

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 69 (1978)

Heft: 3

Artikel: Ersatzimpedanzen von Niederspannungs-Einleiterkabeln

Autor: Balzer, G.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-914840>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 01.04.2025

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

Ersatzimpedanzen von Niederspannungs-Einleiterkabeln

Von G. Balzer

Für die Dimensionierung der elektrischen Anlagen und Betriebsmittel sowie die Beurteilung der Selektivität von Überstromunterbrechern und der Anschlussmöglichkeiten von Phasenanschnittsteuerungen, Schweißmaschinen usw. ist die Kenntnis der kleinsten und grössten Kurzschlußströme in bestimmten Netzpunkten unerlässlich. In der Schweiz bestehen noch keine einheitlichen Regeln für die Bestimmung der Kurzschlußströme in Niederspannungsnetzen, und es werden deshalb jeweils unter anderem die Leitsätze VDE 0102, Teil 2/11.75 beigezogen. In diesen Leitsätzen sind die Mit- und Nullimpedanzen nur für Vierleiterkabel angegeben. Einige Elektrizitätswerke in der Schweiz verwenden jedoch in ihren Niederspannungsnetzen Einleiterkabel, für welche heute die Grundlagen der Berechnung der Impedanzen fehlen. Der vorliegende Artikel von G. Balzer schliesst hier eine Lücke. Dank den ermittelten Ersatzimpedanzen wird es mit den Leitsätzen des VDE möglich sein, die minimalen und maximalen Kurzschlußströme und Spannungsabfälle in Verteilnetzen mit Einleiterkabeln zu bestimmen. Ch. Oester

Afin de pouvoir déterminer le dimensionnement des installations électriques et des moyens d'exploitation et évaluer la sélectivité de coupe-surintensité et les possibilités de raccordement de dispositifs commandés par déplacement du point d'allumage, de machines de soudage, etc., il est indispensable de connaître les courants de court-circuit minimaux et maximaux à des points déterminés du réseau. Il n'existe en Suisse encore aucune règle uniforme permettant de déterminer les courants de court-circuit dans les réseaux à basse tension. C'est pourquoi on se réfère chaque fois, entre autres, aux normes VDE 0102, section 2/11.75. Ne sont indiquées dans ces normes que les impédances directes et les impédances monophasées pour câbles à quatre conducteurs. Quelques entreprises d'électricité suisses utilisent toutefois dans leurs réseaux à basse tension des câbles unipolaires, pour lesquels il n'existe aujourd'hui pas de base de calcul des impédances. Le présent article de M. G. Balzer comble cette lacune. Grâce aux valeurs d'impédances équivalentes que l'auteur a déterminées, il sera dorénavant possible de calculer à l'aide des normes VDE les courants de court-circuit minimaux et maximaux et les chutes de tension dans les réseaux de distribution à câbles unipolaires. Ch. Oester

1. Einleitung

Die Bestimmung der Kurzschlußströme ist für die Dimensionierung der elektrischen Anlagen, grösste Ströme, und für die Einstellung des Netzschutzes, kleinste Ströme, unerlässlich. Aus diesem Grunde ist es sinnvoll, die zur Berechnung erforderlichen Impedanzen für alle Betriebsmittel in Tabellenform aufzuführen, um dem Anwender in der Praxis die Berechnung der Kurzschlußströme zu vereinfachen.

Während bei zyklisch symmetrischen Betriebsmitteln die Angabe einer Mitimpedanz möglich ist, ist dieses bei Einleiterkabelsystemen, zum Beispiel in Einebenenordnung, auf Grund der Definition der Mitimpedanz nicht mehr der Fall. Darüber hinaus ist auch eine einfache Bestimmung der unsymmetrischen Kurzschlußströme (Rückleitung über Erde) schwierig.

In der Schweiz werden in Niederspannungsnetzen der Elektrizitätsversorgungsunternehmen wesentlich mehr Einleiterkabelsysteme verwendet, als dieses in Deutschland der Fall ist. Die Verwendung von Einleiterkabeln hat vielfach den Vorteil einer einfacheren Reparatur im Störfall, dem jedoch grössere Investitionskosten gegenüberstehen.

Ziel dieser Untersuchung ist es, Ersatzmit- und Ersatznullimpedanzen von Einleiterkabeln anzugeben, die aus den grössten und kleinsten Kurzschlußströmen bei unsymmetrischer Verlegung berechnet werden, zur Ermöglichung einer einfachen Bestimmung der Kurzschlußströme zur Dimensionierung der Anlagen und Auslegung des Netzschutzes mit Hilfe der symmetrischen Komponenten.

Die verwendeten Formelzeichen und Grössen sind in der Tabelle I zusammengestellt.

2. Bestimmung der Kurzschlußströme und der Ersatzimpedanzen am Beispiel des Kabels $4 \times 1 \times 95 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$

2.1 Mögliche Verlegungsarten

Der Berechnung der Kurzschlußströme wurde die bei der Bernischen Kraftwerke AG übliche Verlegungsart der Einleiterkabel zugrunde gelegt. Dabei handelt es sich um Kabel mit Bleimänteln, die gemeinsam in Rohren aus Kunststoff oder Beton mit einem Innendurchmesser von 150 mm verlegt sind (Fig. 1). Zur Berechnung der Kurzschlußströme werden zwei Vereinfachungen getroffen:

Verwendete Formelzeichen und Grössen

Tabelle I

Formelzeichen:	Indizes:
\underline{U} Spannung	N Nennwert
\underline{I} Strom	T Transformator
c Spannungsfaktor	k Kurzschluss
\underline{Z} Impedanz	1p, 2p, 3p ein-, zwei-, dreipolig
q Querschnitt	1 Mitsystem
	0 Nullsystem
	min, max Minimum, Maximum
	E Erde

Grösste und kleinste Kurzschlußströme eines Einleiterkabelsystems mit einer Länge von $l = 1 \text{ km}$ und einem Nennquerschnitt von $q_N = 95 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$

Tabelle II

Fehlerfall	Beträge der Phasenströme (kA)	
	I_{kmin}	I_{kmax}
$I_{k1p}^{1)}$	0,4107	0,5606
$I_{k1p}^{2)}$	0,5039	0,6593
$I_{k2p}^{3)}$	0,7114	0,9710
$I_{k2pE}^{2)}$	0,6908	1,0444
$I_{k3p}^{3)}$	0,7760	1,1842
$I_{k3pE}^{2)}$	0,7470	1,2127

1) Rückstrom nur über 4. Leiter

2) Rückstrom über 4. Leiter, Mantel und Erde

3) Nur die Aussenleiter sind am Kurzschluss beteiligt

Bestimmung des grössten und kleinsten zweipoligen Kurzschlußstroms

Tabelle III

Fehlerfall	Beträge der Phasenströme (kA)	
	I_{kmin}	I_{kmax}
$I_{k2p}^{1)}$	0,7114	0,9710
$I_{k2pE}^{1)}$	0,6908	1,0444
$I_{k2p}^{2)}$	0,672	1,0255
$I_{k2pE}^{2)}$	0,640	1,0641

1) Berechnung mit Hilfe des Rechenprogramms

2) Berechnung mit Hilfe der symmetrischen Komponenten \underline{Z}_{1min} , \underline{Z}_{1max}
 \underline{Z}_{0min} , \underline{Z}_{0max}

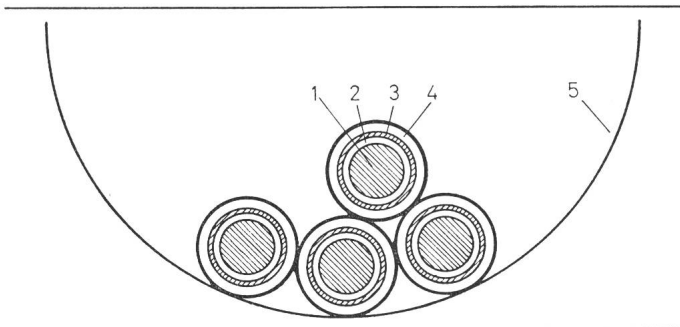


Fig. 1 Anordnung eines Einleiterkabelsystems (4x95 mm² Cu) im Schutzrohr (Innendurchmesser 150 mm)

- 1 Kupferleiter 3 Bleimantel 5 Schutzrohr
2 Papierisolierung 4 Juteumhüllung

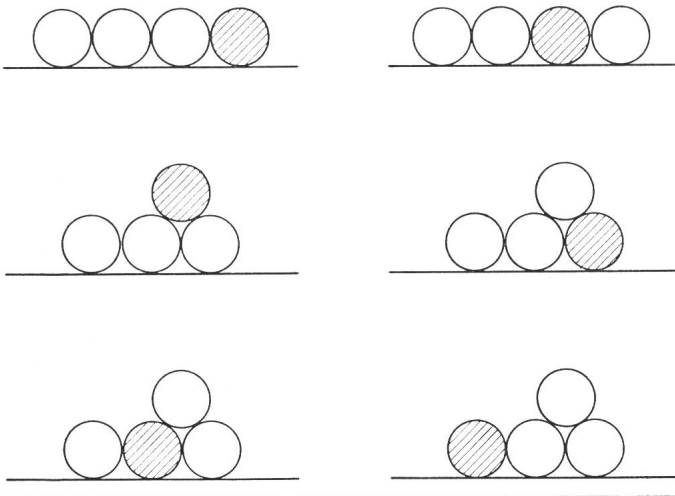


Fig. 2 Verlegungsmöglichkeiten eines Einleitersystems mit Nulleiter

- Polleiter
◐ Nulleiter

a) Die Einleiterkabel liegen in den Schutzröhren direkt neben- oder aufeinander.

b) Die Einleiterkabel liegen auf einer Ebene. Die Abweichungen in der Berechnung der Kurzschlußströme sind nur minimal, so dass diese Annahme zulässig ist.

Unter diesen Voraussetzungen können die nach Fig. 2 möglichen Kombinationen der Verlegungsart eines Dreiphasensystems mit Nulleiter gefunden werden.

In der Praxis werden stets Kombinationen dieser Verlegungsmöglichkeiten auftreten, so dass die nach Abschnitt 2.3 ermittelten Ersatzimpedanzen auf der sicheren Seite liegen, da hierbei nur die ungünstigste Verlegung betrachtet wird.

2.2 Bestimmung der Kurzschlußströme

Mit Hilfe eines Rechenprogramms werden die Kurzschlußströme in den einzelnen Leitern für alle Verlegungsmöglichkeiten nach Fig. 2 bestimmt, wobei sämtliche Kopplungen zwischen den Polleitern, Nulleitern, Mänteln und der Erde berücksichtigt werden.

Als Quellenspannung wird ein symmetrisches Drehspannungssystem mit den Spannungsbeträgen cU_{NT} ($U_{NT} = 412$ V) verwendet. Für den Spannungsfaktor c gilt bei der Berechnung der grössten Kurzschlußströme $c = 1,0$ und bei den kleinsten Kurzschlußströmen $c = 0,95$.

Die so ermittelten minimalen und maximalen Kurzschlußströme eines Einleitersystems mit einer Länge von 1 km und einem Nennquerschnitt von $q_N = 95$ mm² Cu für die verschiedenen Fehlerarten zeigt Tabelle II.

Bei der Bestimmung des kleinsten Kurzschlußstroms wird eine maximale Betriebstemperatur von 60 °C angenommen.

2.3 Bestimmung der Ersatzimpedanzen

Aus den nach Abschnitt 2.2 ermittelten Kurzschlußströmen lassen sich Ersatzimpedanzen für die Berechnung der Ströme mit Hilfe der symmetrischen Komponenten bestimmen.

Aus dem grössten dreipoligen Kurzschlußstrom I_{kmax} berechnet sich die kleinste Ersatzimpedanz des Mitsystems zu:

$$Z_{1min} = \frac{cU_{NT}/\sqrt{3}}{I_{kmax}} \quad \text{mit } c = 1,0. \quad (1)$$

Die grösste Ersatzimpedanz wird aus dem kleinsten dreipoligen Kurzschlußstrom I_{kmin} bestimmt zu:

$$Z_{1max} = \frac{cU_{NT}/\sqrt{3}}{I_{kmin}} \quad \text{mit } c = 0,95. \quad (2)$$

Elektrische und geometrische Grössen der Kabeltypen

Tabelle IV

Querschnitt q_N mm ² /Cu	Leiterradius mm	Mantel- innenradius mm	Mantel- ausserradius mm	Leiter- resistenz ¹⁾ Ω/km	Mantel- resistenz Ω/km	Ausserradius mm
6	1,4	3,0	4,1	2,911	8,722	7,0
10	1,8	3,4	4,5	1,735	7,839	7,0
16	2,5	3,85	4,95	1,107	7,037	7,5
25	3,15	5,05	6,15	0,698	5,529	9,0
35	3,75	5,6	6,7	0,504	5,035	9,5
50	4,35	6,4	7,6	0,371	4,055	10,5
70	5,2	7,45	8,65	0,257	3,526	11,5
95	6,15	8,35	9,65	0,185	2,911	12,5
120	6,9	9,1	10,4	0,147	2,687	13,0
150	7,8	10,0	11,3	0,120	2,460	14,0
185	8,65	11,05	12,45	0,0953	2,070	15,0
240	10,1	12,3	13,8	0,0725	1,740	16,5

¹⁾ Gemäss SEV 3062.1972 – 2 % Fabrikationstoleranz

Ersatzimpedanzbeläge der Einleiterkabelsysteme zur Bestimmung der kleinsten und grössten Kurzschlußströme

Tabelle V

Querschnitt q_N mm ²	Z'_{1max} Ω/km	Z'_{1min} Ω/km
6	3,419 + j0,191	2,883 + j0,173
10	2,057 + j0,177	1,706 + j0,155
16	1,332 + j0,162	1,077 + j0,138
25	0,861 + j0,160	0,669 + j0,134
35	0,638 + j0,151	0,475 + j0,127
50	0,487 + j0,146	0,344 + j0,123
70	0,357 + j0,137	0,232 + j0,117
95	0,275 + j0,126	0,162 + j0,111
120	0,231 + j0,117	0,125 + j0,105
150	0,198 + j0,110	0,099 + j0,101
185	0,167 + j0,103	0,076 + j0,097
240	0,137 + j0,095	0,054 + j0,092

Die symmetrische Ersatznullimpedanz wird mit Hilfe des einpoligen Kurzschlußstroms aus der Schleifenimpedanz $(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0)/3$ bestimmt. Hieraus folgt für die kleinste Ersatznullimpedanz:

$$(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0)_{\min} = \frac{\sqrt{3} c \underline{U}_{NT}}{\underline{I}_{k\max}} \quad \text{mit } c = 1,0 \quad (3)$$

$$\underline{Z}_{0\min} = \frac{\sqrt{3} c \underline{U}_{NT}}{\underline{I}_{k\max}} - 2\underline{Z}_{1\min}$$

mit $\underline{Z}_{1\min}$ aus Gleichung (1).

Für die grösste Ersatznullimpedanz zur Bestimmung des kleinsten Kurzschlußstroms folgt:

$$(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0)_{\max} = \frac{\sqrt{3} c \underline{U}_{NT}}{\underline{I}_{k\min}} \quad \text{mit } c = 0,95 \quad (5)$$

$$\underline{Z}_{0\max} = \frac{\sqrt{3} c \underline{U}_{NT}}{\underline{I}_{k\min}} - 2\underline{Z}_{1\max} \quad (6)$$

mit $\underline{Z}_{1\max}$ aus Gleichung (2).

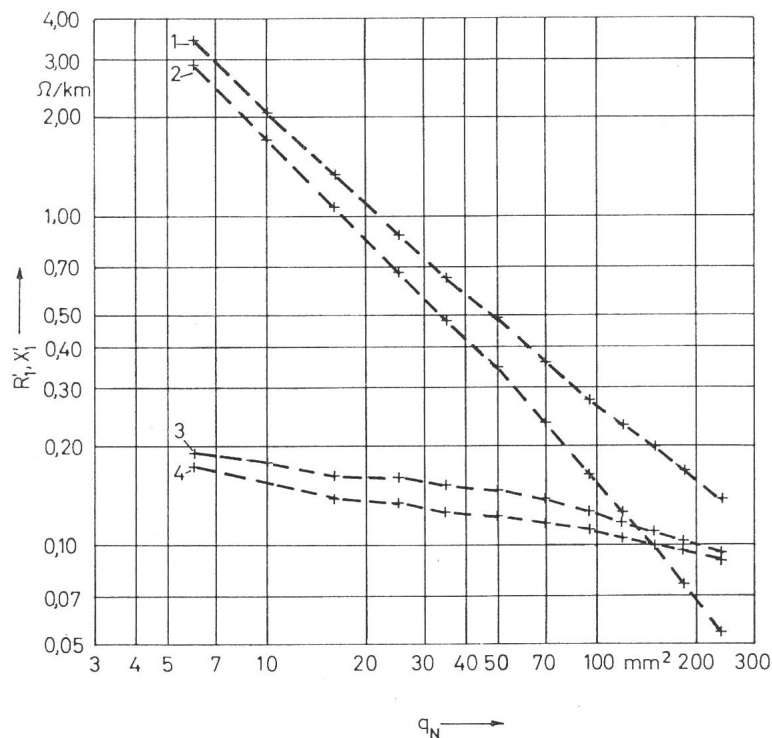


Fig. 3
Mitreisistanz- und Mitreaktanobelag von Einleiterkabeln in Abhängigkeit vom Leiterquerschnitt q_N
1 $R'_{1\max}$ 2 $R'_{1\min}$ 3 $X'_{1\max}$ 4 $X'_{1\min}$

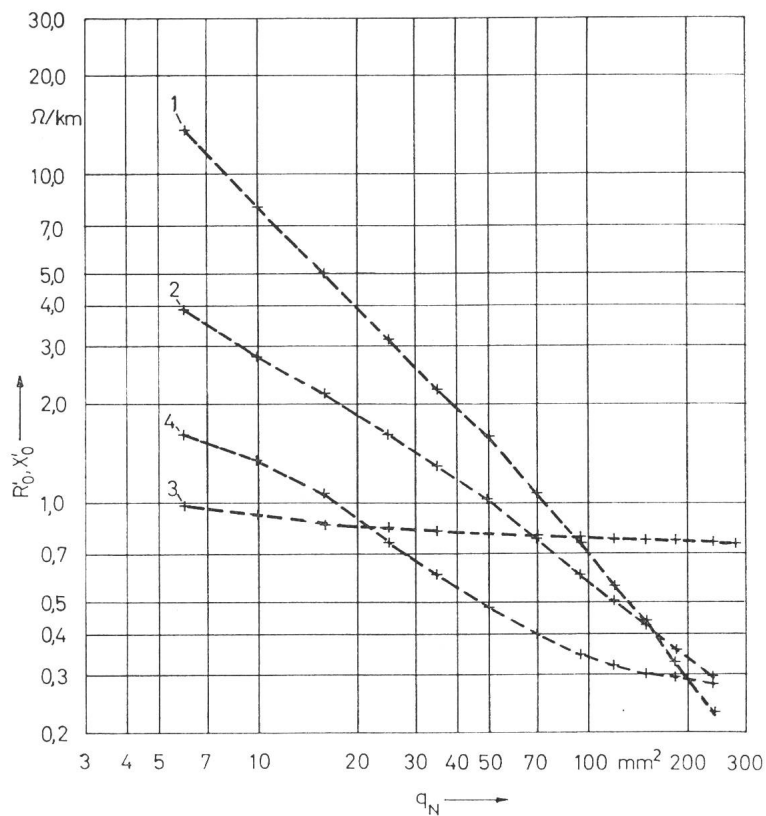


Fig. 4
Nullresistanz- und Nullreaktanobelag von Einleiterkabeln in Abhängigkeit vom Leiterquerschnitt q_N
1 $R'_0\max$ 2 $R'_0\min$ 3 $X'_0\max$ 4 $X'_0\min$

Mit Hilfe der Kurzschlußströme nach Tabelle II lassen sich somit folgende Impedanzen berechnen:

$$\begin{aligned} Z_{1\max} &= 302,5 \text{ m}\Omega & \underline{Z}_{1\max} &= (275,2 + j125,7) \text{ m}\Omega \\ Z_{1\min} &= 196,2 \text{ m}\Omega & \underline{Z}_{1\min} &= (161,9 + j110,8) \text{ m}\Omega \\ Z_{0\max} &= 1092,6 \text{ m}\Omega & \underline{Z}_{0\max} &= (757,1 + j787,7) \text{ m}\Omega \\ Z_{0\min} &= 690,9 \text{ m}\Omega & \underline{Z}_{0\min} &= (599,8 + j343,0) \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

Die so ermittelten Ersatzimpedanzen ermöglichen jetzt die Berechnung der grössten und kleinsten ein- und dreipoligen Kurzschlußströme.

Darüber hinaus liegen die aus den Ersatzimpedanzen \underline{Z}_1 und \underline{Z}_0 mit Hilfe der symmetrischen Komponenten bestimmten zweipoligen Kurzschlußströme jeweils auf der sicheren Seite, wie Tabelle III zeigt.

3. Ersatzimpedanzen der Einleiterkabelsysteme

Mit dem im Abschnitt 2 beschriebenen Verfahren lassen sich die Ersatzimpedanzen für die in der Tabelle IV aufgeführten Kabeltypen bestimmen.

Ersatznullimpedanzbeläge der Einleiterkabelsysteme zur Bestimmung der kleinsten und grössten Kurzschlußströme Tabelle VI

Querschnitt q_N mm ²	$\underline{Z}_{0\max}$ Ω/km	$\underline{Z}_{0\min}$ Ω/km
6	13,371 + j0,992	3,910 + j1,615
10	7,928 + j0,927	2,790 + j1,350
16	5,022 + j0,859	2,142 + j1,061
25	3,126 + j0,846	1,603 + j0,758
35	2,222 + j0,819	1,294 + j0,601
50	1,601 + j0,810	1,028 + j0,480
70	1,068 + j0,795	0,778 + j0,396
95	0,757 + j0,788	0,600 + j0,343
120	0,558 + j0,776	0,503 + j0,319
150	0,438 + j0,770	0,428 + j0,306
185	0,326 + j0,771	0,359 + j0,294
240	0,230 + j0,765	0,296 + j0,282

3.1 Ersatzmitimpedanzen

Die Ersatzmitimpedanzen zur Bestimmung der grössten und kleinsten Kurzschlußströme sind nach Gleichung (1) und Gleichung (2) für alle in Tabelle IV aufgeführten Kabeltypen berechnet. Tabelle V und Fig. 3 geben die Werte der Mitimpedanzbeläge in Abhängigkeit vom Leiterquerschnitt wieder.

3.2 Ersatznullimpedanzen

Die nach den Gleichungen (4) und (6) berechneten Ersatznullimpedanzbeläge sind in der Tabelle VI und in Fig. 4 in Abhängigkeit vom Leiterquerschnitt dargestellt.

4. Zusammenfassung

Eine exakte Bestimmung der Kurzschlußströme von Einleiterkabelsystemen in Niederspannungsnetzen ist aufgrund der unsymmetrischen Verlegung schwierig. Mit Hilfe eines Rechenprogramms werden die Ströme für alle Fehlerarten unter Berücksichtigung der Verlegungsmöglichkeiten für die in der Schweiz üblichen Einleiterkabeltypen bestimmt. Aus den so ermittelten maximalen und minimalen Kurzschlußströmen erfolgt die Bestimmung der grössten und kleinsten Ersatzmit- und Ersatznullimpedanzbeläge, die in Tabellen und Bildern angegeben werden.

Aus diesen Ersatzimpedanzbelägen ist eine einfache Ermittlung der maximalen und minimalen Kurzschlußströme für alle Fehlerarten unter Verwendung der symmetrischen Komponenten möglich.

Literatur

- [1] VDE-Leitsätze für die Berechnung der Kurzschlußströme, Drehstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V, DIN 57102, Teil 2/VDE 0102, Teil 2/11.75.
- [2] G. Balzer: Impedanzmessungen in Niederspannungsnetzen zur Bestimmung der Kurzschlußströme. Diss. TH Darmstadt 1977.
- [3] G. Balzer: Innenimpedanzen von Niederspannungsnetzen. Bull. SEV/VSE Jg. 67 (1976)16, S. 859-864.

Adresse des Autors

G. Balzer, Dr.-Ing., BBC AG, Postfach 351, D-6800 Mannheim (war zur Zeit der Abfassung des Berichtes wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Energieversorgung, Technische Hochschule Darmstadt).