

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: 92 (2001)

Heft: 23

Artikel: Berührungsspannungen und Ausschaltzeiten beim Fehlerschutz mit automatischer Ausschaltung

Autor: Biegelmeier, Gottfried

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-855787>

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: 15.04.2026

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

Berührungsspannungen und Ausschaltzeiten beim Fehlerschutz mit automatischer Ausschaltung

Dieser Beitrag nimmt Stellung zum Entwurf für eine Revision der Norm IEC 60364-4-41 «Schutz gegen elektrischen Schlag». Insbesondere kritisiert der Autor die in der Norm vorgeschlagenen Ausschaltzeiten. Diese gewährleisten seiner Ansicht nach die Personensicherheit nicht in ausreichendem Mass. Man kann vorbringen, dass die Ablösung der Schutzerdung durch Nullung bei uns schon lange im Gange ist und dass die Argumente des Autors für unser Land daher kaum mehr relevant sind. Leider ist man in Europa noch lange nicht überall so weit, weshalb uns ein Abdruck dieses Beitrages doch sinnvoll zu sein scheint. Der Leiter der SEV-Ausbildung, Jost Keller, nimmt Stellung.

Für die Schutzmassnahmen gegen elektrischen Schlag durch automatisches Ausschalten stehen in den nationalen und internationalen Normengremien Ausschaltzeiten zur Diskussion, die in technischer und elektropathologischer Hinsicht fragwürdig sind. Tabelle I zeigt die Aus-

Gottfried Biegelmeier

schaltzeiten des neuesten internationalen Entwurfes für eine Revision von IEC 60364-4-41 «Schutz gegen elektrischen Schlag» [1], die für den Schutz von tragbaren elektrischen Betriebsmitteln (Stromkreise mit Steckdosen) vorgeschlagen werden.

Der Stein des Anstosses

Erstaunlich und sicherlich falsch ist, dass dabei nicht zwischen TN- und TT-Systemen unterschieden wird. Obwohl die Klassifizierung der Netzsysteme hinsichtlich der Erdungen [2] nicht eindeutig Massnahmen des Fehlerschutzes zugeordnet werden kann, wird in dieser Arbeit das TN-System mit «Nullung» und das TT-System mit «Schutzerdung» im klassischen Sinn bezeichnet.

In dem genannten IEC-Entwurf [1] wird für Endstromkreise mit festangeschlossenen Betriebsmitteln und für Verteilerstromkreise eine Ausschaltzeit von 5 s genannt. Für Verteilernetze im TN-

System (genullte Netze) werden keine Angaben über höchstzulässige Ausschaltzeiten für Kurzschlüsse L-PEN gemacht. Ausserdem wird versucht, zwischen Stromkreisen innerhalb und ausserhalb von Gebäuden zu unterscheiden. In der Folge werden diese Vorschläge sowohl auf Grund des neuesten Wissensstandes der Elektropathologie, als auch hinsichtlich technischer Gegebenheiten einer Kritik unterzogen.

Die Bedeutung der Ausschaltzeiten für den schädlichen elektrischen Schlag

Der schädliche elektrische Schlag kann wie folgt definiert werden: *elektropathologische Wirkungen, die vorübergehend oder dauernd die Gesundheit eines Menschen oder Nutztieres beeinträchtigen können.*

Anmerkung: Sekundärwirkungen, die durch unwillkürliche starke Muskelreaktionen hervorgerufen werden (zum Bei-

spiel Sturz von einer Leiter) sind in dieser Definition enthalten. Elektrisierungen, die nur eine Schreckreaktion verursachen, sind davon ausgenommen (etwa Berührungsströme von wenigen zehn Milliampere a.c. oder d.c.).

Der schädliche elektrische Schlag ist also dadurch gekennzeichnet, dass seine Wirkungen vorübergehend oder dauernd die Gesundheit von Menschen oder Nutztieren beeinträchtigen können. Dies erfolgt in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle durch eine Schädigung der Herzfähigkeit (bei Unfällen mit tödlichem Ausgang meist durch Herzkammerflimmern) oder durch starke unwillkürliche Muskelreaktionen, die Sekundärnfälle verursachen können.

Es ist naturgemäss schwierig, bei den unwillkürlichen starken Muskelreaktionen die Folgen zu beurteilen. Einige zehn Milliampere a.c. oder d.c. verursachen eine starke Elektrisierung, die aber, wenn sie nur kurze Zeit dauert (zum Beispiel Bruchteile von Sekunden) kaum zu einem Sekundärnfall führen (derartige Elektrisierungen werden in [3] beschrieben). Andererseits muss man bei einigen hundert Milliampere, auch bei Einwirkungszeiten von nur einigen Hundertstelsekunden, zum Beispiel damit rechnen, dass eine Person weggeschleudert wird.

Für die elektropathologischen Wirkungen auf den Menschen finden sich in IEC 60479 Teil 1 und 2 Angaben, wobei die folgenden Bilder 1 und 2 den neuesten Stand des Wissens für a.c. 50/60 Hz und d.c. wiedergeben [4].

Zur konventionellen Festlegung des Linienzuges c, unterhalb dem das Risiko für das Auftreten von Herzkammerflimmern vertretbar ist, kann Folgendes bemerkt werden.

Der konstante Wert von 1 A für Einwirkungszeiten kürzer als 0,2 s wurde aus Tierversuchen mit Schweinen, Hunden und Schafen abgeleitet, wobei von einer

50 V < U _o ≤ 120 V		120 V < U _o ≤ 230 V		230 V < U _o ≤ 400 V		U _o > 400 V	
a.c.	d.c.	a.c.	d.c.	a.c.	d.c.	a.c.	d.c.
0,8 s	5 s	0,4 s	5 s	0,2 s	0,4 s	0,1 s	0,1 s

Tab. I Höchstzulässige Ausschaltzeiten für Steckdosenstromkreise bis 32 A Nennstrom und tragbare Betriebsmittel der Schutzklasse I für TN- und TT-Systeme nach [1]

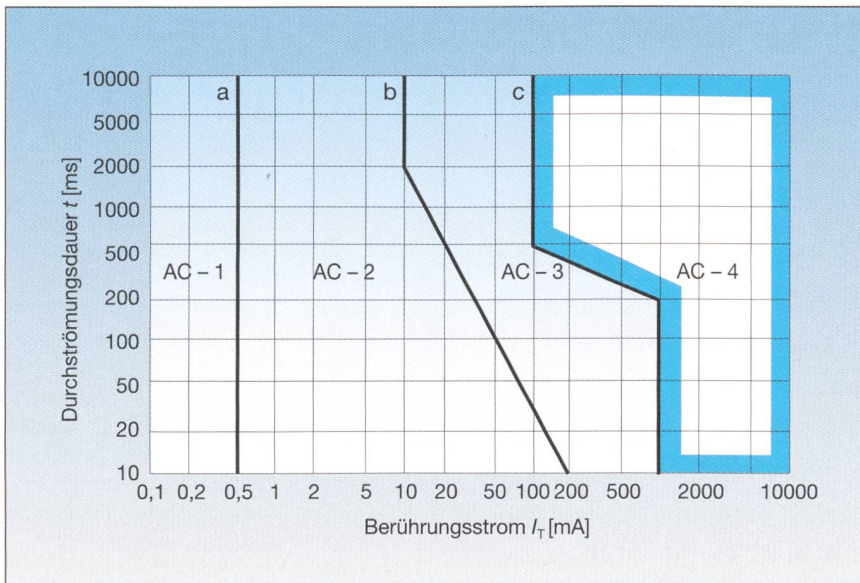


Bild 1 Vereinfachte Zeit-Strom-Bereiche elektropathologischer Wirkungen für Wechselstrom 50/60 Hz (Zonenbeschreibung siehe [4])

Die Linien a, b, c haben folgende Bedeutung:

- a Wahrnehmbarkeitsschwelle
- b Loslasschwelle bzw. – für Zeiten unter etwa 2 s – obere Grenze für einen Bereich AC-2 bzw. DC-2, in dem noch keine Dauerschäden auftreten
- c Schwelle, für die das Risiko für das Auftreten von Herzkammerflimmern als vertretbar angesehen wird. Man erkennt ein oberes Niveau bei 1 A für Einwirkungszeiten unter 0,2 s und ein unteres Niveau bei 100 mA für a.c. bzw. 200 mA für d.c. für Einwirkungszeiten von 0,5 s bis 10 s.

statistischen Wahrscheinlichkeit von 1% der Population für das Auftreten von Kammerflimmern bei Längsdurchströmungen während der vulnerablen Herzperiode ausgegangen wurde.

Für die untere Schwelle von 100 mA a.c. für Zeiten länger als 0,5 s gilt dies noch viel mehr, weil man zum Beispiel bei Schweineversuchen Werte gefunden hat, die weit über 100 mA liegen. Allerdings verursachen Elektrisierungen mit einer Berührungsstromstärke von 1 A sehr starke unwillkürliche Muskelreaktionen, auch wenn die Einwirkungszeit nur wenige zehn Millisekunden beträgt. Man beachte bei den Bildern 1 und 2 auch, dass für Einwirkungszeiten unter 0,2 s die Schwellenwerte für Herzkammerflimmern für a.c. und d.c. mit 1000 mA gleich hoch sind, während bei längeren Einwirkungszeiten von einigen Sekunden der Schwellenwert für Gleichstrom der Linie c mit 200 mA etwa doppelt so hoch liegt wie für a.c. (100 mA). Das heisst, dass für kurze Einwirkungszeiten (Bruchteile von Sekunden) Gleichstrom genauso gefährlich ist wie Wechselstrom. Allerdings liegen dabei die Schwellenwerte der Berührungsströme so hoch, dass sie im allgemeinen nur bei Hochspannungsunfällen erreicht werden [4].

In der Folge wird daher das vertretbare Risiko für das Auftreten von Herzkammerflimmern oder starker unwillkür-

licher Muskelreaktionen untersucht, und zwar abhängig von den Berührungsspannungen und Ausschaltzeiten unter Beachtung der technischen Massnahmen beim Schutz gegen elektrischen Schlag, wie sie in den Normen für die Errichtung von Niederspannungsanlagen vorgesehen sind.

Um von den Berührungsströmen auf die Berührungsspannungen schliessen zu können, müssen Überlegungen, die die Körperimpedanzen Z_T betreffen, ange-

stellt werden. Dabei sind sowohl die wahrscheinlichsten Stromwege, die beim Elektrounfall auftreten können, als auch die Grösse der Berührungsflächen und deren Zustand (trocken, wassernass, salznass) wesentlich, wozu dann noch weitere Gesichtspunkte, wie zum Beispiel der Prozentsatz der Population, der erfasst werden soll, zu beachten sind [5].

Bei Vorhandensein mehrerer Einflussgrössen, deren statistische Wahrscheinlichkeiten bekannt sind, muss eine vernünftige Auswahl getroffen werden, um zu realistischen Ergebnissen zu kommen. Nimmt man zum Beispiel für die Flimmerwahrscheinlichkeit die 1%-Werte der Population, dann sollten für die Körperimpedanzen die Mittelwerte für die Berechnungen herangezogen werden. Es ist ja zum Beispiel sehr unwahrscheinlich, dass eine Person mit einem Herzen, dessen Flimmerschwelle an der 1%-Grenze liegt, auch eine Körperimpedanz hat, die an der unteren Grenze der Population liegt.

Für die folgenden Überlegungen werden daher die 1%-Werte für das Herzkammerflimmern verwendet und die statistisch am besten abgesicherten 50%-Werte für die Körperimpedanzen. Für Berührungsspannungen bis 230 V werden mittlere Berührungsflächen (ca. 1000 mm²) im trockenen, wassernassen und salznassen Zustand den Berechnungen zugrunde gelegt. Über 230 V verringern sich infolge des Hautdurchbruchs die Unterschiede der Körperimpedanzen in Bezug auf die Grösse und den Zustand der Berührungsflächen. Die Impedanzen nehmen dann zunehmend Werte an, die etwa jenen grosser Flächen im salznassen Zustand entsprechen [5].

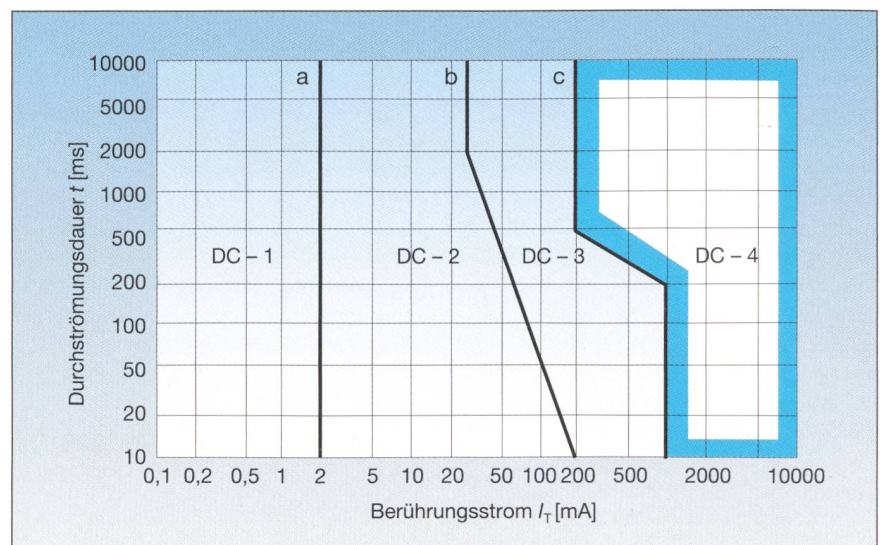


Bild 2 Vereinfachte Zeit-Strom-Bereiche elektropathologischer Wirkungen für Gleichstrom (Zonenbeschreibung siehe [4])

a, b, c: siehe Bild 1

Stromweg	Hand-Hand (Hand-Fuss)	Hand-Füsse	Hände-Füsse	Hände-Rumpf
Berührungsflächen trocken				
Z_T (50%) [Ω]	11080	8310	5540	2770
I_T [mA]	5,5	7	11	22
Berührungsflächen wassernass				
Z_T (50%) [Ω]	6870	5150	3435	1717
I_T [mA]	8,5	11,5	17,5	35
Berührungsflächen salznass				
Z_T (50%) [Ω]	2375	1780	1187,5	593,75
I_T [mA]	25	34	50	100

Tab. II Körperimpedanzen Z_T (50%) für verschiedene Stromwege bei mittleren Berührungsflächen, trocken, wassernass oder salznass, und Berührungsströme I_T für eine Berührungsspannung $U_T = 60$ V [5]

Zur Vereinfachung werden bei den folgenden Berechnungen die Körperimpedanzen Z_T für die Stromwege Hand-Hand und Hand-Fuss als gleich angenommen.

Berührungsspannungsbereiche und Ausschaltzeiten

Der Berührungsspannungsbereich 0 bis 60 V für Durchströmungszeiten von einigen Sekunden

Beginnend mit einer Sekunde liegt die Flimmerschwelle für den Menschen bei Durchströmungszeiten von einigen Sekunden konstant bei etwa 100 mA. In diesem Berührungsspannungsbereich hängen die Körperimpedanzen wesentlich vom Zustand und der Grösse der Berührungsfläche ab (trocken, wassernass und salznass [5]). Für die obere Bereichsgrenze von 60 V ergeben sich die Werte der Tabelle II.

Man erkennt, dass unter normalen Umgebungsbedingungen (trocken oder wassernass) bei Fehlerspannungen bis zu 60 V weder Kammerflimmern noch unzulässige Muskelreaktionen entstehen, wenn die Einwirkungszeiten bei einigen Sekunden liegen. Für den ungünstigsten Stromweg (Hände-Rumpf) könnte aber bei salznassen Berührungsflächen bereits Kammerflimmern entstehen. Das ist der Grund, warum bei erschwerten Umgebungsbedingungen Schutzkleinspannung als Fehlerschutz anzuwenden ist und zwar mit Betriebsmitteln der Schutzklasse III mit Basisschutz, da das Berühren aktiver Teile, zum Beispiel bei einer Berührungsspannung von 50 V, unter ungünstigen Bedingungen (enge, leitfähige Räume, Schweissbildung, niederohmige Stromwege, zum Beispiel Hände-Rücken) bereits einen schädlichen elektrischen Schlag verursachen kann. Sicher ist der salznasse Zustand (zum Beispiel Durchnässung mit Meerwasser) nieder-

ohmiger als bei Schweissbildung, die aber trotzdem mit Sicherheit die Hautimpedanzen stark absenkt (Messungen fehlen).

Der Stromweg Hände-Rumpf bei normalen Umgebungsbedingungen führt dagegen nur zu Berührungsströmen von einigen zehn Milliampere (Tabelle II). Diese verursachen zwar starke willkürliche Muskelreaktionen, das Risiko eines Schadens durch einen Sekundärnfall kann aber als vertretbar angesehen werden.

Der Berührungsspannungsbereich von 60 bis 120 V für Durchströmungszeiten von einigen Sekunden

Betrachtet man die obere Bereichsgrenze von 120 V, wobei nur normale Umgebungsbedingungen (trocken oder wassernass) in Betracht gezogen werden,

dann ergeben sich Berührungsströme, die aus Tabelle III zu ersehen sind.

Man erkennt aus Tabelle III, dass abgesehen vom extremen Stromweg Hände-Rumpf Herzkammerflimmern kaum zu erwarten ist, wenn die Stromflussdauer im Sekundenbereich liegt. Auch Sekundärfälle sind bei normalen Umgebungsbedingungen kaum zu erwarten. Man sollte aber an der oberen Bereichsgrenze wegen der doch sehr starken und schmerzhaften unwillkürlichen Muskelreaktionen zumindest für Stromkreise mit Steckdosen durch entsprechende Anforderungen in den Normen zum Schutz gegen elektrischen Schlag die Einwirkungszeit auf etwa eine Sekunde einschränken.

Der Berührungsspannungsbereich von 120 V bis 230 V für Durchströmungszeiten unter 0,2 s

Für die obere Bereichsgrenze $U_T = 230$ V und eine Durchströmungsdauer von max. 0,2 s ist die Berechnung der Berührungsströme I_T einfach, da die Körperimpedanzen nur mehr wenig vom Zustand der Berührungsflächen abhängen. Man findet für die verschiedenen Stromwege Berührungsströme nach Tabelle IV.

Man erkennt, dass die Ströme weit unter der Flimmerschwelle von 1000 mA liegen, und damit ist bei 230 V kein Kammerflimmern zu erwarten, wenn innerhalb von 0,2 s ausgeschaltet wird. Dies gilt umso mehr an der unteren Bereichsgrenze von 125 V. Allerdings kommt es in jedem Fall zu starken unwillkürlichen Muskelreaktionen, die Sekundärnfälle auslösen können. Versagt

Stromweg	Hand-Hand (Hand-Fuss)	Hand-Füsse	Hände-Füsse	Hände-Rumpf
Z_T (50%) [Ω]*	4000	3000	2000	1000
I_T [mA]	30	40	60	125

Tab. III Körperimpedanzen Z_T (50%) für verschiedene Stromwege bei mittleren Berührungsflächen, trocken oder wassernass, und Berührungsströme I_T für eine Berührungsspannung $U_T = 120$ V

* Die Körperimpedanzwerte Z_T (50%) werden den in IEC 60479-1 für $U_T = 125$ V angegebenen Werten gleichgesetzt. Bei diesen Berührungsspannungen besteht in den Werten der Körperimpedanz zwischen trockenen und wassernassen Berührungsflächen kein Unterschied mehr.

Stromweg	Hand-Hand (Hand-Fuss)	Hand-Füsse	Hände-Füsse	Hände-Rumpf
Z_T (50%) [Ω]*	2000	1500	1000	500
I_T [mA]	115	150	230	460

Tab. IV Körperimpedanzen Z_T (50%) für verschiedene Stromwege bei mittleren Berührungsflächen, trocken oder wassernass, und Berührungsströme I_T für eine Berührungsspannung $U_T = 230$ V

Stromweg	Hand-Hand (Hand-Fuss)	Hand-Füsse	Hände-Füsse	Hände-Rumpf
Z_T (50%) [Ω]*	950	715	475	235
I_T [mA]	420	560	840	1700

Tab. V Körperimpedanzen Z_T (50%) für verschiedene Stromwege und Berührungsströme I_T für eine Berührungsspannung $U_T = 400$ V

die Schutzeinrichtung, kann es bei Durchströmungszeiten von über 0,2 s nicht nur zu schweren unwillkürlichen Muskelreaktionen, sondern auch sehr schnell (innerhalb einer Sekunde) zum Herzkammerflimmern kommen.

Der Berührungsspannungsbereich über 230 V

Bei Berührungsspannungen über 230 V kommt es zum Hautdurchbruch, der innerhalb von Bruchteilen von Sekunden bis zu einigen Sekunden auftritt. Danach hängen die Körperimpedanzen weder vom Zustand noch von der Grösse der Berührungsflächen, sondern nur mehr vom Stromweg im Körper ab. Die Hautimpedanzen liegen nur wenig über den Werten, die bei grossen Berührungsflächen im salzassen Zustand gemessen werden. Aus Tabelle V sind die Körperimpedanzen Z_T für verschiedene Stromwege und die Berührungsströme I_T für eine Berührungsspannung $U_T = 400$ V zu ersehen.

Man erkennt, dass auch bei Einwirkungszeiten unter 0,2 s die elektropathologischen Wirkungen in jedem Fall einen schädlichen elektrischen Schlag verursachen, und dass damit das Risiko in keinem Fall vertretbar ist. Das heisst, dass für Berührungsspannungen über 230 V ein schädlicher elektrischer Schlag durch Begrenzung der Stromflussdauer auf technisch mögliche Werte, das sind einige zehn Millisekunden, nicht verhindert werden kann. Für Verteilungsnetze, die mit Systemspannungen über 230 V gegen Erde (zum Beispiel die Netze 3x500 V oder 3N ~ 690/400 V) arbeiten, ist diese Erkenntnis von grosser praktischer Bedeutung für den Schutz gegen elektrischen Schlag.

Der Fehlerschutz gegen schädlichen elektrischen Schlag

Im Rahmen dieses Beitrages wird nur der Fehlerschutz TN-System (Nullung, Neutralleiter-Schutzerdung) und TT-System (Schutzerdung, Schutzleiter-Einzel-erdung) behandelt, da sie allgemeine Bedeutung für den Schutz gegen elektrischen Schlag besitzen. Das TN-System

mit Überstrom-Schutzeinrichtungen zur Fehlerausschaltung nach IEC 60364 wird in der Folge kurz als Nullung und das TT-System mit Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen zur Fehlerausschaltung kurz als Schutzerdung bezeichnet. Für die folgenden Betrachtungen wird ausserdem das geerdete Drehstromnetz 3N ~ 400/230 V vorausgesetzt. Folgende technische Gegebenheiten stehen ausser Frage:

- Bei Körperschlüssen in Verbraucheranlagen betragen die Fehlerspannungen U_F , berührbaren Teilfehlerspannungen U_{FP} und Berührungsspannungen U_T in Anlagen, in denen die Nullung als Fehlerschutz angewendet wird, in der Regel weniger als die Hälfte der Spannungen, die bei der Schutzerdung auftreten. Dies wird in [6] ausführlich begründet. Die zum Verständnis notwendigen Begriffe und Definitionen können aus [7] entnommen werden.
- Da die Körperimpedanzen spannungsabhängig sind, verursacht eine Berührungsspannung von $U_T = 200$ V a.c. einen um ein Vielfaches höheren Berührungsstrom als $U_T = 50$ V. Die einfache Projizierung der Spannungsverhältnisse auf die Risiken eines elektrischen Schlages ist daher unzulässig.

Dieser Fehler wird immer wieder in der Normung gemacht (Tabelle I, 120 V-0,8 s, 230 V-0,4 s oder bei den ELV-Werten 50 V a.c. zu 120 V d.c. [8]).

- Das Rechenbeispiel am Ende dieses Abschnittes zeigt deutlich das wesentlich geringere Risiko eines schädlichen elektrischen Schlages bei der Nullung verglichen mit der Schutzerdung. Nähere Betrachtungen zeigen noch weitere entscheidende Vorteile, gegenüber denen einige Nachteile, zum Beispiel Fehler im Verteilungsnetz, kaum ins Gewicht fallen [9].

Erkenntnis: Bei der Nullung liegen die Fehlerspannungen und Teilfehlerspannungen und damit auch die Berührungsspannungen bei Körperschlüssen in Verbraucheranlagen im allgemeinen unter dem halben Wert der Spannungen, die bei der Schutzerdung auftreten. Dazu kommt die Spannungsabhängigkeit der Körperimpedanzen beim Menschen, die bei höheren Berührungsspannungen die Berührungsströme noch zusätzlich vergrössert. Daher ist das Risiko eines schädlichen elektrischen Schlages bei der Schutzerdung wesentlich höher als bei der Nullung.

Als Bedingungen für die Ausschaltung im Fehlerfall werden derzeit uneinheitlich und irreführend für die Nullung höchstzulässige Schleifenwiderstände und für die Schutzerdung höchstzulässige Erdungswiderstände in den Verbraucheranlagen festgeschrieben. Mit

$$R_A \leq \frac{50 \text{ V}}{I_{An}}$$

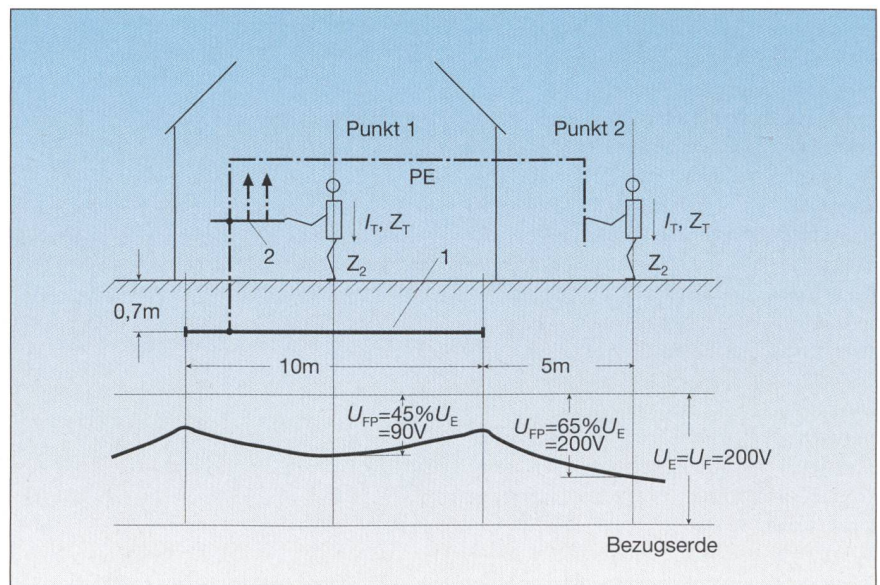


Bild 3 Spannungstrichter eines Fundamenterders innerhalb und ausserhalb eines Gebäudes. Fehlerspannung $U_f = 200$ V und berührbare Teilfehlerspannungen U_{FP}

Gedanken zum Artikel aus Schweizer Sicht

Jost Keller, Leiter Sichere Elektrizität/Weiterbildung, SEV, 8320 Fehraltorf

Teil 4 unserer nationalen Installationsnorm NIN 2000 legt die Schutzmassnahmen fest. Die NIN 2000 basiert auf dem Cenelec-Dokument HD 384, welches sich seinerseits auf das IEC-Dokument 60364 abstützt. Zur Zeit wird die Norm IEC 60364-4-41 von der WG 9 grundlegend überarbeitet; sie soll neu mit «Schutz gegen elektrischen Schlag» überschrieben werden (entspricht dem NIN-Kapitel «Schutz gegen zu hohe Berührungsspannung»). Um diese überarbeitete Norm geht es dem Autor Gottfried Biegelmeier im vorliegenden Beitrag. Damit Installationen und Betriebsmittel sicher verwendet werden können - und dies möglichst auch im Fehlerfalle - werden Schutzmassnahmen definiert, die in der Regel, in gewissen Kombinationen angewendet, das gesetzte Schutzziel erfüllen. Biegelmeier hat sich an das Prinzip der Schutzkaskade: Basisschutz-Fehlerschutz-Zusatzschutz. Dabei soll jeweils die nächst höhere Schutzart den Schutz gewährleisten, wenn die tiefere versagt. Diese Philosophie liegt übrigens auch dem Standard IEC 61140 zugrunde, in dem die gemeinsamen Aspekte für Installation und Betriebsmittel bezüglich Schutz gegen elektrischen Schlag definiert sind. Diese Koordination ist sehr wichtig; denken wir doch an die Problematik der Ableitströme von Geräten und den Einsatz von Fehlerstromschutzschaltern.

Der Basisschutz, realisiert durch eine Isolation in fester oder gasförmiger Form (Kunststoffe, Gase, Luft etc.), wird bei der Überarbeitung von Kap. 41 nicht in Frage gestellt. Anders verhält es sich mit dem Fehlerschutz. Dieser wird mittels automatischer Abschaltung (Leitungsschutzschalter, Sicherung) realisiert. Diese Abschaltung hat zum Schutze von Personen möglichst schnell zu erfolgen. Die Abschaltzeiten der Schutzorgane sind vom Strom abhängig und in den Strom-Zeit-Diagrammen ersichtlich. Der Strom wiederum ist abhängig von Parametern der Installation und des Netzes, d.h. der Netzform (TN, TT, IT).

Professor Biegelmeier, der seit über 25 Jahren auf den Gebieten Schutztechnik und Schutzmassnahmen sowie Elektropathologie arbeitet, befasst sich in seinem Artikel mit diesen Ausschaltzeiten und den Netzformen. Zudem schlägt er die Anwendung eines Faktors anstelle der Ausschaltzeiten vor. Der Artikel ist auch aus schweizerischer Sicht sehr interessant, obschon bei uns die Nullung, d.h. die Anwendung der Netzform TN, für die der Autor plädiert, erfolgreich und fast ausschliesslich zur Anwendung kommt.

und weiteren völlig willkürlichen Festlegungen (zum Beispiel in IEC 61200-413) von Körperimpedanzen, «situations», «konventionelle Berührungsspannungsgrenzen» usw. wurde die Gefährdungsbeurteilung dieser Massnahmen zum Schutz gegen elektrischen Schlag völlig verzerrt. Obige Gleichung erweckt den Eindruck, dass keine höheren Berührungsspannungen als 50 V bei der Schutzerdung auftreten, während in Wirklichkeit beim Körperschluss im Netz 3N ~ 400/230 V die berührbaren Teilfehlerspannungen oft bei 200 V liegen. Ausserdem ist die Messung des Erdungswiderstandes R_A der Verbraucheranlage im bebauten Gebiet unmöglich oder jedenfalls kostspielig.

Zur Vereinheitlichung wird daher vorgeschlagen, in Zukunft sowohl bei der Nullung als auch bei der Schutzerdung die Ausschaltbedingung auf Grund des Schleifenwiderstandes R_{SL} über Ausschaltstromfaktoren m zu bestimmen. Näheres darüber findet sich in [10]. Da bei der Schutzerdung wegen der hohen Feh-

lerspannungen die Ausschaltung der Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen innerhalb von 0,2 s gefordert werden muss, gilt für den höchstzulässigen Schleifenwiderstand

$$R_{SL} = U_O / (5 \cdot I_{\Delta n}),$$

also für m der Wert 5, wobei U_O die Systemspannung gegen Erde darstellt.

Beim fünffachen Nennfehlerstrom schalten ja Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen nach IEC 61008 bzw. 61009 innerhalb von 0,2 s aus, und zwar sowohl die übliche Bauart als auch die Bauart S.

Erkenntnis: Erdungswiderstände von Verbraucheranlagen R_A sind im bebauten Gebiet überhaupt nicht und ansonsten nur mit grossem wirtschaftlichen Aufwand zu messen. Dieser Umstand und weitere schutztechnische Überlegungen legen nahe, auch bei der Schutzerdung einen höchstzulässigen Schleifenwiderstand R_{SL} für den Fehlerstromkreis als Schutzerdungsbedingung zu fordern.

$$R_{SL} = U_O / (m \cdot I_{\Delta n})$$

wobei R_{SL} der höchstzulässige Wert (Limit) des Schleifenwiderstandes, U_O die Systemspannung gegen Erde, $I_{\Delta n}$ der Nennfehlerstrom der ersten Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCDs) netzseitig in der Verbraucheranlage und m der Ausschaltstromfaktor ist (für RCDs nach IEC 61008 und 61009 gilt $m = 5$. Bei anderen Auslösekennlinien ist m so zu wählen, dass die Ausschaltung innerhalb von 0,2 s erfolgt).

Der Hauptpotenzialausgleich wird als Massnahme des Fehlerschutzes klassifiziert (zum Beispiel in IEC 61140) und als Alternative zur Nullung oder der Schutzerdung in den Normen genannt. Tatsächlich kann der Hauptpotenzialausgleich weder innerhalb noch ausserhalb von Gebäuden sicherstellen, dass keine gefährlichen Berührungsspannungen auftreten. Bild 3 zeigt den Spannungstrichter eines Fundamenterders, berechnet durch eine Computersimulation bei homogenem Erreich. Man erkennt die hohen berührbaren Teilfehlerspannungen auch innerhalb des Gebäudes. Wenn der Fundamenterder in schlechter leitendem Erreich eingebettet ist, das über besser leitendem Erreich liegt, dann liegen die Teilfehlerspannungen sogar noch höher ([8], Band 80).

Handelt es sich um eine Verbrauchererdung in Form eines gestreckten Bänderders entlang der Aussenmauer des Gebäudes, dann können innerhalb des Gebäudes gegen die Standfläche Teilfehlerspannungen auftreten, die nahe der vollen Fehlerspannung U_F liegen, obwohl ein Hauptpotenzialausgleich vorhanden ist. Die in den Normen enthaltene Aussage, dass innerhalb von Gebäuden bei vorhandenem Hauptpotenzialausgleich die Berührungsspannungen nahezu Null sind, ist daher nicht richtig.

Erkenntnis: Der Hauptpotenzialausgleich kann weder innerhalb noch ausserhalb von Gebäuden sicherstellen, dass keine gefährlichen Berührungsspannungen auftreten. Er ist daher nicht als Massnahme des Fehlerschutzes, sondern nur als Zusatzschutz zu klassifizieren.

Zur Erläuterung der Unterschiede in den Fehlerspannungen in einer genullten und einer schutzgeerdeten Verbraucheranlage, die bei einem Körperschluss entstehen, soll das folgende Rechenbeispiel dienen, das eine Verbraucheranlage zeigt, die über ein Freileitungsnetz mit Strom versorgt wird (Bild 4).

Bild 4 oben zeigt die Verhältnisse bei der Nullung. Beim Kurzschluss im Verteilungsnetz an der Stelle A beträgt die Fehlerspannung in der Verbraucheranlage 36,5 V. Bei einem Körperschluss in der Verbraucheranlage an der Stelle D tritt

während der Ausschaltzeit zwischen den Betriebsmitteln die Spannung von 57,5 V auf, die innerhalb kürzester Zeit ausgeschaltet wird. Gegen die Bezugs Erde beträgt die Fehlerspannung 94 V, die durch die Form der Spannungstrichter innerhalb der Gebäude meist nur mit weniger als dem halben Wert wirksam wird (Bild 3). Selbst wenn ausserhalb der Gebäude die Standfläche des fehlerhaften Betriebsmittels das Potenzial der Bezugs Erde hat, ist bei Fehlerspannungen U_F unter 100 V und damit Berührungsspannungen U_T , die meist noch niedriger sind, das Risiko eines schädlichen elektrischen Schlages vertretbar.

Anders ist es bei der Schutzerdung, wie aus Bild 4 unten zu erkennen ist. Die Fehlerspannung des PE-Leiters liegt in der ganzen Anlage über 150 V bei einer Ausschaltzeit von einigen zehn Millisekunden. Dies kann zu starken Muskelreaktionen und damit zu Sekundärnfällen führen. Besonders gefährlich wird die Lage, wenn der FI-Schutzschalter versagt. Der Fehlerstrom, meist wenige Ampere (in Bild 4 unten $I_F = 33$ A, weil R_A mit 5Ω sehr niedrig angenommen wurde), reicht dann nicht aus, die Überstrom-Schutzeinrichtungen zu betätigen, und damit bleibt die hohe Fehlerspannung bestehen. Die Ergebnisse von diesbezüglichen Feldmessungen werden in [11] beschrieben. Ein tödlicher Unfall, der durch hohe Fehlerspannungen im TT-System entstanden ist, wird in [12] einer genauen technischen Analyse unterzogen.

Bild 4 zeigt eindrucksvoll, dass durch eine leitende Verbindung von Schutzleiter, Verbrauchererdung und PEN-Leiter – in Österreich Nullungsverbindung genannt –, also oft nur durch ein Stück Draht, eine Verbraucheranlage von Schutzerdung auf Nullung umgestellt und dadurch die Sicherheit der Elektrizitätsanwendung wesentlich erhöht werden kann.

Ausschaltung bei Nullung nach

Bild 4 oben:

Kurzschluss L-PEN in A (Verteilungsnetz): Kurzschlussstrom 450 A, Ausschaltbedingung $I_a = 1,6 \times 160$ A (Stationsicherung) = 256 A eingehalten. In manchen Ländern wird im Verteilungsnetz ein Ausschaltstromfaktor $m = 2,5$ gefordert. Die Ausschaltbedingung wäre mit 400 A auch dann noch eingehalten. Ausschaltzeit 10 s bis 2 min (Streubereich der Schmelzsicherung in der Transformatorstation).

Körperschluss L-PE in B (Verbraucheranlage): Kurzschlussstrom 310 A, Ausschaltbedingung $I_a = 5 \times 20$ A (Lei-

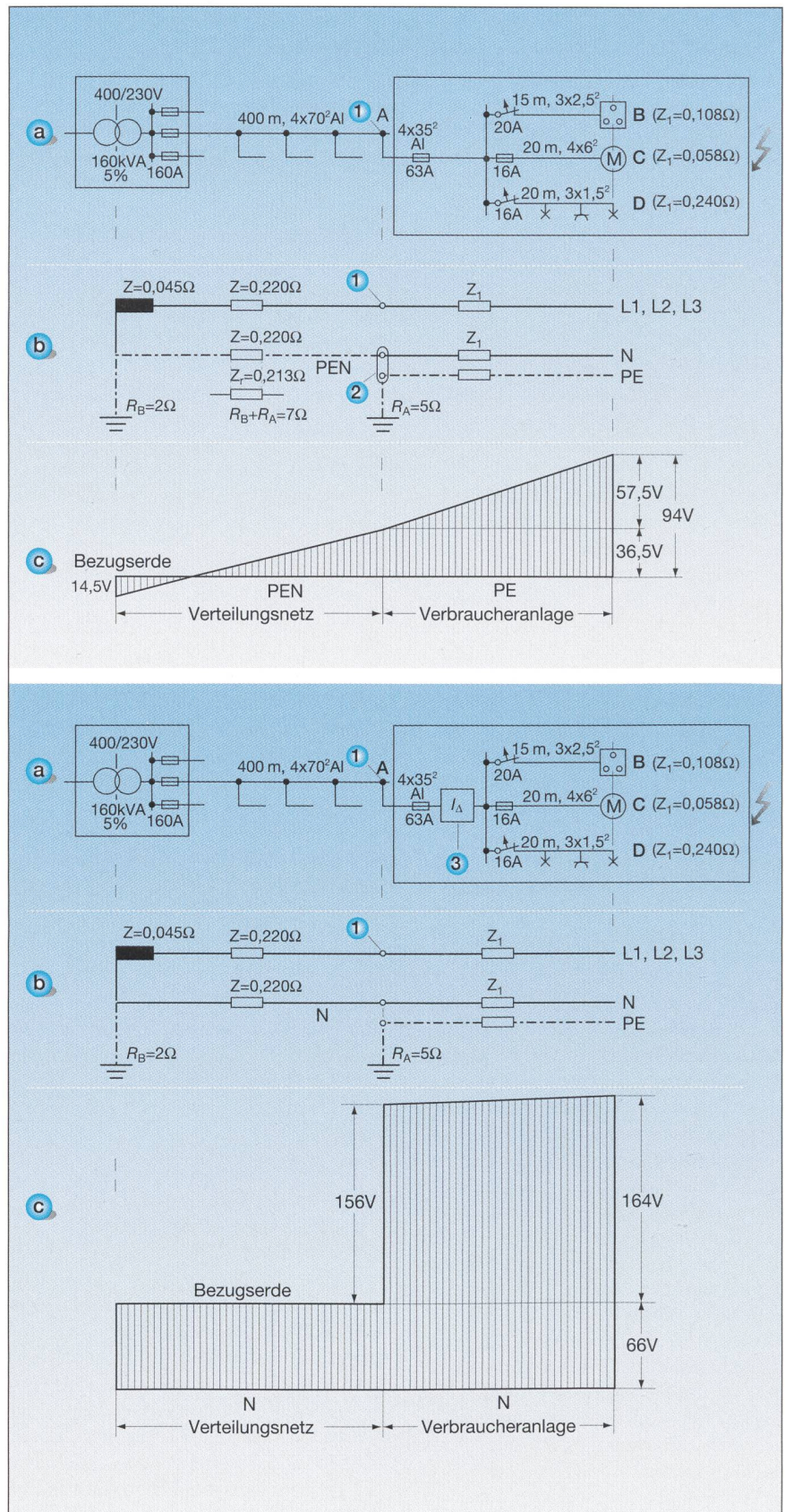


Bild 4 Ausschaltströme und Fehlerspannungen des PEN-Leiters in einer Verbraucheranlage mit einer Energieversorgung aus einem Freileitungsnetz

Oben: Prinzipielles Schaltbild und Spannungsteilung bei der Nullung; unten: Prinzipielles Schaltbild und Spannungsteilung bei der Schutzerdung
a: Leiterlängen und Querschnitte; b: Widerstandswerte der Leitungen und Erdungen; c: Fehlerspannungen bei einem Körperschluss in Punkt D; 1: Hausanschlussstelle; 2: Nullungsverbindung; 3: Fehlerstrom-Schutzeinrichtung

tungsschutzschalter, Kennlinie B) = 100 A eingehalten. Ausschaltzeit einige Millisekunden (Schnellauslösung des LS-Schalters).

Körperschluss L-PE in C (Verbraucheranlage): Kurzschlussstrom 370 A, Ausschaltbedingung $I_a = 5 \times 16 \text{ A} = 80 \text{ A}$ (Schmelzsicherung, Kennlinie gL) eingehalten. Ausschaltzeit 0,2 bis 2 s (Streubereich der Verteilersicherung).

Körperschluss L-PE in D (Verbraucheranlage): Kurzschlussstrom 230 A, Ausschaltbedingung $I_a = 5 \times 16 \text{ A} = 80 \text{ A}$ (Leitungsschutzschalter, Kennlinie B) eingehalten. Ausschaltzeit einige Millisekunden (Schnellauslösung des LS-Schalters).

Ausschaltung bei der Schutzterdung nach Bild 4 unten:

Körperschluss L-PE in D (Verbraucheranlage): Fehlerstrom $I_F = 33 \text{ A}$. Ausschaltung durch die Fehlerstrom-Schutzeinrichtung innerhalb von einigen zehn Millisekunden. Wenn die Fehlerstrom-Schutzeinrichtung versagt, würde der LS-Schalter, Nennstrom 16 A, bei 33 A innerhalb von einigen zehn Sekunden thermisch ausschalten, also für eine Fehlerstromspannung über 150 V zu spät, um einen schädlichen elektrischen Schlag zu verhindern.

Zusammenfassung

Auf Grund neuen Wissens über die Wirkungen elektrischer Ströme auf Menschen und Nutztiere und über Körperimpedanzen sowie den Erfahrungen beim Schutz gegen schädlichen elektrischen Schlag können für den Fehlerschutz in elektrischen Anlagen Fehlerspannungsgrenzen und zugeordnete Ausschaltzeiten festgelegt werden, für die das Risiko eines schädlichen elektrischen Schlages vertretbar erscheint. Es ist zu fordern, dass für Fehlerspannungen, die durch Körperschlüsse in Verbraucheranlagen entstehen, bei $U_F > 150 \text{ V a.c.}$ die Ausschaltung innerhalb von 0,2 s erfolgen muss. Für Spannungen unter 50 V a.c., die in genullten Verbraucheranlagen als berührbare Teilfehlerspannungen in der Regel auftreten, wird die Ausschaltzeit bedeutungslos, es genügen einige Sekunden oder Minuten. Die Grenzfälle am Ende von Endstromkreisen, bei denen Fehlerspannungen U_F voll als berührbare Teilfehlerspannungen U_{FP} möglich sind, aber immer unter der halben Netzspannung gegen Erde liegen, bilden ein vertretbares Risiko, wobei ein Ausschaltstromfaktor $m = 5$ für Steckdosenstromkreise ($I_n = 16 \text{ A}$) eine Ausschaltung innerhalb von einer Sekunde sicherstellt.

In Verteilungsnetzen, in denen für die angeschlossenen Verbraucheranlagen die Nullung als Fehlerschutz angewendet wird, können Ausschaltzeiten von Minuten bis zu einigen zehn Minuten als vertretbares Risiko angesehen werden.

Der Vorschlag, einheitlich für die Nullung und die Schutzterdung höchstzulässige Widerstände für die Fehlerschleifen zu normen, vereinfacht die Handhabung der Normen für den Praktiker wesentlich. Dabei will es der Zufall, dass für Überstrom-Schutzeinrichtungen bei der Nullung und für Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen bei der Schutzterdung für Verbraucheranlagen in der Regel der gleiche Ausschaltstromfaktor $m = 5$ angewendet werden kann. Die vorliegende Arbeit zeigt auch, dass die Nullung (TN-System) als zukunftsichere Massnahme des Fehlerschutzes für Installationen in Haushalt, Landwirtschaft, Gewerbe und Industrie mit wenigen Ausnahmen (zum Beispiel Isolationsüberwachungssystem in gewissen Industrieanlagen) zur allgemeinen Anwendung empfohlen werden sollte.

Referenzen

- [1] Revision IEC 60364-4-41: Schutz gegen elektrischen Schlag. Dokument 64/WG 9/332-2001.
- [2] IEC-Publ. 60364-3-1 (364-3-1):1973, Abschnitt 4.1.4.
- [3] G. Biegelmeier: Report on the electrical impedance of the human body and on the behaviour of residual current-operated earth-leakage circuit-breakers in case of direct contact for tensions up to 200 V a.c., 50 Hz. Transactions: Symposium

on electrical shock safety criteria, Toronto, 1983, Pergamon Press, Toronto, 1984.

- [4] H. Antoni, G. Biegelmeier, D. Kieback: Konventionelle Grenzwerte mit vertretbarem Risiko für das Auftreten von Herzkammerflimmern bei elektrischen Durchströmungen mit Wechselstrom 50/60 Hz bzw. Gleichstrom. ESF-Bericht Nr. 3(2001), Gemeinnützige Stiftung Elektroschutz (ESF-Vienna), Wien.
- [5] H. Bachl, G. Biegelmeier, R. Hirtler: Flächenabhängigkeit der Körperimpedanzen vom Menschen. ESF-Bericht 2/2001, gemeinnützige Privatstiftung Elektroschutz, Wien 2001.
- [6] G. Biegelmeier, K.-H. Krefter: TN- oder TT-System. Elektrizitätswirtschaft, Jg.99 (2000), H.4, S.49-57.
- [7] G. Biegelmeier: Schutz gegen elektrischen Schlag. Bull. SEV/VSE 17/1999, S.37-42.
- [8] G. Biegelmeier, G. Kiefer, K.-H. Krefter: Schutz in elektrischen Anlagen. Band 1, S.92 VDE-Schriftenreihe Band 80, VDE-Verlag GmbH (1996).
- [9] G. Biegelmeier, J. Groiss, A. Mörx, S. Wiborny: Normen für die Anwendung der Neutralleiter-Schutzterdung (Nullung) als Fehlerschutz in Niederspannungsanlagen. Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft, VEÖ-Journal (1996) H.11, S.50-62.
- [10] G. Biegelmeier: Ganzheitsbetrachtungen zum Fehlerschutz in Niederspannungsanlagen. Elektrizitätswirtschaft, Jg.99 (2000), H.11, S.48-51.
- [11] G. Biegelmeier, J. Groiss, R. Hirtler: Messung der Potentialverteilung im Fehlerfall bei landwirtschaftlichen Betriebsstätten - Vergleichsmessung TT-TN-Systeme. ESF-Bericht Nr. 1(1999), gemeinnützige Privatstiftung Elektroschutz (ESF-Vienna) Wien.
- [12] G. Biegelmeier, A. Mörx: Risikoverminderung für Elektrounfälle. Elektrie (1996) H.9/10/11, S.334-346.

Adresse des Autors

Gottfried Biegelmeier, Prof. Ing. Dr. phil., Stiftung Elektroschutz (ESF-Vienna), A-1195 Wien, esf-vienna@utanet.at

Tensions de contact et temps de coupure dans la protection de défaut à coupure automatique

Le présent article prend position quant au projet de révision de la norme CEI 60364-4-41 «Protection contre le choc électrique». L'auteur critique en particulier les temps de coupure proposés à la norme; à son avis, ceux-ci ne garantissent pas une sécurité suffisante des personnes. Ceux qui connaissent les conditions suisses diront que le remplacement de la terre de protection par la mise au neutre est en cours depuis longtemps chez nous et que les arguments de l'auteur n'ont plus guère de sens pour notre pays. Malheureusement, on est bien loin d'en être arrivé là dans toute l'Europe, aussi nous paraît-il néanmoins intéressant de publier cet article. Jost Keller, le chef de la formation à l'ASE, prend position à ce sujet.



gelöst

Finanzthemen und gute Laune vertragen sich bestens.

Entspannte Gespräche verlaufen konstruktiver. Das erleben auch Marco Hausamann, Geschäftsführer bei der Hans Saurer Kugellager AG in Arbon, und sein Postfinance-Berater Martin Hersche immer wieder. Dank seinen Besuchen kennt Martin Hersche die Welt seines Kunden durch und durch und kann darum aus

dem umfassenden Angebot an einfachen, transparenten Dienstleistungen von Postfinance genau das Richtige auswählen. Wir wollen nicht die Nr. 1 in der Welt sein, sondern die Nr. 1 bei Ihnen. Rufen Sie für ein Gespräch einfach an. Telefon 0848 848 848. Globale Zahlungssysteme, Cash-Management, Anlagen.