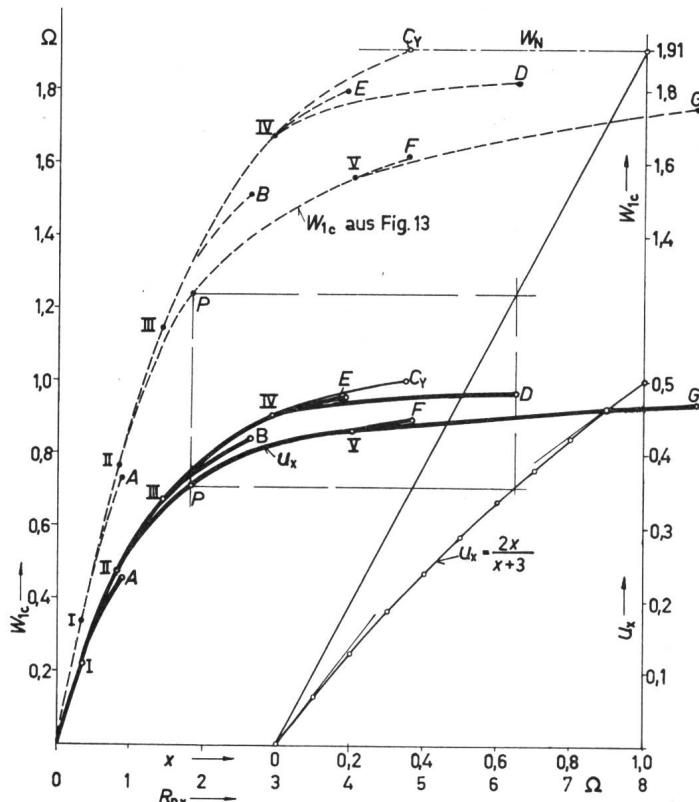


Fig. 18

Diagramm des Spannungsverhältnisses u_x
Bezeichnungen siehe Fig. 5 und Fig. 13

Die Zusammenhänge werden anschaulicher, wenn sie zunächst am Bild der einfachen, unverzweigten und homogenen Leitung betrachtet werden (Fig. 17A).

Der Widerstand eines Leiters ist mit R' bezeichnet und x bedeutet die relative Entfernung vom Leitungsanfang, also $0 \leq x \leq 1$. Der Kurzschlusswiderstand nimmt dann linear mit der Entfernung zu:

$$W_{1c} = x R'$$

und der einpolige Netzwiderstand ist:

$$W_N = R'$$

Mit diesen Werten, eingesetzt in Gl. (44), erhält man:

$$u_x = \frac{2x}{x+3} \quad (45)$$

Wie zu erwarten war, hat der Gesamtwiderstand der Leitung keinen Einfluss auf u_x . Bei der einfachen Leitung entspricht der Verlauf von u_x einem schwach gekrümmten Hyperbelast (Fig. 17B). Mit dem Leiterwiderstand R' gleich dem Netzwiderstand W_N wird Fig. 17A — zunächst im ungestörten Zustand — zum Ersatzbild des verzweigten Netzes. Es gibt aber auch zu jedem Kurzschlussort im Netz eine korrespondierende Stelle x im Ersatzbild, bei der die Kurzschlusswiderstände Z_{ab} und damit die Dreipole identisch sind. Man kann von korrespondierenden Kurzschlussstellen oder kurz von äquivalenten Kurzschlüssen sprechen. Diese Korrespondenz gilt nur bei Kurzschlüssen. Bei Überbrückung der korrespondierenden Kurzschlussstellen über Widerstände oder im offenen Zustand verhalten sich Netz und Ersatzbild verschieden.

Fig. 18 zeigt, wie unter Benutzung der korrespondierenden Kurzschlussstellen, aus dem Diagramm W_{1c} in Funktion der Streckenwiderstände, das entsprechende Diagramm mit u_x gebildet werden kann, das als Grundlage für die Ortung von

zweipoligen Kurzschlüssen dient. Ein Blick auf das Diagramm zeigt, dass die Ortung bei weit entfernten Leitungsstrecken wegen dem flachen Verlauf der Kurven weniger genau ist. Ein Nachteil der Methode liegt darin, dass Übergangswiderstände an der Kurzschlussstelle das Messergebnis fälschen können, ohne dass hierüber eine Kontrollmöglichkeit besteht. Es wird deshalb am Schluss dieser Arbeit eine Methode angegeben, welche diesen Nachteil vermeidet.

In Fig. 19 wird der Einfluss eines Übergangswiderstandes R_F an der Fehlerstelle im Ersatzbild dargestellt. Das gibt bei kleinem R_F eine Annäherung an die Verhältnisse im wirklichen Netz; genau korrespondierende Stellen gibt es nur bei reinem Kurzschluss. Das gleichschenkige Dreieck mit den Seiten R_F und $(1-x)W_N$ der Fig. 19a wird mit Hilfe der Beziehungen (41) in den Stern umgewandelt. Die Ausdrücke für die Sternwiderstände sind in Fig. 19A angegeben. Ist R_F/W_N klein gegenüber $2(1-x)$, so können die Ausdrücke entsprechend vereinfacht werden. Der Übergangswiderstand wirkt sich also annähernd so aus, als ob die Kurzschlussstelle um den Streckenwiderstand $R_F/2$ weiter entfernt wäre.

8. Weitere Störungen

Bisher war von einfachen Erd- und zweipoligen Kurzschlüssen die Rede. Es soll noch kurz auf die etwas weniger häufig auftretenden, dreipoligen Kurzschlüsse und Doppel-erdschlüsse eingegangen werden.

8.1 Dreipolige Kurzschlüsse

Bei dreipoligem Kurzschluss bleibt das Netz phasensymmetrisch. Der phasensymmetrische Dreipol ist durch eine absolute Größe (Widerstand) charakterisiert. Für die Bestimmung des vom Fehlerort abhängigen Widerstandes Z müssen Spannung und Strom gemessen werden. Der gemessene Widerstand Z muss deshalb entsprechend der Umgebungstemperatur und nötigenfalls unter Berücksichtigung des der Störung vorausgegangenen Belastungszustandes auf die dem Diagramm in Fig. 13 zugrundegelegten Temperatur-Werte korrigiert werden. In Fig. 13 sind die einpoligen Werte angegeben, also ist $Z = 2 W_{1c}$.

Bei dreipoligen Störungen besteht meist zwischen mindestens zwei Phasen ein satter Kurzschluss. Sind die drei messbaren Widerstände Z nicht identisch, so wird man jedenfalls nur den kleinsten Wert berücksichtigen.

8.2 Doppelerdchluss

Wenn die Summe der Erdübergangswiderstände $R_{E1} + R_{E2}$ im Verhältnis zum Netzwiderstand gross ist — können die beiden Fehlerstellen aufgrund des Potentialdiagramms (Fig. 8a) annähernd bestimmt werden. Die Potentialverteilung über die

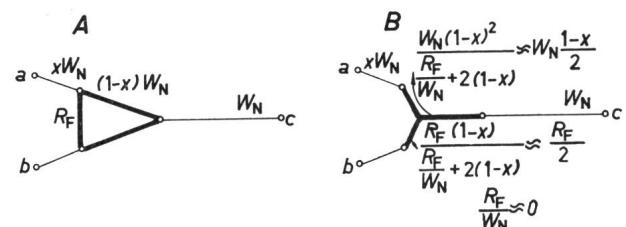


Fig. 19
Übergangswiderstand R_F an der Fehlerstelle
A Schalschema; B Ersatzschema; W_N einpoliger Netzwiderstand
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 13

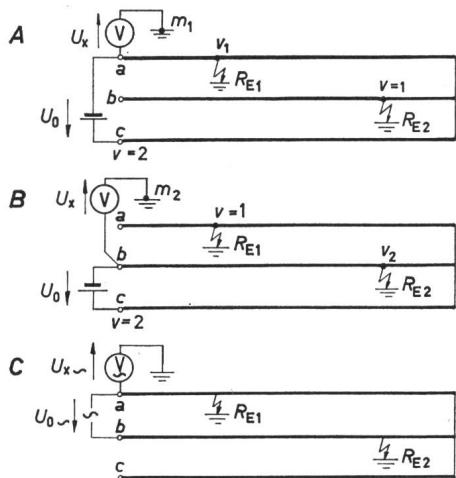


Fig. 20
Doppelerdenschluss

A erste Messung (relatives Potential) $m_1 = \frac{U_x}{U_0}$

B zweite Messung (relatives Potential) $m_2 = \frac{U_x}{U_0}$

C dritte Messung (mit Wechselstrom) $k = \frac{R_{E1}}{R_{E1} + R_{E2}} \approx \frac{U_{x\sim}}{U_{0\sim}}$

a, b, c Abgangsklemmen; R_{E1} , R_{E2} Erdübergangswiderstände; v_1 , v_2 relatives Potential der Fehlerstellen

Leitungsstrecken wird dann durch den über die Erdungsstellen fließenden Strom nur in geringem Masse gestört. Ausser den Potentialen der Fehlerstellen v_1 und v_2 sind auch die Erdübergangswiderstände R_{E1} und R_{E2} unbekannt. Da diese Letzteren als Spannungsteiler wirken, interessiert nur deren Verhältnis:

$$k = \frac{R_{E1}}{R_{E1} + R_{E2}} \quad (46)$$

$$1 - k = \frac{R_{E2}}{R_{E1} + R_{E2}}$$

Zur Bestimmung der Unbekannten v_1 , v_2 und k sind drei Messungen erforderlich.

Bezeichnet man das, als Ergebnis der ersten Messung (Fig. 20A) ermittelte, relative Potential der Erde mit m_1 , wobei:

$$m_1 = \frac{U_x}{U_0'} = \frac{2U_x}{U_0}$$

so besteht folgende Beziehung:

$$m_1 = v_1 + k(1 - v_1)$$

und daraus:

$$v_1 = \frac{m_1 - k}{1 - k} \quad (47)$$

Analog erhält man aus der zweiten Messung (Fig. 20b):

$$m_2 = v_2 + (1 - k)(1 - v_2)$$

und daraus:

$$v_2 = \frac{m_2 - (1 - k)}{k} \quad (48)$$

Es bleibt noch der Faktor k als Unbekannte. Da alle weiteren Gleichstrom-Messungen nicht mehr unabhängig sind, muss für die Bestimmung von k die dritte Messung mit Wechselstrom 50 Hz (Fig. 20c) durchgeführt werden. Bei Wechselstrom ist der Spannungsabfall bis zu den beiden Fehlerstellen verhältnismässig klein.

9. Netzmodell

Netzmodelle, die nur aus Ohmschen Widerständen bestehen, sind einfach und mit geringen Kosten herstellbar. Es sollte deshalb für jedes Netz, d. h. für jede vom Unterwerk abgehende Leitung, ein Modell angefertigt werden. Auf diesen Modellen lassen sich nicht nur die Daten für die Ausarbeitung der Ortungs-Diagramme für alle in Frage kommenden Betriebszustände schnell ermitteln, sondern sie können auch bei Erweiterungen des Netzes entsprechend ergänzt werden. Anhand der Netzmodelle können auch die zweckmässigsten Massnahmen für «erweiterte Messungen» ausprobiert werden.

Für das Netz nach Fig. 5 wurde aus Widerständen, wie sie in der Elektronik verwendet werden ($\frac{1}{4}$ W und Genauigkeitsklasse 5 %), ein Modell zusammengestellt (Fig. 21). Im Potentialdiagramm (Fig. 8) sind die am Modell gemessenen Punkte eingetragen und zeigen gute Übereinstimmung mit der Berechnung.

Es wurde ferner ein Doppelerdenschluss gemäss Abschnitt 8.2 gemessen:

Erdung Phase a bei Station A

Erdung Phase b bei Station E

$$R_{E1} = 81 \Omega, R_{E2} = 117 \Omega$$

daraus folgt:

$$k = 0,41$$

Die Summe der Erdübergangswiderstände von rund 200 Ω entspricht im Netz 20 Ω .

Die Messung ergab bei $U_0 = 3$ V:

$$m_1 = 0,565$$

$$m_2 = 0,91$$

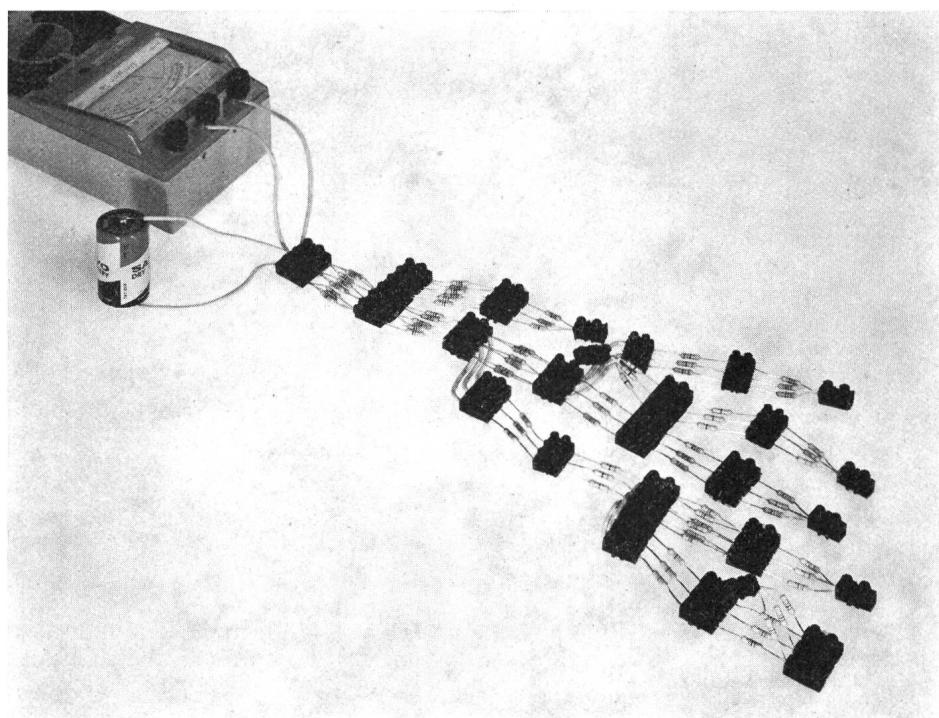


Fig. 21

Netzmodell des Netzes in Fig. 5
Modellwiderstand = 10 × Netzwiderstand

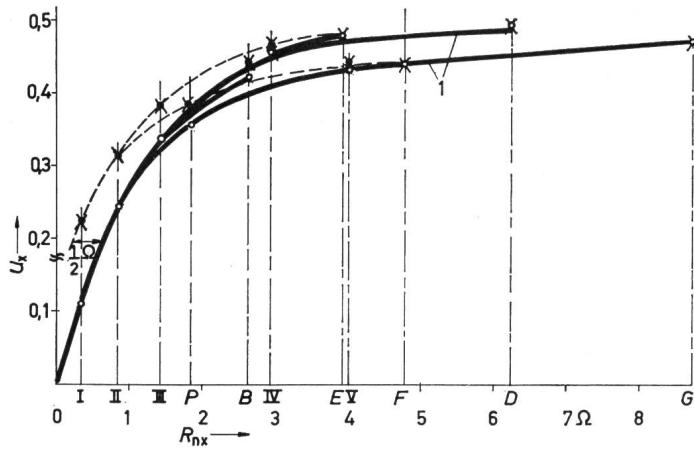


Fig. 22

Messungen im Netzmodell

Messanordnung nach Fig. 16; $U_0 = 3,0 \text{ V}$

- gemessene Punkte bei reinem Kurzschluss; x gemessene Punkte bei $R_F = 10$ (Fig. 19); 1 berechnete Kurve aus Fig. 18
- u_x Spannungsverhältnis; R_nx Streckenwiderstand
- Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 5

Mit den Gl. (47) und (48) erhält man:

$$v_1 = 0,26$$

$$v_2 = 0,78$$

Diese Punkte sind ebenfalls im Diagramm der Fig. 8a eingetragen. In Anbetracht der kleinen Erdübergangswiderstände von nur 20Ω ist das Messergebnis akzeptabel.

Schliesslich sind in Fig. 22 die bei zweipoligem Kurzschluss nach der nichtlinearen Methode gemessenen Punkte einge-

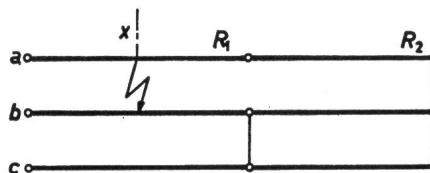


Fig. 23

Asymmetrische Ortung: einfache Leitung

a, b, c Abgangsklemmen; R_1 Leitungswiderstand; xR_1 Fehlerstelle; R_2 Transformatorenwiderstand; xR_1 Widerstand des kurzgeschlossenen Leitungsstückes

tragen und mit der berechneten Kurve verglichen. Auch der am Schluss von Abschnitt 7 erwähnte Einfluss des Übergangswiderstandes R_F wird durch die Messungen bestätigt. Bei den Modellmessungen mit $R_F = 10 \Omega$, entsprechend 1Ω im Netz, wird eine grössere Entfernung von ca. $0,5 \Omega$ vorgetäuscht.

10. Asymmetrische Ortung von isolierten zweipoligen Kurzschlüssen

Die in Abschnitt 7 beschriebene nichtlineare Ortung (symmetrische Methode) beruht auf der Bestimmung des schenkel-symmetrischen Dreipols, den das kurzgeschlossene Netz bildet. Dieser Dreipol ist durch den unverändert bleibenden Netz-widerstand W_N und das variable, vom Fehlerort (und dem Übergangswiderstand R_F) abhängige Spannungsverhältnis u_x vollständig gegeben. Grundsätzlich sind aber für die Ermittlung von Fehlerort und Übergangswiderstand zwei messbare Variable erforderlich. An Stelle des schenkel-symmetrischen muss deshalb der allgemeine (asymmetrische) Dreipol als Grundlage für die Ortung eingeführt werden.

Das Grundprinzip der asymmetrischen Ortung kann am Beispiel der einfachen Leitung erläutert werden:

In Fig. 23 ist R_1 Leiterwiderstand, R_2 Transformator-widerstand. Die Transformatorklemmen der Phasen b und c werden überbrückt; untersucht wird ein Kurzschluss zwischen a und b . Bei sattem Kurzschluss bleibt der Dreipol schenkel-symmetrisch (Fig. 24), hingegen ist nun Y_c , im Gegensatz zur symmetrischen Methode, nicht mehr konstant, sondern ebenfalls variabel.

Rechnet man aus den Widerständen von Fig. 24 u_x aus, so erhält man mit $\alpha = R_2/R_1$:

$$u_x = \frac{x \left[2x - \left(2 + \frac{3}{2} \alpha \right) \right]}{x^2 + 2x - 3(1 + \alpha)} \quad (49)$$

Setzt man in obige Gleichung $\alpha = 0$, d. h. es sind alle Transformatorklemmen überbrückt, so wird:

$$u_x = \frac{2x}{x + 3}$$

die aus Gleichung (45) bekannte Form der symmetrischen Methode.

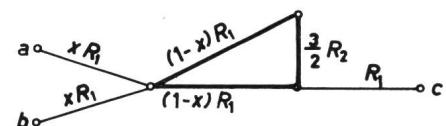


Fig. 24
Asymmetrische Ortung: satter Kurzschluss

Bezeichnungen siehe Fig. 23

Setzt man dagegen $\alpha = \infty$, das bedeutet «Transformator ausgeschaltet», dann wird Gl. (49) zu:

$$u_x = \frac{x}{2}$$

Das ergibt eine Gerade und entspricht der linearen Ortung. Bei endlichem R_2 und α wird der Verlauf von u_x gestreckt, d. h. der in Fig. 18 gezeichnete Hyperbelast:

$$u_x = \frac{2x}{x + 3}$$

nähert sich der Geraden an.

Wie bereits bemerkt, bleibt bei einem reinen Kurzschluss der Dreipol schenkel-symmetrisch, und damit ist u_x (Fig. 26A) identisch mit w_x (Fig. 26B). Dies gibt eine Kontrollmöglichkeit für satten Kurzschluss.

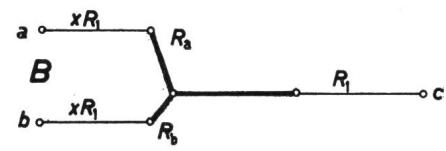
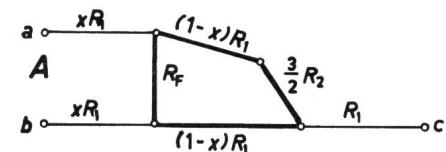


Fig. 25
Asymmetrische Ortung

A Kurzschluss mit Übergangswiderstand; B Ersatzschema von Fig. 25A; R_F Übergangswiderstand
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 23

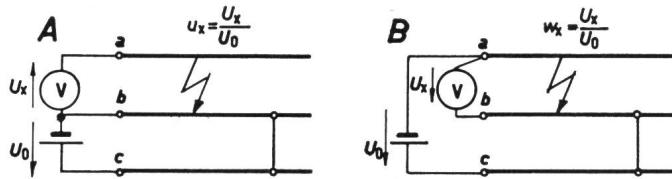


Fig. 26
Asymmetrische Ortung: Messanordnung
 A Messung von u_x ; B Messung von w_x
 Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 16

Bei Störungen mit Übergangswiderstand R_F (Fig. 25) bleibt der Dreipol nicht mehr symmetrisch. Das Widerstandsdreieck der Fig. 25A kann in den äquivalenten Stern nach Fig. 25B umgewandelt werden. Der grössere Anteil von R_F tritt im Ersatzwiderstand R_a in Erscheinung. Je grösser der überbrückte Widerstand R_2 und das Verhältnis α ist, um so kleiner wird der Anteil von R_F im Ersatzwiderstand der Phase b . Damit wird u_x in verminderter Masse vom Übergangswiderstand R_F abhängig. Es kann mit Hilfe der Messung von w_x auch die Grösse von R_F beurteilt werden.

Mit der asymmetrischen Ortung können im verzweigten Netz auch Störungen im Hauptstrang von solchen in den Abzweigungen auseinandergehalten werden. Während nämlich bei sattem Kurzschluss auf dem Hauptstrang (d. h. im Leiterzug der die Überbrückungsstelle speist) der Dreipol symmetrisch bleibt, ist dies bei den Abzweigungen nicht der Fall.

Analog wie im Falle der einfachen Leitung R_2 möglichst gross zu wählen ist, soll im verzweigten Netz der Widerstand zwischen den gestörten Leitern (ohne Berücksichtigung des Kurzschlusses) möglichst gross sein. Das kann durch Ausschalten von Transformatoren geschehen. Könnte man alle

Transformatoren ausschalten, so würde das der linearen Ortung entsprechen. Im Falle des Netzes von Fig. 5 sind folgende Massnahmen für die asymmetrische Ortung zweckmässig: Überbrücken der nicht gestörten und einer gestörten Phase in Station C bei gleichzeitigem Ausschalten der beiden dortigen Transformatoren. Dazu sind die beiden grossen Transformatoren der beim Unterwerk gelegenen Station A auszuschalten.

11. Zusammenfassung

Alle angegebenen Methoden basieren auf den Ohmschen Netzwiderständen und Messungen mit Gleichstrom. Erdschlüsse und zweipolige Kurzschlüsse mit Erdberührung können mit der linearen Methode geortet werden, die besonders präzise und zuverlässige Resultate verspricht. Die Ortung von isolierten, zweipoligen Kurzschlässen kann dagegen nach der nicht-linearen (symmetrischen) Methode erfolgen oder, falls grössere Ansprüche an Zuverlässigkeit und Genauigkeit gestellt werden, durch die mehr Aufwand erfordernde asymmetrische Ortung.

Auch die Ortung von dreipoligen Kurzschlässen und Doppel-erdenschlüssen wurde angegeben. Am Beispiel eines angenommenen Netzes wurden die erforderlichen Diagramme berechnet und mit Messungen an einem Netzmodell verglichen.

Literatur

- [1] A. von Weiss: Einführung in die Matrizenrechnung zur Anwendung in der Elektrotechnik. München, Oldenbourg, 1961.
- [2] R. Feldtkeller: Einführung in die Vierpoltheorie der elektrischen Nachrichtentechnik. 8. Auflage. Stuttgart, Hirzel, 1962.
- [3] K. Küpfmüller: Einführung in die theoretische Elektrotechnik. 6. Auflage. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer, 1959.

Adresse des Autors:

H. Linder, dipl. Ingenieur ETH, Langärristrasse 3, 8117 Fällanden.