Schutzleiterprobleme in Niederspannungs-Elektroanlagen

Autor(en): **Mazan, H.**

Objekttyp: **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): **65 (1974)**

Heft 9

PDF erstellt am: **03.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-915396

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Schutzleiterprobleme in Niederspannungs-Elektroanlagen

Von H. Mazan

62-78 : 621.316.9 : 621.311.4.02.2

Der Schutz des Menschen vor den Gefahren, die der tägliche Umgang mit elektrischen Apparaten und Anlagen mit sich bringt, ist eine wichtige, aber auch schwierige Aufgabe. Die bestehenden Vorschriften berücksichtigen wohl eine Vielzahl von Gefahrenquellen. In Ausnahmefällen vermögen sie jedoch nicht zu genügen. Mit Vorteil wird bei der Behandlung der Schutzaufgabe Wert auf eine umfassende Betrachtungsweise gelegt, indem die verschiedenen Einflussgrössen des Schutzsystems analysiert werden. Die Wahl der Schaltelemente, die Dimensionierung des Schutzleiters sowie die Integrierung des Blitzschutzes beeinflussen nicht nur die Schutzwirkung, sondern auch die Kosten des Schutzsystems.

La protection des personnes contre les dangers que présente l'utilisation d'appareils et installations électriques est une tâche importante, mais difficile. Les Prescriptions en vigueur tiennent compte d'un grand nombre de sources de danger. Toutefois, dans des cas exceptionnels, elles ne sont parfois pas suffisantes. Quand on s'occupe de la protection, il est donc préférable de considérer l'ensemble des circonstances et d'analyser les différentes grandeurs d'influence du système de protection. Le choix des éléments de couplage, le dimensionnement du conducteur de protection, ainsi que l'intégration de la protection contre la foudre, ont une influence non seulement sur l'effet de la protection, mais aussi sur le coût du système de protection.

1. Einleitung

In seinem Buch über Schutzmassnahmen in elektrischen Anlagen schreibt *E. Homberger,* dass Elektrounfälle vorwiegend auf Fehler an den Einrichtungen, verbunden mit dem Versagen der Schutzvorkehren, zurückzuführen sind. Die Nullung ist eine dieser Massnahmen und der Schutzleiter wiederum ein Element davon.

Für die Sicherheit der Elektroanlage wird von Gesetzes wegen viel verlangt. Obwohl der Aufbau eines Schutzleitersystems bis zu 20 % der gesamten Installationskosten verursacht, ist offenbar die Schutzwirkung trotzdem nicht in jedem Fall gegeben.

2. Problemstellung

Die Sicherheit von Elektroanlagen hängt weitgehend von deren Isolationszustand ab. Ein Isolationsdefekt verursacht deshalb eine Funktionsbeeinträchtigung der Anlage und Gefährdung des Menschen. Aufgabe des für diesen Fall zu erstellenden Schutzsystems ist es, Mensch und Material vor Schäden zu bewahren und dies mit möglichst geringem Aufwand (Fig. 1).

3. Einflussgrössen

Um die zu erwartende Schutzfunktion mit minimalen Kosten erfüllen zu können, müssen die Einflussgrössen bekannt sein. Diese lassen sich in folgende 3 Gruppen gliedern:

- Anlagebedingte Einflussgrössen
- Personenbezogene Einflussgrössen
- Umweltbedingte Einflussgrössen

3.1 Anlagebedingte Einflussgrössen

Das Verhalten elektrischer Anlagen lässt sich vorausbestimmen, sofern die Eigenschaften der Anlageelemente sowie deren Kombination bekannt sind. Im wesentlichen handelt es sich um folgende Grössen:

- Quellenleistung, -spannung, -impedanz
- Leiterimpedanzen
- Abschaltcharakteristiken der Schaltelemente
- Isolation der stromführenden Elemente.

3.2 Personenbezogene Einflussgrössen

Die Wirkung elektrischer Ströme, die durch den menschlichen Körper fliessen, hängt von der Grösse und Einwirkdauer ab. Die medizinische Studiengruppe der UNIPEDE hat in ihrem Bericht Nr. 90 eine graphische Darstellung im Sinne einer Empfehlung veröffentlicht, die die Schwellenwerte der für den Menschen gefährlichen Stromstärken in Funktion der Einwirkzeit wiedergibt [Bull. SEV 64(1973)20a, Seite 1355, Fig. 1]. In der Praxis wird das Kriterium der gefährlichen Spannung in Funktion der Einwirkzeit bevorzugt, obwohl dadurch viele unbekannte Variablen auftreten. Um bei einer gegebenen Einwirkspannung auf den menschlichen Körper fliessenden Strom schliessen zu können, müssen der Körperwiderstand, die Kontaktfläche, der Kontaktdruck u. a. bekannt sein. Insbesondere variiert der Körperwiderstand in einem grossen Bereich, weil er nicht nur abhängig ist von der Spannung, sondern auch von der Hautbeschaffenheit und deren Feuchtigkeit sowie vom Stromweg. In der Literatur sind Extremwerte für den Körperwiderstand zwischen 750 und 6000 Ω zu finden. Im Gegensatz zu Abschn. 3.1 lässt sich folglich die Wirkung der Berührungsspannung auf den Menschen nicht exakt voraussagen. Vor-

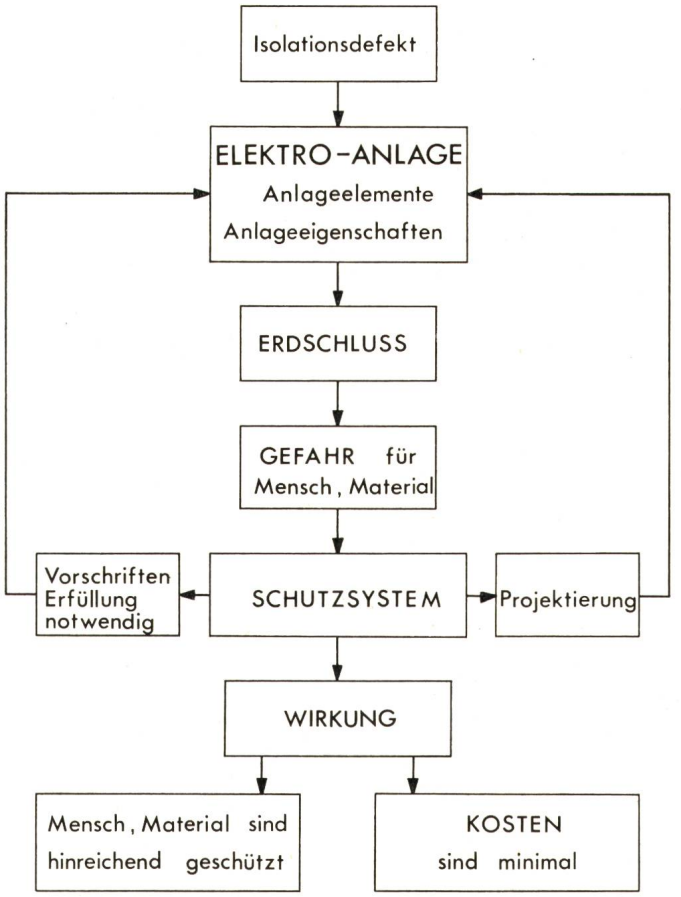

Fig. 1 Beziehungsschema
Isolationsdefekt, Gefährdung, Schutzsystem

schriften, die auf dieser Basis aufbauen, vermögen demzufolge jeweils nur für einen speziellen Fall zu befriedigen. Für alle andern sind sie entweder zu streng oder dann zu schwach abgefasst, woraus das Schutzsystem einerseits unnötig hohe Kosten verursacht und anderseits keinen genügenden Schutz bietet.

3.3 Umweltbedingte Einflussgrössen

Der Einsatz von Elektroanlagen und die Anwendung von elektrischen Verbrauchern ist vielfältig. Bestimmend für den Erdschluss sind folgende Kriterien: Feuchtigkeit, Umgebungstemperatur, Gefahr der Isolationsbeschädigung, atmosphärische Einwirkungen (Blitz), Bauart des Gebäudes, Baumaterialien u. a.

4. Diskussion über die einschlägigen Hausinstallationsvorschriften des SEV (HV)

4.1 Forderung nach dem Personenschutz

Der Personenschutz ist in den HV Art. 23 2 geregelt, insbesondere betreffend Fehlerspannung ist folgendes ausgesagt:

- Die Fehlerspannung darf nicht über 50 V ansteigen können.
- Übersteigt die Fehlerspannung 50 V, so darf sie nicht länger als 5 s bestehen bleiben können.

Im Entwurf über Schutzmassnahmen gegen gefährliche Einwirkspannung [s. Bull. SEV 62(1971)19] der Starkstromverordnung wird für Niederspannungsanlagen das Gleiche verlangt. Hingegen sollen die Einwirkspannungen herrührend von Hochspannungsanlagen die in Funktion der Zeit aufgetragenen Werte der Fig. 1 im Bull. SEV 62(1971)20, Seite 1000, nicht überschreiten. Es stellt sich hier die Frage nach dem Grund der ungleichen Beurteilung von zwei weitgehend identischen Sachlagen.

Ausserdem fällt auf, dass die Werte der zulässigen Einwirkspannung in Funktion der Einwirkzeit mit den empfohlenen Stromwerten der medizinischen Studiengruppe der UNIPEDE Bericht Nr. 90 angenähert korrespondieren, falls ein konstanter Körperwiderstand von 4000 Ω angenommen wird. Ob der Widerstand von 4000 Ω richtig, zu hoch oder zu niedrig angesetzt ist, dürfte eine Ermessensfrage sein.

4.2 Schutzmassnahmen

Eine wichtige Schutzmassnahme ist die Nullung nach Schema I der HV. Die nachfolgenden Betrachtungen sollen speziell auf diese Nullungsart ausgerichtet sein. In den HV existieren zwingende Vorschriften für die Wahl, die Anordnung und Bemessung des Schutzleiters.

Durch die Wahl und Dimensionierung des Schutzleiters ist der Erdschlußstromkreis bestimmt, und die Strom- und Spannungsverhältnisse lassen sich bei gegebenen Quellen- und Phasenleiterdaten berechnen. Weil aber auch die Einwirkdauer von Interesse ist, kommt den Charakteristiken der Schaltelemente grosse Bedeutung zu. An Schaltelementen kommen grundsätzlich in Frage:

- normale Sicherungen
- Niederspannungshochleistungssicherungen (NHS)
- Leitungsschutzschalter
- Geräteschutzschalter, Motorschutzschalter
- Leistungsschalter
- Fehlerstromschutzschalter
- Kombination Sicherung/Schalter.

Bei der Auswahl müssen notwendigerweise die Grenzen berücksichtigt werden. Der Einsatz von Sicherungen ist problematisch, weil bei Verwendung von trägen Sicherungen die Auslösung in vielen Fällen zu spät erfolgen wird, also der Personenschutz nicht erfüllt ist. Flinke Sicherungen verhalten sich diesbezüglich gut, weisen aber den Nachteil auf, gelegentlich schon bei grossen Einschaltströmen abzuschalten.

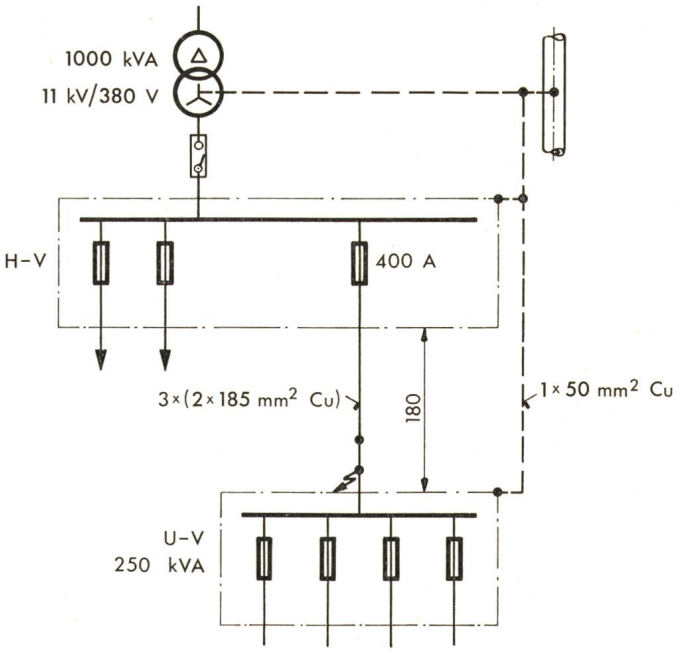

Fig. 2 Übersichtsschema
H - V Haupt-Verteilung
U - V Unter-Verteilung
180 180 m

Geräteschutzschalter und kleine Leistungsschalter lösen sehr rasch aus, sind jedoch in vielen Fällen nicht in der Lage, den vollen Kurzschlußstrom abzuschalten.

Die Verwendung von Fehlerstromschutzschaltern als Ersatz für den Schutzleiter kann aus prinzipiellen Gründen vorerst noch nicht in Frage kommen. Im besten Fall wird er als zusätzliche Sicherheit in der Anlage eingebaut.

Schliesslich bleibt als weitere Massnahme auf der Seite der Schaltelemente die Möglichkeit der Kombination von trägen Sicherungen mit dem Leistungsschalter. Die Sicherung übernimmt dabei die Abschaltung des vollen Kurzschlußstromes und der Leistungsschalter alle übrigen Erdschlußströme. Diese Lösung ist teuer und somit nur ausnahmsweise anwendbar.

Bei grossen Anlagen mit Phasenleiterquerschnitten, z. B. > 150 mm², die mit trägen NHS ausgerüstet sind, genügt der

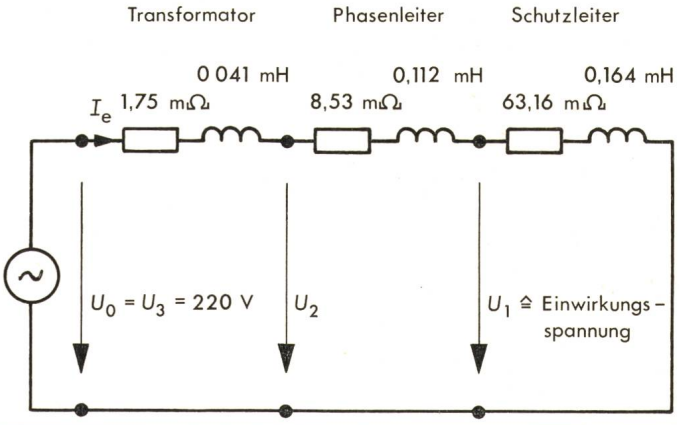

Fig. 3 Ersatzschaltbild für Erdschlusskreis

```
ERDSCHLUSS 2
************

U0 (V)?
      220.000000*
F (HZ)?
       50.000000*
MTK-CU (1/0)?
        0.004000*
SW-CU (WS/KG.0)?
      400.000000*

ANZ.GLIEDER?
        3.000000*
R (V/A)
L (VS/A)
G (KG)    ?
        0.063158*
        0.000165
       80.400000*

        0.008535*
        0.000112
      595.000000*

        0.001750*
        0.000041*
      100.000000*

T0 (0)?
       25.000000*
N?
        5.000000*
ZM?
      2.15443469*
M?
       10.000000*
```

ZEIT (S)		0.215443
STROM (A)		1773.054882
SPANNUNG 1 (V)		145.204992
SPANNUNG 2 (V)		200.103559
SPANNUNG 3 (V)		220.000000
TEMP 1...G (0)		26.439323
		25.026214
		25.031980
	0.010000	0.464159
	1975.606157	1769.726994
	158.254598	145.468978
	205.794093	200.170878
	220.000000	220.000000
	25.156951	27.984591
	25.002865	25.054205
	25.003496	25.066130
	0.021544	1.000000
	1789.434192	1762.540243
	146.091618	146.037299
	200.787631	200.315940
	220.000000	220.000000
	25.236005	31.323756
	25.004308	25.114164
	25.005255	25.139284
	0.046416	2.154435
	1775.356765	1746.986853
	145.029062	147.258890
	200.061421	200.628380
	220.000000	220.000000
	25.390861	38.562325
	25.007132	25.241735
	25.008701	25.294941
	0.100000	4.641589
	1774.597756	1713.242045
	145.082427	149.869418
	200.072318	201.299027
	220.000000	220.000000
	25.723090	54.346386
	25.013187	25.509179
	25.016087	25.621316
		10.000000
		1640.279951
		155.324208
		202.713773
		220.000000
		89.058847
		26.051772
		26.283688

Fig. 4
Berechnung eines Erdschlusses

MTK-CU mittlerer Temperaturkoeffizient
SW-CU spez. Wärme des Kupfers
T0 Leiteranfangstemperatur
N Berechnungszahl pro Zeitintervall
ZM Zeitmultiplikator
M Anzahl Zeiten

Schutzleiter mit einem Querschnitt von 50 mm² gemäss HV 41 213.5 nicht mehr in allen Fällen. Es bleiben nur die Möglichkeiten, entweder die Schutzleiterimpedanz zu verringern (Vergrösserung des Querschnitts oder Verkürzung der Schutzleiterlänge) oder Einsatz eines Leistungsschalters.

Diese Behauptung soll am folgenden Beispiel begründet werden: Von einer grösseren Hauptverteilung aus wird ein Unterverteiler (U-V) gespeist, der seinerseits eine Anzahl Verbraucher versorgt. Es wird angenommen, dass im U-V ein Erdschluss auftritt (Fig. 2).

Daraus ergibt sich das zugehörige Ersatzschaltbild für den Erdschlußstromkreis (Fig. 3).

Im weiteren werden folgende Voraussetzungen gemacht:

- Vernachlässigung aller zusätzlichen Erdverbindungen
- Vernachlässigung der 11-kV-Netzimpedanz
- Erdschluss tritt irgendwo im U-V auf, jedoch vor einer der Querschnittsabgangssicherungen.

Berechnet werden:

- Erdschlußstrom $I_e = f(t)$
- Spannungen U_1 und $U_2 = f(t)$
- Leitertemperaturen $= f(t)$

wobei für die Bestimmung des Erdschlußstromes I_e folgendes gilt:

$$I_e = \frac{U_0}{Z}\left[1 + \sqrt{2}\left(\frac{X}{Z}\right) e^{-\frac{R}{L}t}\right]$$

Für die Ermittlung der Leitertemperaturen wird folgende Beziehung verwendet:

$$R\, I_e^2(t) = (\alpha_K A_K + \alpha_S A_S)\, \vartheta + G\, c \frac{d\vartheta}{dt}$$

Darin bedeuten:

Z Gesamtimpedanz des Erdschlusskreises (Ω)
R Gesamtwiderstand des Erdschlusskreises (Ω)
X Gesamtreaktanz des Erdschlusskreises (Ω)
L Gesamte Induktivität des Erdschlusskreises (VS/A)
α_K Wärmeübergangszahl für Konvektion (W/m² °C)
A_K Konvektionsfläche des Leiters (m²)
α_S Wärmeübergangszahl der Strahlung (W/m² °C)
A_S Strahlungsfläche des Leiters (m²)
ϑ Temperatur des Leiters (°C)
G Leitergewicht (kg)
c mittlere spez. Wärme $\left(\frac{Ws}{kg\ ^0C}\right)$

Mit Hilfe eines Tischcomputers wurde die Berechnung nach Fig. 4 durchgeführt.

Ergebnis:

Es fällt auf, dass die Einwirkspannung gefährlich hohe Werte erreicht. Am höchsten ist sie kurz nach dem Eintritt des Erdschlusses, nämlich bei 10 ms 158,25 V; aber auch nach beispielsweise 4,64 s ist die Spannung am Gehäuse immer noch 149,8 V. Interessant ist auch festzustellen, wie sich die Leitererwärmung auf die Einwirkspannung auswirkt. Trotz abnehmendem Erdschlußstrom erhöht sich die Spannung. Dieser Effekt ist dann von Bedeutung, wenn der Erdschluss längere Zeit bestehen bleibt und sich der Schutzleiter in bezug auf den Phasenleiter stark erwärmen kann.

Die Erwärmung des Schutzleiters tritt besonders bei kleinen Leiterquerschnitten auf, wobei in kürzester Zeit Temperaturen von einigen hundert Grad Celsius entstehen können.

Sofern die Phasenleiter mit Sicherungen von 400 A NHS, träge, ausgerüstet werden, ist eine Unterbrechung des Stromkreises innerhalb der vorgeschriebenen Zeit fragwürdig. Noch extremer werden die Verhältnisse beim Einsatz von flinken Querschnittssicherungen 600 A NHS. Selbst wenn man davon ausgeht, dass unter günstigsten Bedingungen innerhalb von 3 s abgeschaltet wird, bleibt das Problem der hohen Einwirkspannung.

Dieses Beispiel stellt wohl einen Ausnahmefall dar. Es zeigt aber deutlich, dass vor allem bei grossen Anlagen ein sorgfältiges Abwägen aller Einflussgrössen unumgänglich ist und dass mit der strikten Einhaltung der einschlägigen Dimensionierungsvorschriften noch nicht alles Notwendige getan ist.

5. Blitzschutz

Bei der Planung von Elektroanlagen für Neubauten ist es vorteilhaft, die Blitzschutzanlage mit dem Schutzleitersystem zu kombinieren. Besonders bei Stahlskelettbauten drängt sich diese Massnahme auf. Sofern die Metallkonstruktion eine genügend feine Maschenweite aufweist und vollständig galvanisch verbunden ist, wirkt das Ganze als ein Faraday-Käfig. Da die Metallkonstruktion wiederum mit dem Schutzleitersystem vielfach verbunden werden muss, ergibt dies nicht nur einen weitgehend perfekten, sondern zugleich preiswerten Blitzschutz.

6. Ausführungsprobleme

Die Schutzleiterimpedanz ist von erheblicher Bedeutung, weil diese wiederum weitgehend die Grösse des Erdschlußstromes und die Einwirkspannung bestimmt. Diese Impedanz ist einerseits abhängig von Leiterlänge und -querschnitt und anderseits von der Verlegungsart und den Übergangswiderständen an den Verbindungsstellen. Aufgrund von Messwerten lässt sich darlegen, dass die Übergangswiderstände bei sorgfältiger Ausführung der Installation vernachlässigbar klein sind. Sofern aber diese Voraussetzung nicht erfüllt ist, können die Übergangswiderstände hohe Werte annehmen. Dies trifft insbesondere für Aluminium-Schutzleiter zu, bei denen die Oxydschicht nicht fachgerecht und dauerhaft entfernt wurde. In bezug auf die Verlegungsart sollte auch die Vergrösserung der Induktivität bei getrennt von den Phasenleitern verlegtem Schutzleiter berücksichtigt werden. Rechnerisch lassen sich aber die exakten Reaktanzen bei ausgedehnten Schutzleitersystemen nur schwierig erfassen, weil der Abstand des Schutzleiters zum Phasenleiter vielfach nicht ausreichend definiert ist. Hingegen lassen sich gute Resultate erzielen, indem man einen fiktiven Rückleiter zwischen die wichtigsten, wahrscheinlichen Strompfade legt, den Abstand zum Phasenleiter ermittelt und daraus die Reaktanz bestimmt.

Falls Wasserleitungen oder andere Eisenteile, die am Schutzleitersystem angeschlossen sind, bei der Bestimmung der Schutzleiterimpedanz berücksichtigt werden sollen, ist zu beachten, dass diese Schleifen infolge des Skineffektes relativ hohe Reaktanzen aufweisen.

Literatur

[1] *W. Schrank:* Schutz gegen Berührungsspannungen. Schutzmassnahmen gegen elektrische Unfälle durch Berührungsspannungen in Niederspannungsanlagen. 3. Auflage. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1958.

[2] *E. Homberger:* Schutzmassnahmen in elektrischen Anlagen. Aarau, Verlag «Der Elektromonteur», 1973.

[3] *G. Jansen:* Die Schutzmassnahme Nullung bei Erdschluss von Verbrauchern. ETZ-B 24(1972)5, S. 118...119.

Adresse des Autors:

H. Mazan-Bäbler, Dipl. El.-Ing. ETH, Ing.-Büro Sauber+Gisin, 8034 Zürich.