**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:** 86 (1995)

**Heft:** 15

**Artikel:** Praxisnahe Niederspannungs-Installationsnormen : Vorschläge zur Vereinfachung der internationalen Normen für die Errichtung von Niederspannungsanlagen

**Autor:** Biegelmeier, Gottfried

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-902467

**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:** 10.12.2025

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

Ausgehend vom derzeitigen Stand der internationalen Errichtungsnormen für Niederspannungsanlagen – IEC-Publ. 364 und Cenelec HD 384 – wird vorgeschlagen, für den Praktiker eine auf elektrische Anlagen für Wechselstrom 50/60 Hz und Nennspannungen bis 1000 V beschränkte Neufassung auszuarbeiten. Der Schutz gegen gefährliche Berührungsströme mit dem Basisschutz, dem Fehlerschutz und dem Zusatzschutz soll einer Technik folgen, die sich in der Praxis bereits durchgesetzt hat. Zulässige Fehlerspannungs- und Berührungsspannungsgrenzen werden diskutiert, wobei aufgezeigt wird, dass die derzeitigen Grenzen für Gleichstrom von 120 V und 60 V zu hoch liegen.

# Praxisnahe Niederspannungs-Installationsnormen

## Vorschläge zur Vereinfachung der internationalen Normen für die Errichtung von Niederspannungsanlagen

■ Gottfried Biegelmeier

### IEC-Publ. 364 und Cenelec HD 384 – Rückblick und Gegenwart

Als man in den sechziger Jahren in den Gremien der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zu diskutieren begann, ob Errichtungsnormen für Niederspannungsanlagen überhaupt international erstellt werden können, war man sich darüber klar, dass dies eine schwierige Aufgabe bilden würde. Um eine internationale Vereinheitlichung der Installationstechnik zu erreichen, waren vor allem die sehr unterschiedlichen Netzsysteme (z. B. in Europa die für Hausinstallationen benützten Netzsysteme 3 AC 220 V, 50 Hz, von Erde isoliert, 3/N AC 380/220 V und 415/240 V, 50 Hz, geerdet, in den USA das Einphasennetz 2/N AC 240/120 V, 60 Hz, geerdet, und in Japan 2/N AC 200/100 V, 50 oder 60 Hz, geerdet), die völlig verschiedene Installationspraxis, die verschiedenen klimatischen Bedingungen und auch die durch die sehr unterschiedlichen wirtschaftlichen Verhältnisse und Bevölkerungsmentalitäten bedingten Unterschiede in der Beurteilung des annehmbaren Restrisikos der Elektrizitätsanwendung zu berücksichtigen. Man beschloss daher, nur Rahmenanforderungen zu erarbeiten, die als Leitsätze für Staaten dienen sollten, die ihre nationalen Errichtungsnormen neu zu erstellen hatten oder eine Revision veralteter nationaler Normen durchführen wollten.

Im Laufe der Jahrzehnte, bedingt durch den nun einmal notwendigen Formalismus internationaler Normung, durch die immer zu treffenden Kompromisse und durch wirtschaftliche Interessen verschiedenster Gruppen, wurden aber entgegen der ursprünglichen Absicht Errichtungsnormen geschaffen, die in ihrem Inhalt so kompliziert geworden sind, dass für ihr Verständnis sogar für die in den Gremien mitarbeitenden Fachleute eigene Erläuterungen (Guides) ausgearbeitet werden mussten. Mit Sicherheit sind diese Normen für die praktische Anwendung durch den Elektroinstallateur ungeeignet. Nachteilig ist auch, dass man die Erstellung der Normen mehr aus theoretischen Überlegungen als aus der praktischen Erfahrung heraus durchgeführt hat, und zwar für alle möglichen Anlagen,

**Adresse des Autors:**
Prof. Dr. *Gottfried Biegelmeier*,
Cooperative Testing Institute (CTI),
Greinergasse 30, A-1195 Wien.

beginnend von der Hausinstallation bis zur Landwirtschaft und Industrie einschliesslich von Sonderproblemen, wie zum Beispiel die Installation von Kränen. Dazu kommt, dass sich die Bautechnik in den letzten dreissig Jahren sehr verändert hat und mehr und mehr nichtleitende Werkstoffe, zum Beispiel für Wasserleitungs- und Heizungssysteme in den Gebäuden, Verwendung finden. Damit wird der Potentialausgleich zwischen den der Berührung zugänglichen Metallteilen fast bedeutungslos. Wir sind heute auch in der Lage, die Gefahren durch den elektrischen Strom für Menschen und Nutztiere viel besser zu beurteilen als vor dreissig Jahren (siehe IEC-Report 479, neuester Stand, Teil 1, dritte Auflage, 1994: Körperwiderstände und Wirkungen von Wechselstrom 15 bis 100 Hz und von Gleichstrom sowie der Entwurf für Teil 3: Wirkungen auf Nutztiere). Dadurch wissen wir, dass unter 100 V die menschliche Haut die Wahrscheinlichkeit von tödlichen Unfällen verringert, während sie bei 200 V praktisch wirkungslos wird, und dass damit, unabhängig von der Berührungsfläche und der Feuchtigkeit, die Unfallgefahr sehr gross ist. Es hat sich auch gezeigt, dass die in IEC benützte Einteilung der Netzsysteme (TN-System, TT-System und IT-System) praxisfremd geblieben ist und eigentlich für Errichtungsnormen mehr Verwirrung als Klarheit schafft [1].

## Begriffe zum Schutz gegen gefährliche Berührungsströme

### Begriffserklärungen

Der erste Teil einer für die Praxis verständlichen Errichtungsnorm sollte die notwendigen Begriffe klar definieren. Dies betrifft vor allem die Begriffe im Zusammenhang mit dem Schutz gegen gefährliche Berührungsströme. Von Anfang an sollte statt «Körperstrom $I_B$», wie in IEC vorgeschlagen, «Berührungsstrom $I_T$» als Begriff für den Strom, der durch den Menschen fliesst, verwendet werden. In der deutschen Sprache werden ja leider in den Normen mit Körper sowohl der menschliche Körper als auch berührbare leitfähige Teile von Betriebsmitteln bezeichnet. Es müssen also die bisher benutzten Begriffe überarbeitet werden, die jetzt im Internationalen Elektrotechnischen Wörterbuch sehr unvollkommen definiert werden (siehe IEV 50 [826]). Für diese Überarbeitung werden folgende Begriffe besonders erwähnt:

*Gefährliche Spannungen* sind Spannungen, die unter bestimmten Bedingungen (z. B. der Umgebung oder des Stromweges) zu einem gesundheitlichen Schaden

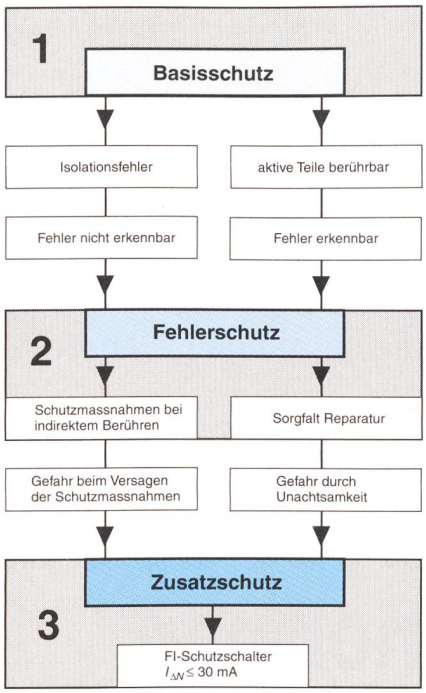


**Bild 1 Konzept für den Schutz gegen gefährliche Berührungsströme**

für Menschen oder Nutztiere führen können.

*Aktive Teile* sind Leiter oder leitfähige Teile, die unter normalen Betriebsbedingungen unter gefährlicher Spannung stehen oder gefährliche Spannungen annehmen können. Hierzu gehört auch der Neutralleiter, nicht aber der PEN-Leiter!

*Berührbare leitfähige Teile* (Körper) sind leitfähige Teile elektrischer Betriebsmittel, die im Falle eines Isolationsfehlers gefährliche Spannungen annehmen können.

*Fremde leitfähige Teile* sind leitfähige Teile, die nicht Teil der elektrischen Anlage sind, aber ein Potential einschliesslich des Erdpotentials übertragen können, zum Beispiel Metallkonstruktionen von Gebäuden, Gas-, Wasser- und Heizungsrohre aus Metall usw.

*Direkter Kontakt* ist eine elektrische Verbindung zwischen einem Menschen oder Nutztier und einem aktiven Teil.

*Indirekter Kontakt* ist eine elektrische Verbindung zwischen einem Menschen oder Nutztier und einem aktiven Teil über einen berührbaren oder fremden leitfähigen Teil im Falle eines Isolationsfehlers.

*Basisschutz* (Schutz gegen direktes Berühren) sind alle Massnahmen, die das gefahrbringende Annähern von Menschen und Nutztieren an aktive Teile elektrischer Betriebsmittel und das direkte Berühren derselben verhindern. Es kann sich hierbei um einen vollständigen oder teilweisen Schutz handeln. Beim teilweisen Schutz besteht nur ein Schutz gegen das zufällige Berühren.

*Fehlerschutz* (Schutz beim indirekten Berühren) sind alle Massnahmen zum Schutz von Menschen und Nutztieren vor Gefahren, die sich im Falle eines Isolationsfehlers aus einer Berührung mit berührbaren oder fremden leitfähigen Teilen ergeben können.

*Zusatzschutz* sind ergänzende Massnahmen zur Verringerung des Restrisikos beim Schutz von Menschen und Nutztieren im Falle eines Isolationsfehlers, insbesondere dann, wenn der Basisschutz und/oder der Fehlerschutz versagen.

Mit den Definitionen Basisschutz, Fehlerschutz und Zusatzschutz ergibt sich eine neue Schutzphilosophie nach Bild 1 [2]. Die sehr wichtigen Begriffe Fehlerspannung, prospektive Berührungsspannung und Berührungsspannung werden im nächsten Abschnitt besprochen.

### Vorschlag für neue Begriffsdefinitionen

Die Klassifikation der Netzsysteme TN, TT und IT ist für die Einteilung der Massnahmen des Fehlerschutzes nicht geeignet [3]. Es werden daher neue, technisch richtige und leicht verständliche Begriffe vorgeschlagen:

*Neutralleiter-Schutzerdung* (protective neutral earthing, kurz PNE; nach IEC 364: TN-System, früher Nullung) ist eine Massnahme des Fehlerschutzes, bei der die zu schützenden berührbaren leitfähigen Teile entweder direkt oder über den PE-Leiter mit dem PEN-Leiter verbunden sind und im Falle eines Isolationsfehlers durch Überstrom-Schutzeinrichtungen ausgeschaltet werden. Bemerkung: Unter bestimmten Bedingungen sind für das Ausschalten im Fehlerfall auch Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen zulässig.

*Fehlerstrom-Schutzerdung* (protective residual current earthing, kurz PRE; nach IEC 364: TT- oder IT-System, früher Fehlerstrom-Schutzschaltung) ist eine Massnahme des Fehlerschutzes, bei der die berührbaren leitfähigen Teile über den PE-Leiter mit einem geeigneten Erder verbunden sind und im Fall eines Isolationsfehlers durch Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen ausgeschaltet werden.

*Überstrom-Schutzerdung* (protective overcurrent earthing, kurz POE; nach IEC 364: TT- oder IT-System, früher Schutzerdung) ist eine Massnahme des Fehlerschutzes, bei der die berührbaren leitfähigen Teile über den PE-Leiter mit einem geeigneten Erder verbunden sind und im Falle eines Isolationsfehlers durch Überstrom-Schutzeinrichtungen ausgeschaltet werden. Bemerkung: Wegen der notwendigen niedrigen Erdungswiderstände wird die Überstrom-Schutzerdung nur mehr selten angewendet.

*Isolationsüberwachungs-System* (protective insulation monitoring, kurz PIM; nach IEC 364: IT-System, früher Schutzleitungssystem) ist eine Massnahme des Fehlerschutzes in einem von Erde isolierten, örtlich begrenzten Netz, bei der die berührbaren leitfähigen Teile über den PE-Leiter mit einem geeigneten Erder und allen geerdeten fremden leitfähigen Teilen der Anlage verbunden sind und in der Regel ein Isolationsfehler durch eine Isolationsüberwachungseinrichtung zumindest gemeldet wird.

Auch für die weiteren, weniger wichtigen Massnahmen des Fehlerschutzes wie Schutztrennung (protective separation), Schutzkleinspannung (safety extra low voltage, SELV), Funktionskleinspannung (functional extra low voltage, FELV) und Schutzisolierung (protective insulation) lassen sich leicht ähnlich klare Begriffbildungen schaffen [3].

## Konventioneller Grenzwert für die Fehlerspannung und zugeordnete Berührungsspannungen

### Definitionsgleichungen für den Elektroschutz

*Erste Definitionsgleichung für den Elektroschutz*

Wenn Strom durch den Menschen oder Tiere fliesst, der in der Folge als Berührungsstrom $I_T$ bezeichnet werden soll, dann entsteht im Körper infolge der Körperimpedanz $Z_T$ eine zugeordnete Spannung, die Berührungsspannung $U_T$. Es gilt die erste Definitionsgleichung für den Elektroschutz:

$$U_T = I_T \cdot Z_T$$

$U_T$ Berührungsspannung (touch-voltage)
$I_T$ Berührungsstrom (touch-current)
$Z_T$ Gesamt-Körperimpedanz (total body impedance) zwischen der Stromeintritts- und -austrittsstelle

*Zweite Definitionsgleichung für den Elektroschutz*

Für den Elektroschutz ist der Isolationsfehler bei elektrischen Betriebsmitteln (in der Folge kurz Gerät genannt), die über eine Schutzleitung mit einem Erder verbunden sind, von besonderer Bedeutung, wobei hier nur geerdete Netze in Betracht gezogen werden. In diesem Zusammenhang ist der Begriff der Bezugserde von besonderer Bedeutung:

*Bezugserde* (auch neutrales Erdreich genannt) ist der Bereich der Erde ausserhalb des Einflussbereichs eines Erders, in dem zwischen zwei beliebigen Punkten durch den Erderstrom keine merklichen Spannungsunterschiede verursacht werden.

Tritt nun bei einem Gerät ein Isolationsfehler auf, dann fliesst ein Fehlerstrom zurück zur Transformatorerdung. Die Spannung des Gerätes gegen die Bezugserde, die als Fehlerspannung bezeichnet wird, ergibt sich dabei aus dem Spannungsfall, den der Fehlerstrom beim Anlagenerder erzeugt (Bild 2). Sie berechnet sich mit Hilfe der zweiten Definitionsgleichung für den Elektroschutz:

$$U_F = I_F \cdot R_A$$

$U_F$ Fehlerspannung (fault-voltage)
$I_F$ Fehlerstrom (fault-current)
$R_A$ Erdungswiderstand der Anlage (earthing resistance of the installation)

Die *Fehlerspannung* ist also die Spannung, die bei einem Isolationsfehler zwischen berührbaren oder fremden leitfähigen Teilen und der Bezugserde auftritt. Beim Berühren aktiver Teile versteht man definitionsgemäss unter Fehlerspannung die Netzspannung gegen die Bezugserde. Die Fehlerspannung wird konventionell mit einem Spannungsmesser mit einem Innenwiderstand von etwa 40 kOhm gemessen. Die Begründung dafür und eine anschauliche Deutung für den Menschen findet sich in [4].

*Dritte Definitionsgleichung für den Elektroschutz*

In dem bereits erwähnten IEC-Report 479, Teil 1, dritte Ausgabe (1994), sind Angaben über die Höhe der Körperwiderstände für Wechselstrom 50/60 Hz, für Gleichstrom und im Teil 2, zweite Ausgabe (1987), für höhere Frequenzen enthalten. Überschlägig kann man für Wechselstrom 50 Hz für den Stromweg Hand–Hand oder Hand–Füsse mit unteren Werten zwischen 500 Ohm bis 1000 Ohm bei Berührungsspannungen über 100 V (Hautdurchbruch) rechnen. Unter 100 V und bei kleinen Berührungsflächen liegen die Körperwiderstände bei einigen 10 kOhm, und damit würde man mit einem Voltmeter mit 40 kOhm Innenwiderstand für diese Bedingungen die Berührungsspannung etwa praxisnah messen. Bei grossflächiger Berührung und Spannungen über 100 V wären 1000 Ohm Innenwiderstand für Berührungsspannungsmessungen zu wählen. Der Verlauf der Fehlerspannung in der Umgebung der Erder hängt von der Form der Erder ab, so dass sich der Spannungstrichter in vielfältigster Art ausbilden kann (Bild 2). Misst man in der Umgebung des Erders mit

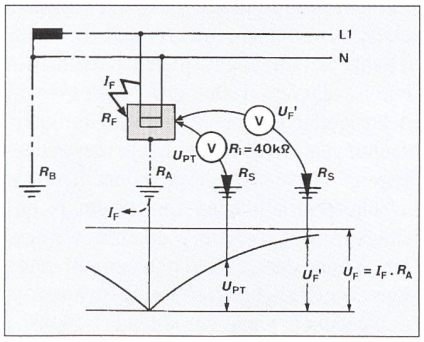


**Bild 2 Fehlerspannung und prospektive Berührungsspannung bei einem Isolationsfehler in einem geerdeten Gerät**

$U_F$ Fehlerspannung
$I_F$ Fehlerstrom
$U_{PT}$ prospektive Berührungsspannung (Teilfehlerspannung im Überbrückungsbereich)
$U_F'$ Teilfehlerspannung ausserhalb des Überbrückungsbereiches
$R_A$ Erdungswiderstand der Verbraucheranlage
$R_B$ Betriebserdung des Verteilungsnetzes
$R_F$ Fehlerwiderstand (z. B. Lichtbogen) des Isolationsfehlers
$R_i$ Innenwiderstand des Voltmeters
$R_S$ Erdungswiderstand der Messsonde

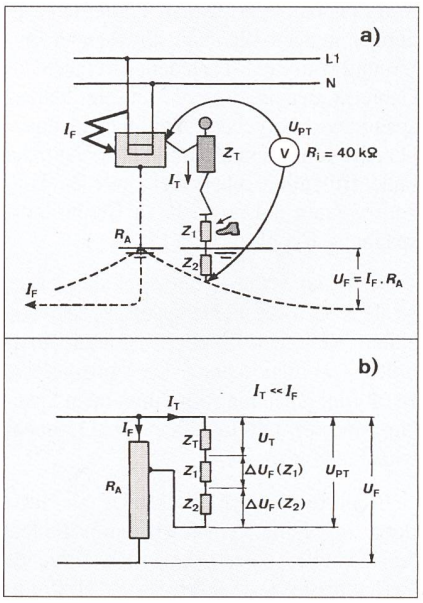


**Bild 3 Zusammenhang zwischen Fehlerspannung $U_F$, prospektiver Berührungsspannung $U_{PT}$ und Berührungsspannung $U_T$ bei geerdetem Betriebsmittel**

*a)* Gesamtdarstellung
*b)* Widerstandsschema für die Aufteilung der prospektiven Berührungsspannung
$R_A$ Erdungswiderstand der Verbraucheranlage
$R_i$ Innenwiderstand des Voltmeters
$I_F$ Fehlerstrom über den Erder
$I_T$ Berührungsstrom durch den Menschen
$Z_T$ Körperimpedanz
$Z_1$ Zusatzimpedanz durch Bekleidung, zum Beispiel Schuhwerk
$Z_2$ Zusatzimpedanz durch den Standort, zum Beispiel Fussausbreitungswiderstand, Längswiderstand der Umgebung (Mauern, Fussböden usw.)
$U_F$ Fehlerspannung
$\Delta U_F(Z_1)$ Teilfehlerspannung (Kleidung)
$\Delta U_F(Z_2)$ Teilfehlerspannung (Standort, Gebäude)
$U_{PT}$ prospektive Berührungsspannung
$U_T$ Berührungsspannung

Messsonden, so wird man Teilfehlerspannungen messen, die in entsprechender Entfernung vom Erder nach dem Erreichen des Gebietes der Bezugserde in die Fehlerspannung übergehen. Teilfehlerspannungen, die von einem Menschen oder Nutztier ohne Hilfsmittel überbrückt werden können, werden als prospektive Berührungsspannung $U_{PT}$ bezeichnet [5].

*Prospektive Berührungsspannung* ($U_{PT}$) ist jener Teil der Fehlerspannung, der von einem Menschen (ohne Hilfsmittel) überbrückt werden kann. Die prospektive Berührungsspannung wird mit einem Spannungsmesser mit ungefähr 40 kΩ Innenwiderstand gemessen.

Berührt nun ein Mensch oder ein Nutztier im Falle eines Isolationsfehlers Anlagenteile, so ergeben sich folgende Verhältnisse: $U_{PT}$ wirkt als Ersatzstromquelle, deren Quellenspannung durch den geringen Stromfluss über den Menschen nicht verändert wird, sondern nur von der räumlichen Potentialverteilung der Fehlerspannung abhängt. Allgemein gilt:

$$U_{PT} = \alpha_p \cdot U_F$$

mit $\alpha_p$ als Potential-Minderungsfaktor. Er ist 0 bei wirksamem Potentialausgleich und 1 beim Berühren leitfähiger Teile, die das Potential der Bezugserde führen. $\alpha_p$ hat also Werte zwischen 0 und 1. Er kann leicht gemessen werden. Man misst die Fehlerspannung $U_F$ und dann die Spannung zwischen den zu untersuchenden leitfähigen Anlageteilen $U_{PT}$ mit einem Spannungsmesser von 40 kΩ Innenwiderstand.

$U_{PT}$ treibt den Berührungsstrom durch Mensch oder Tier, wobei meist ausser der Körperimpedanz $Z_T$ noch Zusatzwiderstände im Stromkreis liegen (Bild 3), und zwar $Z_1$ als Zusatzwiderstände durch die Bekleidung, zum Beispiel Schuhwerk, und $Z_2$ als Zusatzwiderstände durch den Standort, zum Beispiel Fussausbreitungswiderstand oder Längswiderstände der Umgebung (Mauern, Fussböden usw.). Damit ergibt sich die dritte Definitionsgleichung für den Elektroschutz:

$$U_{PT} = \alpha_p \cdot U_F = U_T + U_F(Z_1) + U_F(Z_2)$$

Für den Zusatzwiderstand des Standorts $Z_2 = R_2$ ergibt sich für den Menschen $R_2 = (1{,}6 \ldots 2{,}2) \cdot \rho$ und für den Huf eines Rindes $R_2 = 5 \cdot \rho$, also für vier Hufe parallel $1{,}25 \cdot \rho$. Dabei ist $\rho$ der spezifische Erdwiderstand in Ohmmeter [6].

Die Berührungsspannung ist also meist kleiner als die Fehlerspannung oder die prospektive Berührungsspannung. Sie ist Null bei isolierendem Standort und kann maximal den Wert der Fehlerspannung erreichen, wenn ein Teil berührt wird, der das Potential der Bezugserde führt.

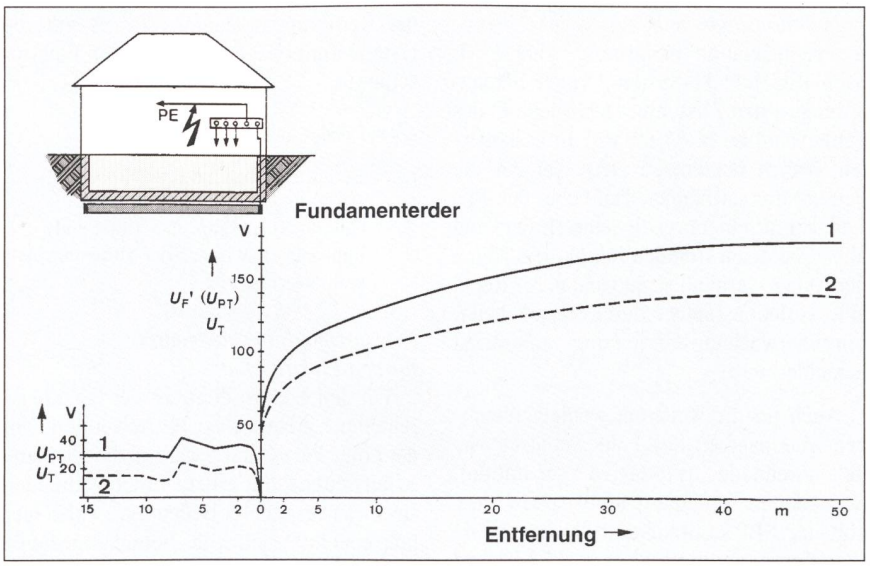


**Bild 4 Verteilung der Teilfehlerspannungen und der Berührungsspannungen innerhalb und ausserhalb eines Gebäudes mit Fundamenterder**

*1* Teilfehlerspannungen (gemessen mit einem Voltmeter mit 40 kΩ Innenwiderstand)
*2* Berührungsspannungen (gemessen mit der üblichen Metallplatte mit einem Voltmeter mit 3000 Ω Innenwiderstand, der zum Zeitpunkt der Messung noch genormt war)

## Fehlerspannung, Potentialverteilungen und Restrisiko

Die Verteilung der Fehlerspannung bei einem Gebäude mit Fundamenterder zeigt Bild 4. Man erkennt, dass schon wenige Meter ausserhalb der Gebäude, zum Beispiel im Garten, die Spannungstrichter steil ansteigen und gefährliche Fehlerspannungen gemessen werden.

Auch über die Potentialverteilung im Innern von Gebäuden lassen sich Aussagen machen. Ohne Erdungssystem (Bild 5, *a*) nimmt das Gebäude über die schlecht leitenden Baustoffe das Potential der Bezugserde an. Elektrisierungen beim Berühren aktiver Teile sind nicht möglich (man kann dies leicht feststellen, wenn man etwa den Aussenleiter einer Steckdose über ein hochohmiges Voltmeter mit einer Hand verbindet und mit der anderen Hand versucht, grossflächig Wände oder Böden zu berühren). Infolge der hohen Schleifenwiderstände bricht die Berührungsspannung sofort zusammen. Betreibt man in einem derartigen Gebäude Elektrogeräte ohne Schutzleiter, dann besteht das Restrisiko einer Elektrisierung nur beim Berühren von zwei Betriebsmitteln mit Körperschlüssen mit verschiedenen aktiven Teilen (z. B. *L1* und *N*). Diese Gefährdung kann durch FI-Schutzeinrichtungen nicht erkannt werden. Allerdings wird der Schutz durch die isolierenden Räume sofort hinfällig, wenn man leitfähige Standorte betritt, zum Beispiel den Garten.

Wird nun ein Erdungssystem installiert (Fundamenterder und Schutzleiter, siehe Bild 5, *b*), dann ändert sich im fehlerfreien Zustand der Anlage nichts gegenüber früher. Tritt ein Körperschluss auf, dann entsteht durch den Fundamenterder ein Spannungstrichter, die Gebäudeteile nehmen hochohmig die volle Fehlerspannung an, ebenso wie die Elektrogeräte niederohmig über den Schutzleiter. Fremde leitfähige Teile, die nicht mit dem Schutzleiter verbunden sind, zum Beispiel Heizkörper, bilden praktisch keine Gefahr und dürfen deshalb nicht an den Schutzleiter angeschlossen werden. Doppelte Körperschlüsse sind nicht mehr möglich, dafür besteht Gefahr beim gleichzeitigen Berühren aktiver Teile und Körper von Elektrogeräten bei Schutzleiterunterbrechungen und Schutzleiterverwechslungen. Diese Gefahren können durch FI-Schutzeinrichtungen mit einem Nennfehlerstrom von 30 mA erkannt werden. Der Schutz durch FI-Schutzeinrichtungen gegen gefährliche Berührungsströme ist auch gegeben, wenn gut leitende Standorte betreten werden.

Diese Überlegungen gelten für die Fehlerstrom-Schutzerdung und kleine Fehlerströme, bei denen die Spannungsfälle in den Schutzleitern vernachlässigbar sind. Bei der Neutralleiter-Schutzerdung addieren sie sich zum Potential des Fundamenterders.

## Konventionelle Fehlerspannungsgrenze für Wechselstrom 50/60 Hz

Nach diesen Klarstellungen ist es möglich, eine vernünftige Grenze für die Fehler-

spannung für den Schutz von Menschen und Nutztieren anzugeben [6]. Für die konventionelle Fehlerspannungsgrenze $U_{FL}$ ist zu überlegen, welches Restrisiko man noch tolerieren kann, und damit kommt man zu Überlegungen betreffend den Stromweg, die Zusatzwiderstände (wie Schuhwerk usw.), Standortwiderstand, Wahrscheinlichkeit des Fehlers und des gleichzeitigen Berührens sowie wirtschaftliche Gesichtspunkte. Nimmt man eine Berührungsspannung von 50 V (Wechselstrom, 50 Hz) an, so ergeben sich mit einer Körperimpedanz $Z_T$ (5%-Werte der Population) je nach Stromweg die Berührungsströme $I_T$ nach Tabelle I.

| Stromweg | Körperimpedanz $Z_T$ (Ohm) | Berührungsstrom $I_T$ (mA) |
|---|---|---|
| Hand–Hand | 1450 | 35 |
| beide Hände–beide Beine | 580 | 85 |
| beide Hände–Rumpf | 360 | 140 |

**Tabelle I Stromweg-Abhängigkeit der Körperwiderstände und Berührungsströme bei Menschen**

Körperimpedanzen $Z_T$ (gerundete 5%-Werte) und Berührungsströme $I_T$ für verschiedene Stromwege bei einer Berührungsspannung von 50 $V_{eff}$ nach IEC-Report 479, Teil 1 (dritte Auflage 1994). Für den Stromweg Hände–Beine wurde ein Korrekturfaktor von 0,8 verwendet.

Nun liegt für Einwirkungsdauern von mehreren Sekunden für Längsdurchströmungen (z. B. Hand–Füsse) der zulässige Berührungsstrom bei 50 mA, wenn man den Wert für eine statistische Flimmerwahrscheinlichkeit von 5% heranzieht, bei der Herzkammerflimmern praktisch ausgeschlossen ist. Man erkennt aus Tabelle I, dass die im Unfallgeschehen zu erwartenden Ströme über der Grenze des Tolerierbaren liegen. Beim extremen Stromweg beide Hände–Rumpf (der Mensch sitzt am Boden und hält mit beiden Händen das fehlerhafte Elektrogerät) ist allerdings mit 140 mA das Auftreten von Herzkammerflimmern bei Längsdurchströmungen im IEC-Report 479 mit einer Wahrscheinlichkeit über 50% angegeben. Man hat früher dieses Risiko offenkundig doch toleriert, weil schon Osypcka die Grenze zum Kammerflimmern mit 80 mA angibt [7]. Es soll aber klar gesagt werden, dass 50 mA als Berührungsstrom bereits eine schwere Elektrisierung bedeuten und zulässige Berührungsspannungsgrenzen eigentlich gar nicht angegeben werden können.

Wie früher erklärt, liegen aber die Fehlerspannungen immer höher als die Berührungsspannungen. Welche Fehlerspannungen man zulassen kann, hängt von den Umständen ab. In der Regel liegen die Berührungsspannungen weit unter der Hälfte der Fehlerspannung. Im Verteilungsnetz wird man daher aufgrund der jahrzehntelangen Erfahrungen mit der Nullung wegen der Spannungstrichter und der Seltenheit der Fehler sicher 100 V Fehlerspannung zulassen können. In den Verbraucheranlagen sind bei Einhaltung der Nullungsbedingungen noch keine tödlichen Unfälle von Menschen bekanntgeworden. Dabei liegen die Fehlerspannungen in der Regel unter einem Viertel der Netzspannung gegen Erde, das waren bisher 220 V/4 = 55 V.

Berücksichtigt man Spannungsschwankungen und die neue Netzspannung von 230 V gegen Erde, so kommt man zu zulässigen Fehlerspannungen bei Netzstörungen oder Isolationsfehlern in den Verbraucheranlagen bis etwa 65 V. Man könnte 65 V konventionell als zulässige Grenze der Fehlerspannung also dauernd in Verbraucheranlagen zulassen. Im Verteilungsnetz und am Ende einzelner Stromkreise in Verbraucheranlagen, die durch Neutralleiter-Schutzerdung (Nullung) geschützt sind, ist dann bei etwa 100 V Fehlerspannung die Ausschaltung innerhalb der technisch möglichen Grenzen (im Verteilungsnetz innerhalb einiger Minuten, in den Verbraucheranlagen innerhalb einiger Sekunden) zu fordern.

Es soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass mit dieser Festlegung, wegen der niedrigeren prospektiven Berührungsspannung $U_{PT}$ und der Zusatzwiderstände (Standort, Schuhe), die Berührungsspannungen bei vernachlässigbarem Restrisiko nur mehr in der Grössenordnung von wenigen zehn Volt liegen. Für den Stromweg Hand–Hand gilt ausserdem der Herzstromfaktor 0,4, und demnach sind Querdurchströmungen in bezug auf das Herzkammerflimmern nur etwa halb so gefährlich wie Längsdurchströmungen.

Sehr genaue Untersuchungen des Körperwiderstandes und der Flimmerschwellen von Nutztieren haben nun gezeigt, dass eine konventionelle Fehlerspannungsgrenze von 65 V für Wechselstrom 50/60 Hz durchaus geeignet ist, das Restrisiko für Nutztiere so gering zu halten, dass es für landwirtschaftliche Betriebsstätten mit Potentialsteuerung in den Viehställen vertretbar erscheint [8]. Diese Erkenntnis, dass im Prinzip für Nutztiere die gleiche konventionelle Fehlerspannungsgrenze $U_{FL}$ von 65 V festgelegt werden kann, hat eine sehr grosse Bedeutung für die Vereinfachung der Errichtungsvorschriften für Niederspannungsanlagen. Vor allem beseitigt sie die technisch unrichtige Diskriminierung

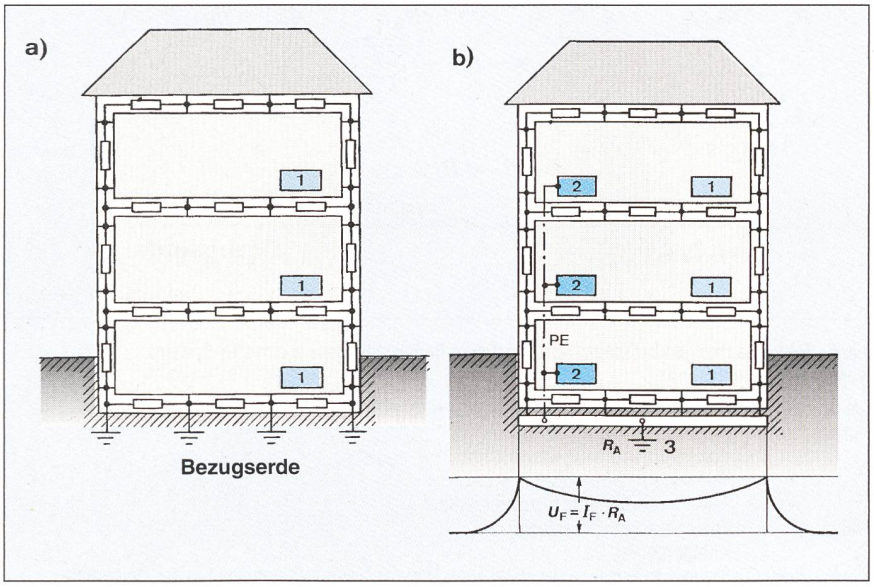


**Bild 5 Prinzipielle Darstellung des elektrischen Schemas von Gebäuden aus schlecht leitenden Baustoffen mit Rohrsystemen aus Isolierstoff**

*a)* ohne Fundamenterder und ohne Schutzleiter
*b)* mit Fundamenterder und mit Schutzleiter; Teilwiderstände (schematisch) der schlecht leitenden Gebäudeteile (0,1 ... einige MΩ)
*1* grossflächige, nicht geerdete, gut leitende Metallteile (z. B. Heizkörper)
*2* Körper eines mit dem Schutzleiter verbundenen Gerätes
*3* Fundamenterder

der Neutralleiter-Schutzerdung durch die bisher geforderte 25-V-«Berührungsspannungsgrenze» für landwirtschaftliche Betriebsstätten.

Ausdrücklich sei darauf hingewiesen, dass die bisher genormten «konventionellen Berührungsspannungsgrenzen» nichts mit den Nennspannungen für Schutz- und Funktionskleinspannung zu tun haben. Die bisher üblichen Werte von 42 V und 24 V sollten beibehalten werden, wobei dann 50 V und 25 V vielleicht als höchstzulässige Werte für die Leerlaufspannungen der Isoliertransformatoren vorgeschrieben werden könnten.

### Konventionelle Fehlerspannungsgrenzen für Gleichstrom und für Wechselstrom höherer Frequenz

Derzeit werden für Gleichstrom in IEC-Publ. 364, Abschnitt 41, die Werte 120 V und 60 V als «konventionelle Berührungsspannungsgrenzen» genannt. Es dürfte jedoch bei der Normung dieser Werte durch die Arbeitsgruppe 9 des TC 64 der IEC ein Missverständnis bei der Interpretation des IEC-Reports 479, Teil 2, Kapitel 5, aufgetreten sein. Dort werden nämlich die Wirkungen von Gleichstrom mit jenen von Wechselstrom 50/60 Hz bei gleicher Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Herzkammerflimmern für Berührungsströme mit einer Durchströmungsdauer über oder unter einer Herzperiode verglichen.

Bei diesem Vergleich muss man von der Stromstärke ausgehen, da diese physikalische Grösse für die Wirkungen auf Mensch und Nutztier massgebend ist. Die richtige Umrechnung muss daher so erfolgen, dass zunächst für Wechselspannung (AC) 50 V oder 25 V für den Vergleichsstromweg (z. B. Hand–Hand mit den statistisch am besten gesicherten Mittelwerten der Körperimpedanz) der Berührungsstrom berechnet wird, der dann den äquivalenten Gleichstromwert mit den in IEC-Report 479, Teil 2, Kapitel 5, angegebenen Umrechnungen ergibt. Aus diesem Gleichstromwert mit dem zugeordneten Körperwiderstand kann man die Gleichspannung berechnen, die die gleichen physiologischen Wirkungen ergibt wie eine Wechselspannung von 50 V oder 25 V. Wendet man diese Berechnung an, dann findet man, dass 50 V AC bzw. 25 V AC einer Gleichspannung von 90 V DC bzw. 45 V DC entsprechen. Den genauen Berechnungsvorgang kann man der Literatur entnehmen [9].

Hinsichtlich der Wechselströme mit höherer Frequenz kann nach IEC-Report 479 folgendes überlegt werden. Bei höheren Frequenzen sinkt die Gefährlichkeit insbesondere für Kammerflimmern mit steigender Frequenz. Überträgt man die Berührungsströme auf Berührungsspannungen, dann darf man auch hier nicht vergessen, dass die Körperimpedanzen mit steigender Frequenz sinken. Bei dem wenigen Versuchsmaterial, das vorhanden ist, liegt es nahe, auch für höhere Frequenzen bis etwa 2000 Hz den gleichen konventionellen Grenzwert für die Fehlerspannung anzunehmen wie für 50 Hz, also 65 V.

## Fehlerspannungen und Berührungsspannungen bei Neutralleiter-Schutzerdung und bei Fehlerstrom-Schutzerdung

Als Beispiele für die Grundprinzipien der neuen Schutzphilosophie sollen in dieser Arbeit nur die für Hausinstallationen wichtigsten Massnahmen des Fehlerschutzes Neutralleiter-Schutzerdung PNE (Nullung, protective neutral earthing; TN-System nach IEC 364) und Fehlerstrom-Schutzerdung PRE (Fehlerstrom-Schutzschaltung, protective residual current earthing; TT-System nach IEC 364 mit Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen zur Fehlerausschaltung) besprochen werden. Gerade beim Fehlerschutz sind Wahrscheinlichkeitsüberlegungen und die Unfallerfahrung von grösster Bedeutung, etwa wie sie Homberger sehr gründlich erarbeitet hat [10–12]. Zur Beurteilung der bei Isolationsfehlern auftretenden Fehlerspannungen bei PNE sei zunächst daran erinnert, dass diese durch die Impedanzen von Aussenleiter sowie PEN-Leiter und PE-Leiter und die Verteilung der Betriebs- und Verbrauchererdungen bestimmt werden (Bild 6).

Umfangreiche Messungen haben gezeigt, dass bei Kurzschlüssen zwischen Aussenleiter und PEN-Leiter im Verteilungsnetz die Fehlerspannungen des PEN-Leiters nur selten 65 V überschreiten und

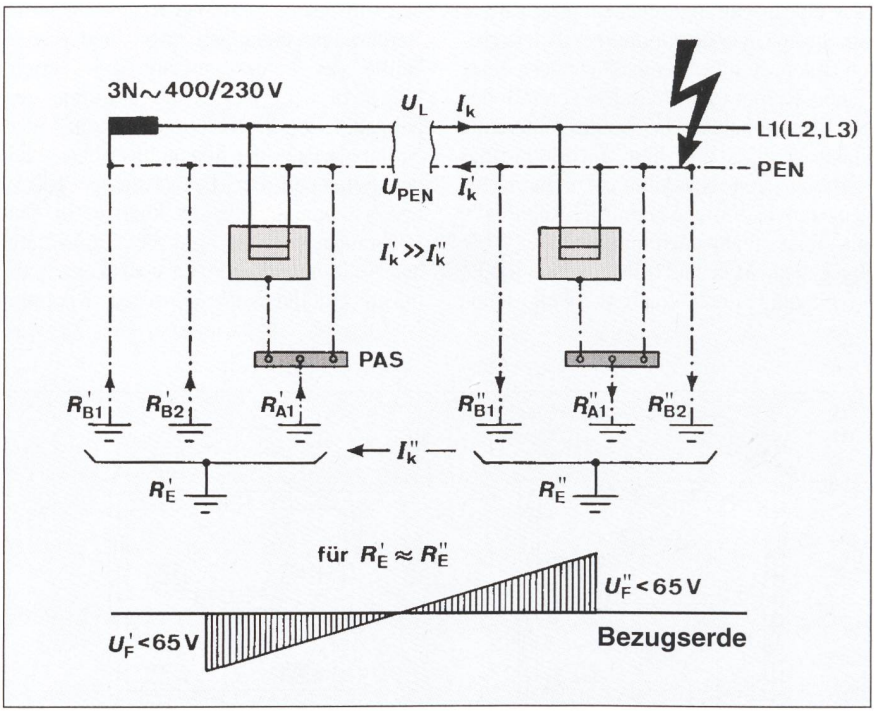


**Bild 6 Fehlerspannungen bei einem Isolationsfehler im Verteilungsnetz eines TN-Systems (vereinfachte Darstellung)**

Die Fehlerspannungen, welche bei einem Kurzschluss Aussenleiter – PEN-Leiter in die Anlage verschleppt werden, bleiben in der Regel unter 65 V.

| | |
|---|---|
| $I_k$ | Kurzschlussstrom im Aussenleiter |
| $I_k'$ | Teil-Kurzschlussstrom im PEN-Leiter |
| $I_k''$ | Teil-Kurzschlussstrom durch die Erde |
| PAS | Potentialausgleichsschiene |
| $R_A$ | Anlagenerder |
| $R_{B1}', R_{B2}', R_{A1}'$, ... | Erdungswiderstände des PEN-Leiters und der Verbraucheranlagen in der Umgebung der Transformatorenstation |
| $R_{B1}'', R_{B2}'', R_{A1}''$, ... | Erdungswiderstände des PEN-Leiters und der Verbraucheranlagen in der Nähe der Netzausläufer |
| $R_E', R_E''$ | resultierende Gesamterdungswiderstände |
| $U_L$ | Spannungsfall im Aussenleiter; ist immer grösser als 115 V |
| $U_{PEN}$ | Spannungsfall im PEN-Leiter; ist immer kleiner als 115 V, da ein Teil des Kurzschlussstromes über die Betriebs- und Verbrauchererdungen fliesst |
| $U_F'$ | Fehlerspannung des PEN-Leiters in der Nähe der Transformatorenstation |
| $U_F''$ | Fehlerspannung des PEN-Leiters in der Nähe der Netzausläufer |

dann auch nur an den Enden von Netzausläufern. In Verbraucheranlagen gilt das gleiche, wobei infolge des Potentialausgleichs die Berührungsspannungen fast immer wesentlich unter den Fehlerspannungen liegen, meist bei wenigen Volt oder wenigen zehn Volt. Nur an den Enden der Netzausläufer und in den Verbraucheranlagen am Ende einzelner Stromkreise können bei widerstandslosen Isolationsfehlern in seltenen Fällen Fehlerspannungen auftreten, die bei 100 V liegen, in jedem Falle aber unter der Hälfte der Systemspannung gegen Erde.

Dies bedeutet, dass die Haut ihre Schutzfunktion weitgehend behält und die Ausschaltzeiten der Fehler von untergeordneter Bedeutung sind. In den Verbraucheranlagen genügen Zeiten von einigen Sekunden, um Fehler mit genügender Sicherheit abzuschalten. Dazu kommt, dass die Stromkreise mit Steckdosen durch den Zusatzschutz mit FI-Schutzschaltern mit einem Nennfehlerstrom $I_{\Delta N} \leq 30$ mA geschützt sind und dass dadurch bei den ortsveränderlichen Geräten ein Isolationsfehler innerhalb von einigen zehn Millisekunden ausgeschaltet wird.

Hier sei noch einmal auf einen grundsätzlichen Mangel in IEC-Publ. 364, Abschnitt 41, hingewiesen. Darin werden Überstrom-Schutzeinrichtungen und Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen als Ausschalteinrichtungen für den Fehlerschutz bei PNE als gleichwertig angeführt. FI-Schutzeinrichtungen können aber nur auslösen, wenn ein Isolationsfehler über den Schutzleiter einen Fehlerstrom zum Anlagenerder oder PEN-Leiter erzeugt. Bei Aussenleiter-Neutralleiter-Kurzschlüssen erfolgt keine Auslösung (Bild 7). Liegen wesentliche Impedanzen des PEN-Leiters vor dem FI-Schutzschalter, dann ist seine Schutzfunktion nicht mehr gegeben, und man muss verlangen, dass die vorgeschaltete Überstrom-Schutzeinrichtung (Vorsicherung) ausschaltet. Man wird in diesem Fall aber längere Ausschaltzeiten wegen der reduzierten Fehlerspannungen (Spannungsfall am N-Leiter) sicher tolerieren können (m-Faktor von 2,5; siehe unten). In jedem Fall bewirken bei PNE mehrere Schutzapparate (Sicherungen, FI-Schalter) in Serie eine sichere Ausschaltung bei Isolationsfehlern, wenn auch mit verschiedenen Ausschaltzeiten.

Für die Berechnung der höchstzulässigen Widerstände für die Fehlerschleifen kann man aufgrund dieser Überlegungen sogenannte Ausschaltfaktoren $m$ wählen, die die Vielfachen der Nennströme der Überstrom-Schutzeinrichtungen als kleinste vorgeschriebene Ausschaltströme festlegen, womit gleichzeitig die Ausschaltzeiten innerhalb einiger Sekunden

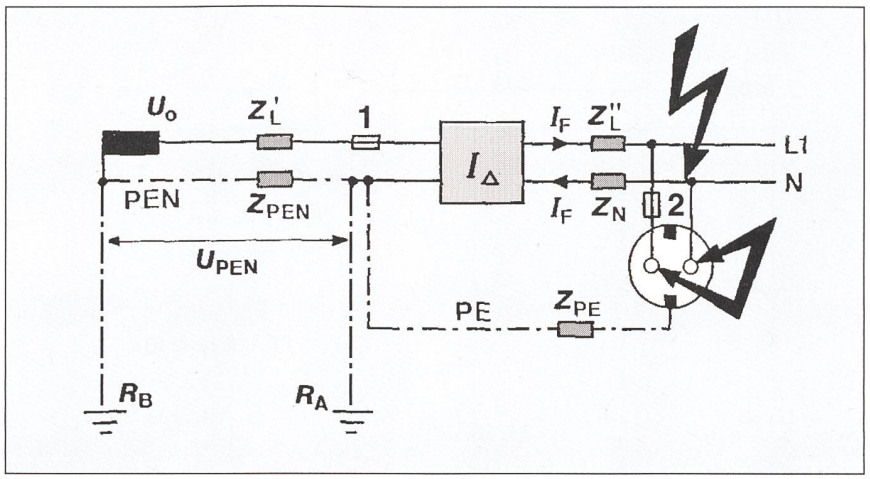


**Bild 7 Kein Auslösen des FI-Schutzschalters bei L-N-Kurzschlüssen**

Bei Kurzschlüssen L-N in der Verbraucheranlage versagen FI-Schutzschalter als Schutz gegen PEN-Leiter-Fehlerspannungen.

*1* Vorsicherung
*2* Stromkreissicherung
$U_{PEN}$ Spannungsfall am PEN-Leiter
$R_A$ Erdung der Verbraucheranlage
$R_B$ Betriebserdung des PEN-Leiters in der Umgebung der Transformatorenstation

bestimmt sind. Diese Vorgangsweise ist durch den Installateur vollziehbar, wogegen die Vorschreibung bestimmter maximaler Ausschaltzeiten zum Beispiel von 0,4 s für Steckdosenstromkreise und von 5 s für fest installierte Geräte unpraktikabel ist, weil dafür die Auslösekennlinien der Schutzapparate und deren Streubereiche, zum Beispiel bei der Anlagenprüfung vor Ort, bekannt sein müssten.

Den Erfahrungen mit der Zuverlässigkeit der Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen [13] und theoretischen Überlegungen folgend [14], ist es zulässig, bei PNE FI-Schutzschalter zu verwenden, gleichgültig, ob deren Funktion von der Netzspannung abhängt oder nicht, wobei besondere Eigenschaften beim Auftreten von Fehlerströmen mit Gleichstromkomponenten nicht gefordert werden müssen.

Für die Ausschaltfaktoren $m$ könnte man die Werte nach Tabelle II vorschlagen. Ein wesentlicher Vorteil von PNE liegt also in der Absenkung der Fehlerspannungen im Falle eines Isolationsfehlers infolge des Spannungsfalls am Aussenleiter und der Verteilung der Betriebserden des PEN-Leiters. Da die Erdungen der Verbraucheranlagen mit dem PEN-Leiter verbunden sind, trägt dies zu einer Absenkung des Gesamterdungswiderstandes des PEN-Leiter-Systems bei, wodurch auch der Überspannungsschutz des PNE-Netzes verbessert wird.

Im Gegensatz zu PNE liegen bei der Fehlerstrom-Schutzerdung PRE (früher

| Überstrom-Schutzeinrichtung | **Ausschaltfaktor *m*** | |
|---|---|---|
| | in Verbraucheranlagen | in Kabel- und Freileitungsnetzen einschliesslich Hausanschlusskasten |
| Schmelzsicherungen Type gG (IEC 269) | 5[1, 4] | 2,5[3] |
| Leitungsschutzschalter (IEC 898) | | |
| Type B | 5[2, 4] | |
| Type C | 10[2, 4] | 2,5[3] |
| Type D | 10[2, 4] | |

**Tabelle II Ausschaltfaktoren**

1 Für von gG abweichende Kennlinien ist $m$ so zu wählen, dass die Ausschaltung innerhalb von 5 s erfolgt.
2 Für von B, C, und D abweichende Kennlinien ist $m$ so zu wählen, dass die Magnetauslösung des LS-Schalters anspricht.
3 In einigen Ländern ist ein Ausschaltfaktor $m = 1{,}6$ erlaubt.
4 Wenn Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen mit Überstrom-Schutzeinrichtungen (Nennstrom $I_N$) in Serie geschaltet sind, ist ein Ausschaltstrom $I_A = 2{,}5 \cdot I_N$ (m = 2,5) für Endstromkreise und Sonderanwendungen zulässig.

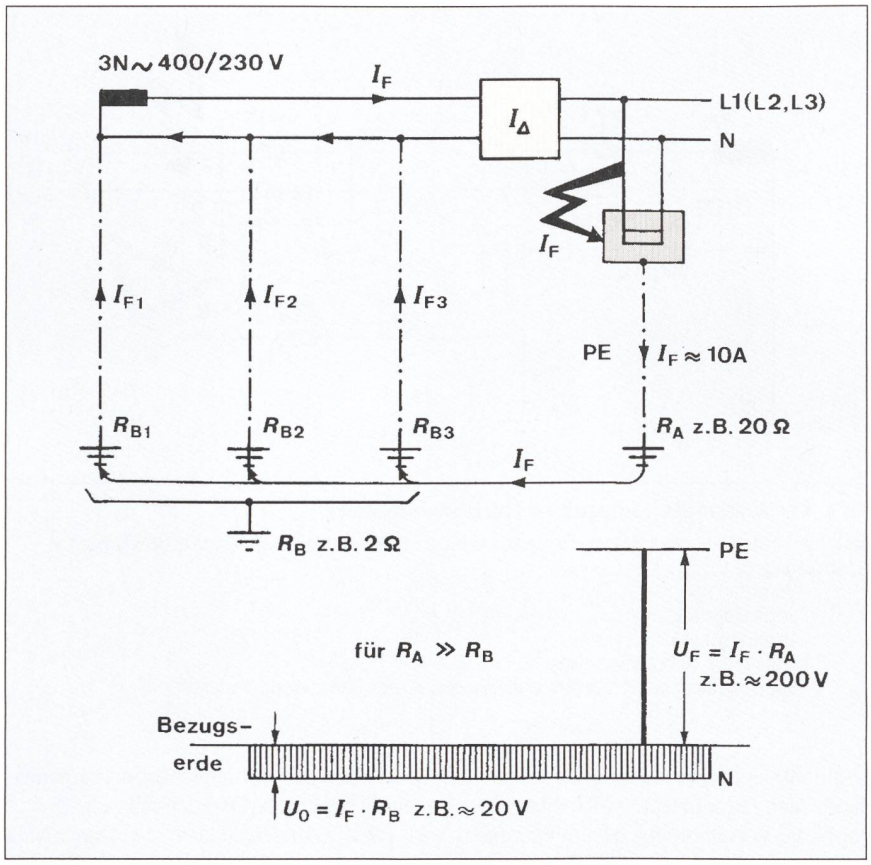


**Bild 8 Fehlerspannungen bei einem Isolationsfehler in einer Verbraucheranlage im TT-System (vereinfachte Darstellung)**

Die Fehlerspannung des Schutzleiters einer fehlerbehafteten Verbraucheranlage liegt in der Regel bei 200 V und tritt bei allen an den Schutzleiter angeschlossenen leitfähigen Anlagenteilen auf.

$I_F, I_{F1}, I_{F2}, I_{F3}$, ... Fehlerströme
*PE* Schutzleiter in der fehlerhaften Verbraucheranlage
$R_A$ Erdungswiderstand der Verbraucheranlage
$R_{B1}, R_{B2}, R_{B3}$, ... Betriebserdungswiderstände des Neutralleiters
$R_B$ Gesamterdungswiderstand aller Betriebserdungen des Neutralleiters im Verteilungsnetz
$U_F$ Fehlerspannung des Schutzleiters der Verbraucheranlage ($U_F = I_F \cdot R_A$)
$U_0$ Fehlerspannung (Spannungsverschiebung) des Neutralleiters

Fehlerstrom-Schutzschaltung) im Falle eines Isolationsfehlers die Fehlerspannungen praktisch immer bei der Netzspannung gegen Erde, also beim üblichen Netzsystem 3/N AC 400/230 V bei 200 V. Der Erdungswiderstand der Verbraucheranlage ist ja immer wesentlich höher als der Gesamtwiderstand aller Betriebserden des Neutralleiters im Netz (Bild 8).

Durch die Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen erfolgt die Ausschaltung innerhalb von wenigen Millisekunden bei Stromstärken in der Grössenordnung von Ampere, die als Fehlerstrom meistens auftreten, da die Erdungswiderstände der Verbraucheranlagen (Fundamenterder) meist einige zehn Ohm betragen. Versagt allerdings der FI-Schalter, dann sprechen die Überstrom-Schutzeinrichtungen nicht an, und alle mit dem Schutzleiter verbundenen leitfähigen Teile der Anlage führen die hohe und sehr gefährliche Fehlerspannung, die immer weit über 100 V liegt. Dies bedeutet, dass der Hautwiderstand sofort vernachlässigbare Werte annimmt und dass in ungünstigen Unfallsituationen oft Berührungsströme von einigen hundert Milliampere zum Fliessen kommen. In der gesamten Anlage besteht also höchste Unfallgefahr.

Der FI-Schalter begrenzt ja nicht den Fehlerstrom, der unabhängig vom Nennfehlerstrom des Schalters ist und ausschliesslich durch die Impedanzen der Erdfehlerschleife bestimmt wird (siehe Bild 8). Der Zuverlässigkeit der Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen kommt also beim PRE-Fehlerschutz höchste Bedeutung zu [13]. Aber selbst wenn in Zukunft die Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen wesentlich verbessert werden, bleiben sie immer mechanische Schaltgeräte, und die derzeitige Installationspraxis, nur einen Schutzapparat für die geschützten Anlagenteile zu verlangen, scheint in Anbetracht des sehr hohen Risikos beim Versagen nicht vertretbar. Man sollte daher bei PRE immer mindestens zwei Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen in Serie fordern, die gegeneinander selektiv schalten. Dies ist mit einem zentralen FI-Schalter der Bauart *S* und in Serie geschalteten FI-Schaltern zum Schutz der Unterverteilungen leicht möglich.

Sehr wesentlich für PRE ist es auch, dass durch die Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen die Verfügbarkeit der Stromversorgung nicht eingeschränkt werden darf, und das bedeutet das Vermeiden von Fehlauslösungen, zum Beispiel bei Gewittern [15]. Dieses Problem kann durch die Verwendung von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen mit einer minimalen Auslösezeit von 10 ms gelöst werden [16].

## Das Schutzziel für den Potentialausgleich

Die Bedeutung des Potentialausgleichs wird in Abschnitt 41 von IEC-Publ. 364 sicher überschätzt. Es sei darauf hingewiesen, dass mehr als fünfzig Jahre lang Schutzmassnahmen in Anlagen mit leitenden Rohrsystemen ohne Potentialausgleich angewendet worden sind und heute noch in vielen Ländern angewendet werden. Sicherlich erhöht der Potentialausgleich, als eine Art Zusatzschutz, manchmal die Sicherheit in den Anlagen, aber im Prinzip müssen die Massnahmen des Fehlerschutzes so angewendet werden, dass sie auch ohne Potentialausgleich wirksam sind. Die Bedeutung des Potentialausgleichs wird auch infolge der immer häufiger anzutreffenden isolierenden Werkstoffe für Wasser- und Heizungsleitungen ständig geringer, und manchmal erhöht er sogar die Gefahr, statt sie zu verkleinern (Bild 9), weil Spannungsverschleppungen auftreten können und der Standortübergangswiderstand verringert werden kann, wodurch die Gefährdung beim direkten Berühren erhöht wird.

Sicher falsch ist die Bestimmung in IEC-Publ. 364, die den Potentialausgleich als Alternative zu anderen Massnahmen des Fehlerschutzes anbietet. Dabei wird oft von «zone of influence of equipotential bonding», also vom «Einflussbereich des Potentialausgleichs» gesprochen. Man geht dabei von der zweifelhaften Vorstellung aus, dass in der Umgebung des Gebietes, das durch die örtliche Lage der Erder abgegrenzt wird, keine Potentialunterschiede auftreten können.

Nun ist es aber so, dass in der unmittelbaren Umgebung von metallisch leitenden Erdungssystemen wie etwa Banderdern durchaus hohe Potentialunterschiede auftreten können, wenn die Erder in schlecht leitendes Material, wie zum Beispiel Mauerwerk, Beton oder natürliche Böden, ein-

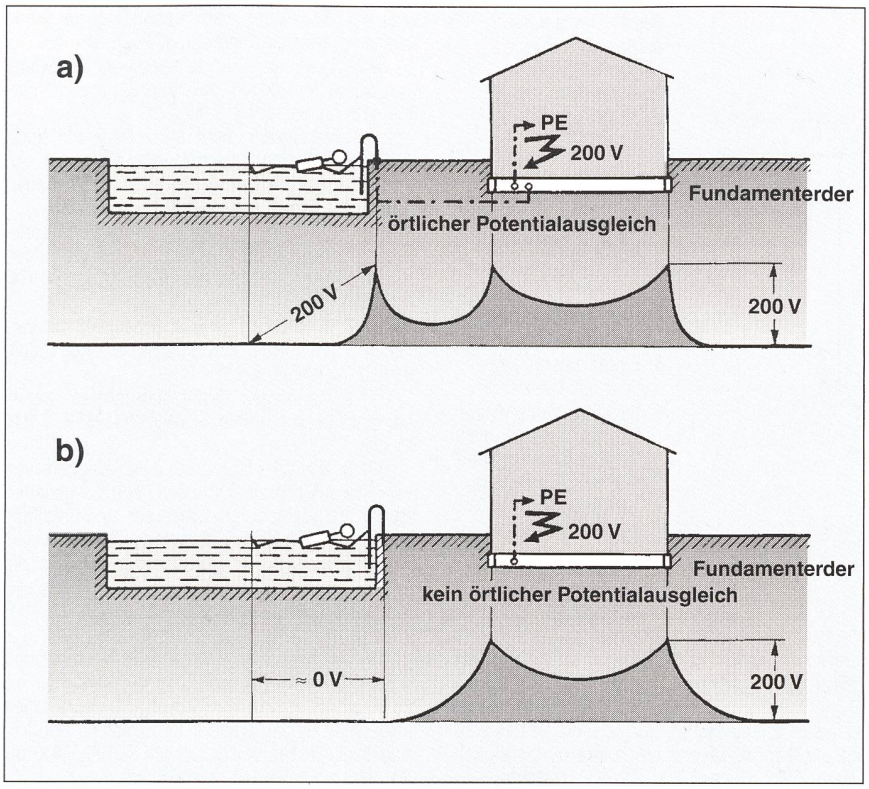


**Bild 9 Erhöhung der Gefahr durch den Potentialausgleich in Schwimmbecken**

*a)* Metallene Leiter des Schwimmbeckens mit dem Potentialausgleich verbunden. Der Badende ist gefährdet. Die Leiter liegt an einer Fehlerspannung von etwa 200 V mit steilem Spannungstrichter.
*b)* Metallene Leiter des Schwimmbeckens nicht mit dem Hauptpotentialausgleich verbunden. Beim Versagen des Fehlerschutzes (z. B. Nichtauslösen eines FI-Schutzschalters) ist der Badende nicht gefährdet, da im Becken nur geringe Potentialunterschiede auftreten.

gebettet sind. Bild 10 zeigt als Beispiel die Potentialverteilung bei vier Banderdern in einer Freiluftstation nach [17]. Die Spannung zwischen einem Aussenerder und einem Punkt in 1 m Entfernung auf der Erdoberfläche beträgt rund 44% der Erderspannung (Fehlerspannung), zwischen den Erdern sinkt das Potential auf etwa 50% der Erderspannung ab. Zwischen den Erdern treten also Potentialunterschiede auf, die man als «Potentiallöcher» bezeichnen könnte. Dies gilt genauso, wie Bild 4 für die Umgebung eines Gebäudes mit Fundamenterder zeigt, wo schon in wenigen Metern Entfernung (z. B. im Hof) nicht mehr von einem Potentialausgleich gesprochen werden kann.

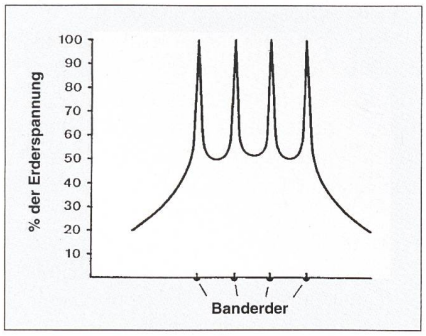


**Bild 10 Potentialverteilung in einer Freiluftstation**

Potentialverteilung bei vier parallelen Banderdern mit einem gegenseitigen Abstand von 10 m, nach [17]

Berücksichtigt man alle diese Überlegungen, so kommt man zu folgender Definition für den Potentialausgleich:

*Potentialausgleich* ist eine Massnahme des Zusatzschutzes zum Verringern oder Beseitigen von Potentialunterschieden zwischen berührbaren und fremden leitfähigen Teilen, gegebenenfalls auch untereinander.

Der Potentialausgleich ist daher nur als Zusatzschutz anzusehen und kann nie eine Alternative zu Massnahmen des Fehlerschutzes sein. Ausserhalb von Gebäuden ist der Potentialausgleich in den meisten Fällen bedeutungslos [18].

## Zusammenfassung und Ausblick

Neues Wissen über die Wirkungen elektrischer Ströme auf Mensch und Nutztier, wie sie etwa in den drei Teilen des IEC-Reports 479 dargestellt sind, die Erkenntnisse aus der Statistik elektrischer Unfälle, die vermehrte Verwendung isolierender Werkstoffe im Gebäudebau und eine neue Schutzphilosophie in Form einer Dreifachkaskade – Basisschutz (Schutz gegen direktes Berühren), Fehlerschutz (Schutz beim indirekten Berühren) und Zusatzschutz – ermöglichen den Aufbau einer einfachen und praxisnahen Norm für die Errichtung elektrischer Anlagen für Wechselstrom 50/60 Hz mit Nennspannungen bis 1000 V.

Dazu werden zunächst klare und verständliche Definitionen vorgeschlagen, und auf den Unterschied zwischen Fehlerspannung, prospektiver Berührungsspannung und Berührungsspannung wird besonders hingewiesen. Aus den Potentialverteilungen innerhalb und ausserhalb von Gebäuden mit den Standort- und Gebäudeinnenwiderständen lässt sich eine konventionelle Fehlerspannungsgrenze von 65 V, wie sie seit mehr als einem halben Jahrhundert bei der Nullung akzeptiert wird, bei vernachlässigbarem Sicherheitsrisiko ableiten.

Gegenüber der bisher in IEC-Publ. 364 benutzten, praxisfremden TN-, TT- und IT-Netzklassifikation werden bessere Bezeichnungen wie Neutralleiter-Schutzerdung (protective neutral earthing), Fehlerstrom-Schutzerdung (protective residual current earthing), Isolationsüberwachungssystem (protective insulation monitoring) usw. vorgeschlagen, und mit der neuen Schutzphilosophie ergibt sich zwanglos ein widerspruchsfreier und praxisnaher Aufbau einer neuen Errichtungsnorm.

Die Neutralleiter-Schutzerdung (derzeit in IEC 364 mit TN-System bezeichnet) hat wegen der starken Absenkung der Fehlerspannungen und wegen der Anwendbarkeit im Verteilungsnetz und in der Verbraucheranlage sowie wegen des besseren Überspannungsschutzes Vorteile gegenüber Einzelerdungen in den Verbraucheranlagen (in IEC 364 derzeit mit TT-System bezeichnet). Für die Ausschaltung der Fehler werden im allgemeinen Überstrom-Schutzeinrichtungen verwendet, für die Ausschaltfaktoren *m* als Vielfache ihres Nennstroms für die praktische Anwendung vorteilhafter sind als die Vorschreibung von Ausschaltzeiten. Infolge der starken Absenkung der Fehlerspannung haben die Ausschaltzeiten bei der Neutralleiter-Schutzerdung nur eine untergeordnete Bedeutung. Bei der Fehlerstrom-Schutzerdung, bisher Fehlerstrom-Schutzschaltung genannt, ist zu beachten, dass im Fehlerfall der Schutzleiter in der ganzen Anlage praktisch die Netzspannung gegen Erde führt. Versagt der FI-Schalter, besteht in der gesamten Anlage ein hohes Unfallrisiko. Da die Verbrauchererdungen nicht mit den Betriebserden des Netzes verbunden werden

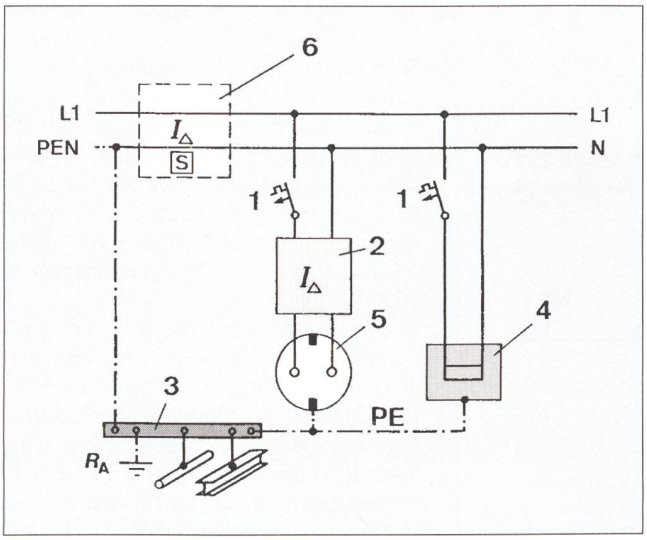


**Bild 11 Prinzip der dreifachen Sicherheit bei der Neutralleiter-Schutzerdung**

1 Überstrom-Schutzeinrichtungen für den Fehlerschutz
2 Fehlerstrom-Schutzschalter für den Zusatzschutz $I_{\Delta N} \leq 30$ mA
3 Potentialausgleichsschiene
4 fest angeschlossenes Gerät
5 Schutzkontaktsteckdose mit Zusatzschutz
6 selektiver Fehlerstrom-Schutzschalter für die Isolationsüberwachung und den Brandschutz, zum Beispiel $I_{\Delta N} \leq 300$ mA

dürfen, verschlechtert sich der Gesamterdungswiderstand des Netzes und damit auch der Überspannungsschutz.

Eine kritische Betrachtung des Schutzumfangs des Potentialausgleichs zeigt, dass der Potentialausgleich nur eine Art Zusatzschutz darstellt und nie eine Alternative zu Massnahmen des Fehlerschutzes sein kann.

Unter Berücksichtigung aller Erkenntnisse und der Erfahrungen der letzten Jahrzehnte könnte man folgenden Ausblick in die Zukunft der Technik der Niederspannungsinstallationen wagen, soweit sie den Schutz gegen gefährliche Berührungsströme betrifft. Für neu errichtete Verteilungsnetze und beim Umbau alter TT-Netze sollte die Neutralleiter-Schutzerdung angewendet werden, wobei in gewissen Fällen, zum Beispiel für Stromkreise mit Steckdosen, der Zusatzschutz mit 30-mA-FI-Schutzschaltern zu empfehlen wäre. Man kommt so zu einem Installationsschema nach Bild 11. Setzt man zusätzlich in der Wurzel der Verteilung wegen der Selektivität einen FI-Schutzschalter der Bauart *S* ein, dann erreicht man eine Art dauernder Isolationsüberwachung, so dass Fehler schon im Entstehungszustand erkannt werden und ein wertvoller Schutz gegen elektrisch gezündete Brände möglich wird.

## Literatur


[1] *G. Biegelmeier:* Schutz gegen gefährliche Körperströme, kritische Betrachtungen zum grundsätzlichen Aufbau der internationalen Norm IEC-Publ. 364-4.41. Bull. SEV/VSE 79(1988) 23, S. 1472 bis 1476.

[2] *K.H. Krefter:* Zusatzschutz – Dritte Schutzebene gegen gefährliche Körperströme. etz 108(1987)3, S. 84–86.

[3] *G. Biegelmeier* und *A. Mörx:* Die Klassifizierung der Netzsysteme nach IEC-Publ. 364 – ein fehlerhaftes Konzept. ÖZE 46(1993)H.7/8, S. 378–382.

[4] *G. Biegelmeier:* Fehlerspannungen, Berührungsspannungen und Potentialausgleich. etz 109(1988)10, S. 460–464.

[5] *G. Biegelmeier:* Basic considerations on protective measures against electric shock in low voltage installations; second conference on Installation Engng. 1985. IEE-Conf. Publ. No. 251, London.

[6] *G. Biegelmeier, H. Brugère, E. Gourbière, D. Kieback, J. Lambrozo, G. Rabitsch* und *R. Vidal:* Konventionelle Grenzwerte für Fehlerspannung und Berührungsspannung. Bull. SEV/VSE 84(1993) 19, S. 41–48.

[7] *P. Osypcka:* Messtechnische Untersuchungen über Stromstärke, Einwirkungsdauer und Stromweg bei elektrischen Wechselstromunfällen an Mensch und Tier, Bedeutung und Auswirkung für Starkstromanlagen. Elektromedizin 8(1963)3 und 4.

[8] *H. Bachl* und *G. Biegelmeier:* Über den Schutz von Nutztieren gegen gefährliche Körperströme. Bull. SEV/VSE 83(1992)3, S. 65–72.

[9] *G. Biegelmeier* und *A. Mörx:* Neuere Erkenntnisse der Elektrophysiologie und Gedanken zur Sicherheit der Elektrizitätsanwendung in Niederspannungsanlagen. e&i 112(1995) 5, S. 208–216.

[10] *E. Homberger:* Wahrscheinlichkeitsüberlegungen bei der Wahl von Sicherheitsvorkehrungen in elektrischen Verteilnetzen. Bull. SEV/VSE 65(1974) 12, S. 892–895.

[11] *E. Homberger:* Neue Überlegungen zur Vermeidung gefährlicher Berührungsspannungen. Bull. SEV/VSE 74(1983)7, S. 338–341.

[12] *E. Homberger:* Schutzmassnahmen gegen indirektes Berühren. Bull. SEV/VSE 76(1985)6, S. 314 bis 320.

[13] *D. Kieback:* Über die Zuverlässigkeit von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen. Vortrag gehalten auf der VDE-Fachtagung «Sicherheits- und Unfallforschung», Leipzig 1994, VDE-Verlag.

[14] *G. Biegelmeier:* Das Gleichstromproblem bei der Fehlerstrom-Schutzschaltung – ein vernachlässigbares Sicherheitsrisiko. Bull. SEV/VSE 82(1991)7, S. 33–42.

[15] *G. Biegelmeier, D. Kieback, K.-H. Krefter* und *H. Eder:* Über die Einschränkung der Verfügbarkeit der Stromversorgung von Niederspannungsanlagen durch den Einbau von Fehlerstromschutzeinrichtungen. Elektrizitätswirtschaft 90(1991)8, S. 400 bis 411.

[16] *G. Biegelmeier:* Über das Löschverhalten von Luftstrecken bei Stossspannungsbeanspruchungen. Bull. SEV/VSE 78(1987)23, S. 1446–1453.

[17] *W. Koch:* Erdungen in Wechselstromanlagen über 1 kV. Springer-Verlag 1961.

[18] *G. Biegelmeier:* Erdungen und Potentialausgleich in Niederspannungsanlagen. EVU-Betriebspraxis 32(1993)11, S. 341–345.


# Normes proches de la pratique pour installations de basse tension

## Propositions visant à simplifier les normes internationales pour la réalisation d'installations de basse tension


A partir de l'état actuel des normes internationales régissant l'aménagement d'installations de basse tension – publ. CEI 364 et Cenelec HD 384 – il est proposé d'élaborer pour le praticien une nouvelle version, limitée aux installations électriques pour courant alternatif 50/60 Hz et tensions assignées jusqu'à 1000 V. La protection contre les courants de contact dangereux avec la protection de base, la protection contre les défauts et la protection additionnelle doit se conformer à une technique qui s'est déjà imposée dans la pratique (figure 1). La formation de notions claires avec équations de définition pour la tension de défaut et la tension de contact prospective (figure 2) et la tension de contact (figure 3) permettent d'apprécier le facteur de protection de la mise au neutre (système TN, figure 6) et du schéma de protection de courants de défaut (système TT avec dispositif de protection contre les courants de défaut pour la coupure des défauts, figure 8). On montre qu'une liaison équipotentielle ne peut être vue que comme protection additionnelle et non comme une solution alternative à d'autres mesures de précaution de la protection contre les défauts (figures 9 et 10). On discute des limites des tensions de défaut et de celles des tensions de contact admissibles, où il est montré que les limites actuelles pour le courant continu de 120 V et de 60 V sont trop élevées. Finalement on tente une perspective sur une technique de protection durablement fiable contre les courants de contact dangereux. Il est proposé à cet effet d'utiliser la mise au neutre avec protection additionnelle par des dispositifs de protection à courant différentiel résiduel (figure 11).