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: 83 (1992)

Heft: 3

Artikel: Schutz vor den Gefahren der Elektrizität

Autor: Biegelmeier, Gottfried

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902790

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: 04.12.2025

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

Schutz vor den Gefahren der Elektrizität

Gottfried Biegelmeier

Ausgehend von den bekannten Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen und Nutztiere ist es möglich, zusammen mit den Erfahrungen, die aus elektrischen Unfällen gewonnen werden, die Ziele für den Gefahrenschutz mittels technischer Einrichtungen anzugeben und das verbleibende Restrisiko abzuschätzen. Es zeigt sich, dass für Niederspannungsanlagen die Nullung (TN-System) mit Zusatzschutz durch Fehlerstromschutzeinrichtungen weltweit eine optimale Lösung des Schutzproblems darstellen könnte.

Partant des effets les plus connus du courant électrique sur l'homme et les animaux de rapport et des expériences acquises avec les accidents d'électricité, il est possible de définir les objectifs de la protection contre ces dangers au moyen de dispositifs techniques et d'estimer le risque résiduel. Pour les installations à basse tension il se montre que la mise au neutre (système TN) avec protection additionnelle par des disjoncteurs de courant de fuite peut mondialement représenter une solution optimale du problème de la protection.

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

Die Technik des Schutzes gegen gefährliche Körperströme wird durch drei Komponenten bestimmt:
- dem Wissen über die Wirkungen elektrischer Ströme auf Menschen und Nutztiere,
- den Erfahrungen, die aus elektrischen Unfällen abgeleitet werden und
- einer Abschätzung der Zuverlässigkeit der eingesetzten Schutzapparate und Schutzmassnahmen unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Möglichkeiten.

Gerade in den letzten Jahren hat sich durch die Arbeiten der Gremien der IEC (WG 4 des TC 64) das Wissen über die Wirkungen elektrischer Ströme auf Menschen und Nutztiere so vertieft, dass es ausreicht, um die in der Praxis bei Unfällen möglichen Körperströme in ihrer Wirkung zu beurteilen. Auch die Körperimpedanzen sind für verschiedene Stromwege bekannt, und damit kann man das Restrisiko abschätzen, das bei der aufgrund der Unfallerfahrung konventionell festgelegten Berührungsspannungsgrenze von 50 V oder infolge der Ausschaltkennlinien der Schutzapparate in Niederspannungsanlagen noch zu erwarten ist. Auch die Zuverlässigkeit der verschiedenen Schutzapparate und Schutzmassnahmen wurde gerade in den letzten Jahren untersucht, unter Berücksichtigung der Forderung, dass durch den Gefahrenschutz die Verfügbarkeit der Stromversorgung möglichst wenig eingeschränkt werden soll. Die folgenden Abschnitte beschreiben in gestraffter Form das heutige Wissen und den Einfluss der oben genannten drei Schutzkomponenten, wobei versucht wird, als Schlussfolgerung auch einen Ausblick in die Zukunft der Schutztechnik gegen gefährliche Körperströme zu geben.

Die Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen und Nutztiere

Der IEC-Report 479, in zweiter Auflage mit den Teilen 1 und 2, ist durch neuere Forschungsergebnisse bereits überholt, und Kapitel 1 «Körperimpedanzen», Kapitel 2 «Wirkungen von Wechselstrom im Frequenzbereich von 15 bis 100 Hz» und Kapitel 3 «Wirkungen von Gleichstrom» wurden vollständig überarbeitet und werden in den nächsten Jahren in einer dritten Auflage erscheinen [1, 2, 3]. Dazu kommt ganz neu eine wichtige Ergänzung mit einem Teil 3 «Wirkungen des elektrischen Stromes auf Nutztiere» mit dem Kapitel 7 «Körperimpedanzen von Nutztieren»

U [V]	Z_5 [Ω]	Z_{50} [Ω]	Z_{95} [Ω]
25	1750	3250	6100
50	1450	2625	4375
75	1250	2200	3500
100	1200	1875	3200
220	1000	1350	2125
700	750	1100	1550
1000	700	1050	1500
AW	650	750	850

Bild 1 Körperimpedanzen von Menschen
Werte der Körperwiderstände nach IEC-Report 479, 2. Auflage, Kapitel 1, in Abhängigkeit von der Berührungsspannung, die von 5%, 50% und 95% der Population nicht überschritten werden, Stromweg Hand–Hand, grossflächige Berührung im trockenen Zustand.

U Berührungsspannung
Z_5 Körperimpedanz, die von 5% der Population nicht überschritten wird
Z_{50} Körperimpedanz, die von 50% der Population nicht überschritten wird
Z_{95} Körperimpedanz, die von 95% der Population nicht überschritten wird
AW asymptotischer Wert

und Kapitel 8 «Wirkungen von Wechselstrom im Frequenzbereich von 15 bis 100 Hz auf Nutztiere.»

Für den Schutz des Menschen gegen gefährliche Körperströme sind die Angaben über die Körperimpedanzen und die Flimmerschwellen wichtig. Für einen Stromweg Hand–Hand oder Hand–Fuss finden sich im IEC-Report 479 Angaben für die Körperimpedanzen entsprechend Bild 1 für grossflächige und trockene Berührungsflächen. Es ist aber wesentlich zu wissen, dass für höhere Berührungsspannungen, etwa über 100 V, die Berührungsfläche und der Hautzustand (trocken oder nass) nur noch geringen Einfluss auf die Höhe des Körperwiderstandes haben (siehe Bild 1).

Für meist ausreichende Schätzungen von Körperströmen kann man die Körperimpedanzen für verschiedene Stromwege nach Bild 2 leicht rechnen, weil die Impedanzen überwiegend in den Extremitäten liegen. So findet man etwa für den Stromweg beide Hände–Rumpf (der Mensch sitzt auf dem Boden und hält ein Elektrogerät mit beiden Händen) nur 25% der Körperimpedanz nach Bild 1.

Für schutztechnische Überlegungen verwendet man vorzugsweise die statistisch noch ausreichend gesicherten 5%-Werte, und so erhält man zum Beispiel bei einer Berührungsspannung von 220 V für den Stromweg Hand–Hand 1000 Ω und beide Hände–Rumpf 250 Ω Körperimpedanz, die bei höheren Spannungen als ohmscher Widerstand angenommen werden kann.

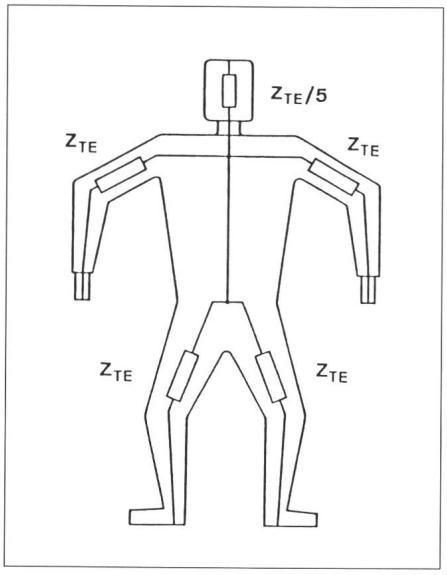

Bild 2 Körperimpedanzen eines Menschen
Vereinfachtes Prinzipschaltbild der Körperimpedanzen eines Menschen für verschiedene Stromwege
Z_{TE} Teilimpedanz einer Extremität

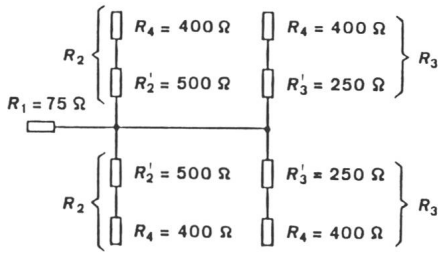

Bild 3 Ersatzschaltbild der Körperimpedanzen eines Rindes
Ersatzschaltbild nach [4] der Körperimpedanzen Z_T eines Rindes (abgerundete 5%-Werte) für die Berechnung der konventionellen Berührungsspannungsgrenze, wobei diese in erster Annäherung den Körperwiderständen R_T gleichgesetzt werden.
R_1 Maul–Rumpf
R_2' Rumpf–Vorderbeine ohne Huf
R_3' Rumpf–Hinterbeine ohne Huf
R_4 Huf
$R_2 = R_2' + R_4$ Rumpf–Vorderbeine mit Huf
$R_3 = R_3' + R_4$ Rumpf–Hinterbeine mit Huf

Neuere Arbeiten über den Schutz von Nutztieren gegen gefährliche Körperströme [4] geben auch Aufschluss über die Körperimpedanzen von Nutztieren. Nimmt man das Rind als repräsentativ für das Nutztier, so ergibt sich Bild 3 als Widerstandsschema für die 5%-Werte der Körperteilimpedanzen. Mit diesen Werten ergibt sich der Körperwiderstand für den Stromweg vom Maul über die vier parallel geschalteten Beine mit Hufen zu rund 250 Ω, und von den Vorderbeinen zu den Hinterbeinen mit rund 800 Ω [4]. Das Widerstandsschema nach Bild 3 für Rinder kann auch mit Sicherheitsreserven für andere Nutztiere angewendet werden, weil Messungen von Pferdehufen mit Hufeisen und Hufe von Schafen höhere Werte ergeben haben als für Rinder.

Hinsichtlich der Stromstärkebereiche wird nur der Wechselstrom 50/60 Hz betrachtet. Bild 4 zeigt für den Menschen die neuen Bereiche nach [2] mit der zugehörigen Wirkungsbeschreibung. In bezug auf das Herzkammerflimmern beziehen sich die Kurven c_1 (*S*) bis c_3 auf Längsdurchströmung linke Hand–linker Fuss. Bei Durchströmungen während weniger als 200 ms tritt Kammerflimmern nur in der vulnerablen Periode auf, wenn Schwellenwerte überschritten werden, die im Amperebereich liegen. Die Kurve c_1, die mit «*S*» deutlich hervorgehoben ist, basiert auf etwa den halben Werten der 5%-Schwelle und ist eine rein konventionelle Kurve. Die Kurve c_2, das heisst die 5%-Schwelle, wurde aus Flimmerversuchen mit Hunden abgeleitet und besitzt für den Menschen noch grosse Sicherheitsreserven. Die Kennzeichnung als 5%-Wert hat also nur statistische Bedeutung, und die Kurve c_2 kann deshalb ohne weiteres als Gefahrengrenze für schutztechnische Überlegungen herangezogen werden.

Für Nutztiere liegen die Flimmerschwellen höher. Bild 5 zeigt die Flimmerschwellen (Mittelwerte) für eine Durchströmungsdauer von 3 bis 5 Sekunden. Für Durchströmungsdauern unter einer Herzperiode liegen die Flimmerschwellen wie beim Menschen im Amperebereich.

Berührungsspannungen und Fehlerspannungen, Grenzwerte und Restrisiko

Obschon in der Arbeitsgruppe 9 des TC 64 der IEC seit zwanzig Jahren über die Begriffe Fehlerspannung und Berührungsspannung diskutiert wird,

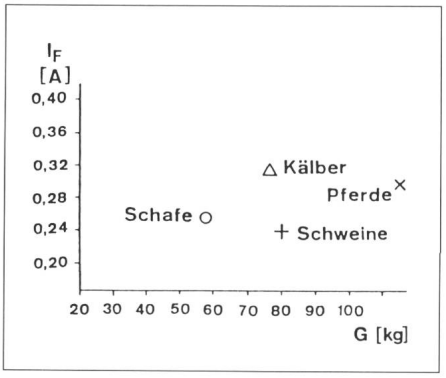

Bild 5 Flimmerschwelle und Körpergewicht
Abhängigkeit der Flimmerschwelle vom Körpergewicht für verschiedene Arten von Nutztieren. Mittelwerte für eine Durchströmungsdauer von 3 bis 5 Sekunden bei Längsdurchströmung, nach [4].
I_F minimale Flimmerstromstärke (Effektivwerte)
G Gewicht der Versuchstiere

ist es noch zu keiner Einigung gekommen. Damit fehlen die Grundlagen für die Ausarbeitung technisch richtiger IEC-Normen für den Schutz gegen gefährliche Körperströme.

In der Literatur sind die Begriffe indessen längst klar beschrieben worden [5]. Tritt in einer Anlage ein Körperschluss (Isolationsfehler bei einem leitfähigen Gehäuse) auf, dann nehmen die fehlerhaften Teile Spannung gegen die Bezugserde an (Bild 6). Die

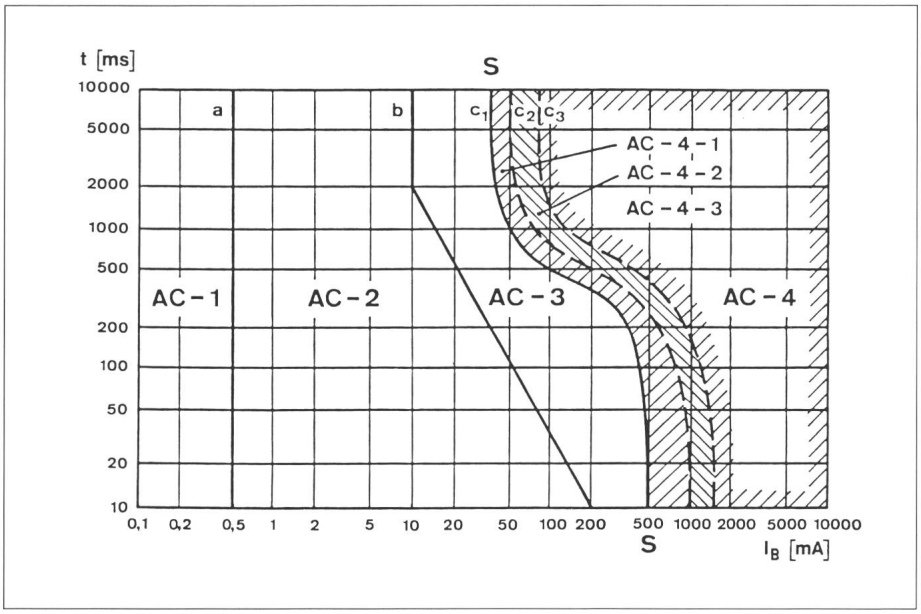

Bild 4 Stromstärkebereiche für Wechselstrom nach IEC
Stromstärkebereiche *AC-1* bis *AC-4* für Wechselstrom 15–100 Hz nach IEC-Report 479, Entwurf Kapitel 2, nach [2].

t Durchströmungsdauer
I_B Körperstrom
S konventionelle Flimmerschwelle
AC-1 Bereich, in dem in der Regel keine Reaktionen stattfinden
AC-2 Bereich, in dem in der Regel keine pathophysiologisch gefährliche Wirkung festgestellt werden
AC-3 Übergangsbereich ohne feste Grenzen; in der Regel keine organischen Schäden, keine Gefahr von Herzkammerflimmern, Muskelreaktionen, Beschwerden bei der Atmung mit steigender Stromstärke und Durchströmungsdauer
AC-4 Bereich mit Herzkammerflimmern mit steigender Wahrscheinlichkeit (Kurve c_2 Wahrscheinlichkeit kleiner als 5%, Kurve c_3 Wahrscheinlichkeit kleiner als 50%). Mit steigender Stromstärke und Durchströmungsdauer starke pathophysiologische Wirkungen wie Herzstillstand, Atemstillstand und Verbrennungen

Bezugserde (auch neutrales Erdreich genannt) ist der Bereich der Erde ausserhalb des Einflussbereiches des Erders, in dem zwischen zwei beliebigen Punkten durch den Erderstrom keine merklichen Spannungsunterschiede verursacht werden. Die Spannung des fehlerhaften Gerätegehäuses gegen die Bezugserde wird als Fehlerspannung bezeichnet und wird durch den Spannungsabfall $I_f \cdot R_A$, den der Fehlerstrom am Anlagenerder erzeugt, bestimmt.

Der Verlauf der Teilfehlerspannungen U_F' in der Umgebung des Erders hängt von seiner Form und seiner Verlegungsart ab, so dass sich der Spannungstrichter in vielfältigster Art ausbilden kann. In der Umgebung der Verbraucheranlage kann man mit Messsonden die Teilfehlerspannungen messen, die in entsprechender Entfernung vom Erder in die Fehlerspannung U_F übergehen. Teilfehlerspannungen, die von einem Menschen ohne Hilfsmittel überbrückt werden können, werden als prospektive Berührungsspannungen U_{PT} bezeichnet. Fehlerspannungen U_F und prospektive Berührungsspannungen U_{PT} werden konventionell mit einem Spannungsmesser mit einem Innenwiderstand von etwa 40 kΩ gemessen. Berührt der Mensch das fehlerhafte Gerät, dann treibt die prospektive Berührungsspannung, die als Teilfehlerspannung an seinem Standort wirksam ist, den Strom durch seinen Körper und seinen Standort. Der Spannungsabfall, der dadurch im Körper entsteht, heisst Berührungsspannung U_T. Diese ist also immer kleiner als die Fehlerspannung U_F.

Die für den Schutz gegen gefährliche Körperströme zulässigen Grenzwerte für die Berührungsspannung von 65 V oder 50 V bei Fehlern in der Anlage und üblichen Umgebungsbedingungen innerhalb und ausserhalb von Gebäuden wurden aus der Unfallerfahrung abgeleitet. Eine internationale Umfrage bestätigt diesen Wert (siehe IEC-Report 479, erste Auflage, Abschnitt 7). Mit den 5%-Werten der Flimmerschwelle (50 mA) ergeben 50 V eine Körperimpedanz von 1000 Ω; das entspricht dem 5%-Wert für den Stromweg Hand–Hand oder Hand–Fuss. Die Erfahrung hat gezeigt, dass das Restrisiko für kritischere Stromwege, etwa beide Hände–Rumpf (250 Ω) akzeptabel ist, weil in der Unfallpraxis fast immer Risikominderungsfaktoren auftreten, wie Standortwiderstand, Schuhwerk usw.

Dabei ist auch zu bedenken, dass innerhalb von Verbraucheranlagen und in ihrer näheren Umgebung durch den Potentialausgleich fast immer sichergestellt ist, dass die Berührungsspannung kleiner ist als die halbe Fehlerspannung. Dazu kommt bei der Nullung die Erfahrung, dass bei Schlüssen zwischen den Polleitern und dem PEN-Leiter im Verteilungsnetz infolge der PEN-Leiter-Erdungen die Fehlerspannungen des PEN-Leiters immer unter 100 V bleiben. Isolationsfehler zwischen den Polleitern und dem PEN-Leiter und PEN-Leiter-Unterbrechungen sind ausserdem sehr selten [6].

Alle diese Umstände rechtfertigen auch die Bestimmung in der Schweiz, dass bei der Nullung und Isolationsfehlern zwischen den Polleitern (Aussenleitern) und dem PEN-Leiter im Verteilungsnetz eine Fehlerspannung bis zu 100 V auftreten darf, wobei die Speisung fehlerhafter Polleiter sicher unterbrochen werden muss (Art. 15 STV-Verordnung 1985).

Für den Schutz in Hochspannungsanlagen ist die Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens unfallfördernder Umstände noch geringer als in Niederspannungsanlagen. Man kann deshalb den in Bild 7 gezeigten Zusammenhang zwischen Fehlerspannung und Ausschaltzeit, der einem neuen internationalen Normenvorschlag entnommen ist, als unbedenklich ansehen. Er stellt also für Isolationsfehler in Hochspannungsanlagen ein vertretbares Restrisiko dar.

Um auch für den Schutz von Nutztieren eine zulässige Berührungsspannungsgrenze abzuleiten, kann man für den Stromweg Maul zu den vier Hufen (5%-Wert 250 Ω) mit einem 5%-Schwellenstrom von 0,2 A rechnen. Man erhält so erstaunlicherweise wieder 50 V, also den gleichen Wert wie für Menschen. Dabei wurden mit dem genannten Stromweg härtere Bedingungen für die Nutztiere ge-

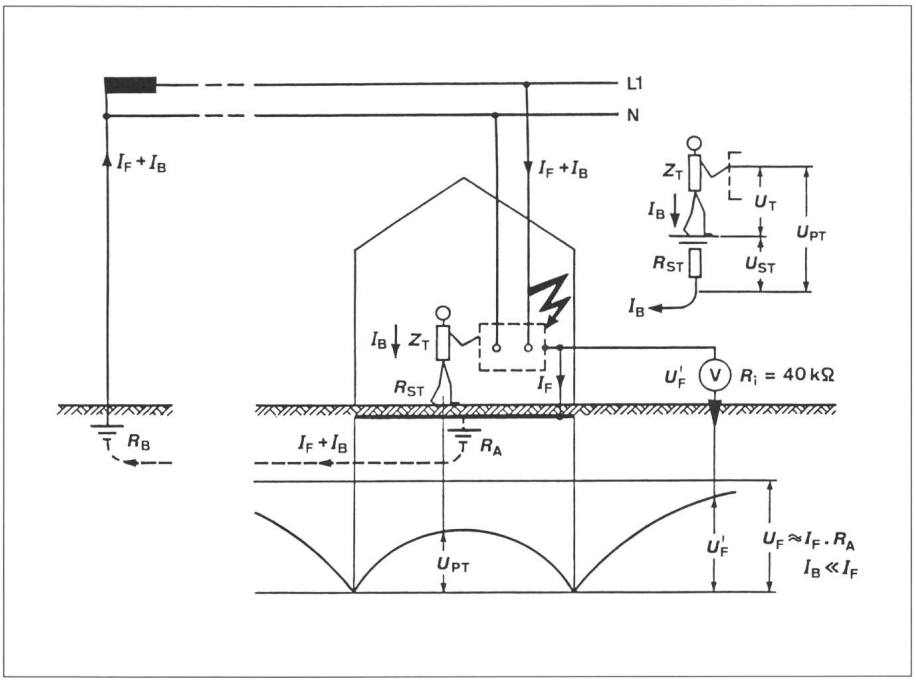

Bild 6 Fehlerspannung und Berührungsspannung
Fehlerspannung, prospektive Berührungsspannung und Berührungsspannung bei einem Körperschluss in einer Anlage mit Fundamenterder.

U_F Fehlerspannung
U_F' Teilfehlerspannung
U_{PT} prospektive Berührungsspannung
U_T Berührungsspannung
U_{ST} Standortspannung
I_F Fehlerstrom
I_B Körperstrom
R_A Erdungswiderstand der Verbraucheranlage
R_{ST} Standortwiderstand
R_B Gesamterdungswiderstand aller Betriebserdungen (Erdung des Nullpunktes)

wählt als für Menschen (Stromweg Hand–Hand oder Hand–Fuss).

Die bisher in manchen Ländern ohne Begründung gewählte 25-V-Berührungsspannungsgrenze für den Tierschutz ist daher ebensowenig berechtigt, wie die neuerdings international forcierte 25-V-Grenze für den Menschen in Räumen besonderer Art, zum Beispiel auf Baustellen. Nähere Ausführungen dazu finden sich in [4].

Die prinzipielle Überlegung bei der Festlegung von Fehlerspannungs- oder Berührungsspannungsgrenzen in Abhängigkeit von der Ausschaltdauer des Fehlers besteht also in der Abschätzung des Restrisikos, das unter ungünstigen Umständen auftreten kann (Stromweg, Standort usw.). Die Möglichkeit dazu bietet die Unfallerfahrung.

Die Schutzmassnahmen gegen gefährliche Körperströme

Der Inhalt von IEC-Publ. 364-4-41 und davon abgeleitet die Cenelec-Publ. 384-4-41 «Schutz gegen gefährliche Körperströme» wird derzeit überarbeitet [7]. Bedenklich ist der seit etwa dreissig Jahren erkennbare Trend zur Benachteiligung der Nullung (TN-System) zugunsten des TT-Systems mit Fehlerstromschutzeinrichtungen zur automatischen Abschaltung. So hat man etwa beim TN-System verschiedene Abschaltbedingungen für fest angeschlossene Betriebsmittel und für Stromkreise mit Steckdosen festgeschrieben. Die Aufgaben von Überstromschutzeinrichtungen und FI-Schutzschaltern in einer genullten Anlage werden vermischt, und die Abschaltbedingungen im Verteilungsnetz sind nicht festgelegt. Gravierender ist noch die Forderung nach 25 V zulässiger Berührungsspannungsgrenze für gewisse Raumarten. Deshalb wurde in Deutschland in der Landwirtschaft die Nullung verboten, wodurch für den Installateur grosse Schwierigkeiten entstanden sind. Auf diese Frage wird in [4] besonders eingegangen.

Zur weiteren Verwirrung trägt das Dokument IEC 02 (ACOS) 4 bei, in dem verschiedene Berührungsspannungsgrenzen mit «Umgebungssituationen» (dry, wet, immersed, special) in Zusammenhang gebracht werden. Das gleiche gilt für die neue Bearbeitung des Dokumentes IEC 536 «Classification of electrical and electronic equipment with regard to protection against electric shock» durch das Dokument 64 (Central Office) 196, in dem ein neuer Begriff «supplementary protection» für den Schutz bei indirektem Berühren eingeführt wird, der zwangsläufig mit dem Begriff Zusatzschutz (additional protection) zu Verwechslungen führen muss.

Man hat bei alldem übersehen, dass im TT-System grosse Probleme in bezug auf die Zuverlässigkeit der Fehlerstromschutzeinrichtungen bestehen [8], dass die Verfügbarkeit der Stromversorgung durch deren Fehlauslösungen oft in Frage gestellt ist [9, 10], und dass im TN-System der Überspannungsschutz leichter und billiger zu realisieren ist als im TT-System. Da-

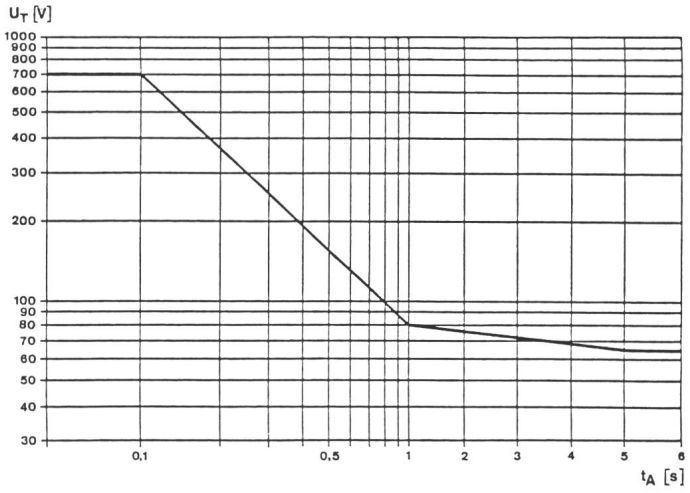

Bild 7 Normenvorschlag für zulässige Fehlerspannungen
Zulässige Fehlerspannungen in Abhängigkeit von der Ausschaltzeit für elektrische Anlagen mit Nennspannungen über 1000 V.
U_T zulässige Fehlerspannung
t_A Ausschaltzeit

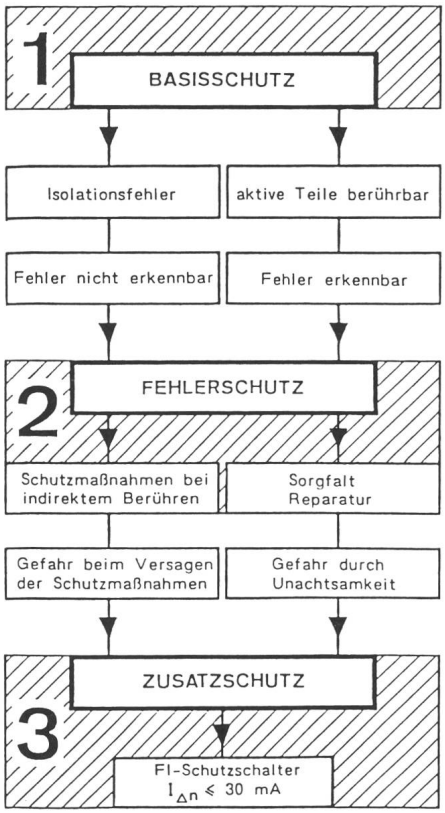

Bild 8 Die Schutzkaskade
Kaskadenförmiges Schutzsystem gegen gefährliche Körperströme (Prinzip der dreifachen Sicherheit)

bei wurde bereits vor Jahren ein technisch vorteilhaftes Konzept für einen optimalen Schutz gegen gefährliche Körperströme entwickelt [11], das sich in der Praxis auch immer mehr durchsetzt. Es handelt sich um ein kaskadenförmiges Schutzsystem gegen gefährliche Körperströme, das man auch als Prinzip der dreifachen Sicherheit bezeichnet. Es ist interessant, dass man dieses Prinzip in der Schweiz eigentlich schon immer angewendet hat, wobei die Nullung als Fehlerschutz dient und der FI-Schutzschalter die Funktion eines Zusatzschutzes zu erfüllen hat. In Bild 8 ist dieses Schutzsystem übersichtlich dargestellt.

Ausblick in die Zukunft

Wenn man erkannt hat, dass die derzeitigen internationalen Errichtungsnormen IEC-Publ. 364 und Cenelec 384 eigentlich in die falsche Richtung weisen und infolge ihrer Kompliziertheit für den Installateur kaum brauchbar sind, dann ist es nur ein Schritt bis zur Forderung nach einem Neubeginn. Diese neuen Bestimmungen sollten einfach, praxisnah und widerspruchsfrei sein. Sie sollten auch die neuesten Erkenntnisse beim Schutz gegen gefährliche Körperströme berücksichtigen und daher in drei Teile gegliedert werden: Basisschutz (Schutz gegen direktes Berühren), Fehlerschutz (Schutz bei indirektem Berühren) und Zusatzschutz, so wie es schon öfters auch international vorgeschlagen wurde [12].

Für neu errichtete Verteilungsnetze und beim Umbau alter TT-Netze sollte die Nullung (TN-System) 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 9. Setzt man zusätzlich in der Wurzel der Verteilung wegen der Selektivität einen FI-Schutzschalter der Bauart «S» (40 ms minimale Auslösezeit) 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.

Wird in alten Verteilungsnetzen das TT-System beibehalten, dann tritt das Problem der Zuverlässigkeit der FI-Schutzschalter in den Vordergrund [8]. Aussagen darüber sind heute mit grosser Sicherheit möglich, da ein diesbezüglicher Grossversuch, bei dem 40000 Anlagen hinsichtlich Funktionstüchtigkeit und Fehlauslöseverhalten von FI-Schutzschaltern in Deutschland von der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik abgeschlossen ist und eine ähnliche Untersuchung, die in Österreich von vier grossen EVUs in rund viertausend Anlagen derzeit durchgeführt wird, bereits Ergebnisse erkennen lässt. Dabei wurde auch die Funktion von Leitungsschutzschaltern beim Auftreten von Kurzschlüssen erprobt.

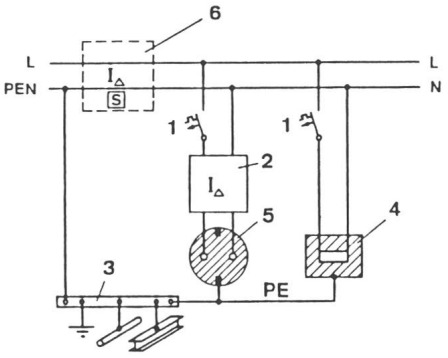

Bild 9 Prinzip der dreifachen Sicherheit bei der Nullung

1 Überstromschutzeinrichtungen für den Fehlerschutz, das heisst zur Gewährleistung der Nullungsbedingungen
2 Fehlerstrom-Schutzschalter für den Zusatzschutz $I_{\Delta n} \leq 30$ mA
3 Potentialausgleichsschiene
4 genulltes fest angeschlossenes Betriebsmittel
5 Steckdose mit Nullung und Zusatzschutz
6 selektiver Fehlerstrom-Schutzschalter für den Brandschutz, zum Beispiel $I_{\Delta n} \leq 300$ mA

Vor den Ausführungen über die Erkenntnisse dieser Anlagenüberprüfungen sei noch kurz ein *Zuverlässigkeitsbegriff* erläutert [8]. Es wird angenommen, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit (reliability) dem Naturgesetz

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

folgt. Dabei werden Frühausfälle vernachlässigt. Für die Ausfallwahrscheinlichkeit (Ausfallquote) F gilt

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \approx \lambda t \text{ für } \lambda t \ll 1$$

λ heisst Ausfallrate und wird in fit (*f*ailure *i*n *t*ime) angegeben. Ein fit bedeutet einen Ausfall in 10^9 Bauelementestunden, das heisst 1 fit = 10^{-9}/h (bei einem Fehlerstromschutzschalter bedeuten die Bauelementestunden einfach die Installationsdauer in Stunden, z.B. 10 Jahre = 87600 h). Wird also eine grössere Zahl von Fehlerstromschutzschaltern geprüft, die 10 Jahre eingebaut waren, und stellt man 3% Ausfälle fest ($F(t) = 0{,}03$), so ergibt sich

$$\lambda = F(t)/t = 0{,}03/(87600\text{ h}) = 340 \cdot 10^{-9}/\text{h} = 340 \text{ fit}$$

Als wesentliche Erkenntnisse der oben genannten Anlagenüberprüfungen sind zu nennen:

– Die Zuverlässigkeit der Abschaltung unter eingehaltenen Nullungsbedingungen ist bei *Schmelzsicherungen* immer gegeben (Ausfallrate $\lambda = 0$ fit).
– Ebenso ist die Zuverlässigkeit der Abschaltung bei *Leitungsschutzschaltern* sehr hoch. Die genannten Untersuchungen in Österreich haben gezeigt, dass die geprüften 4814 Leitungsschutzschalter ausnahmslos ausgeschaltet haben, wobei mit Kurzschlussströmen von einigen hundert Ampere geprüft wurde und die Einbaudauer bis zu zwanzig Jahre betragen hat. Man kann daher die Ausfallrate λ von Leitungsschutzschaltern konservativ unter 5 fit annehmen, und vom Standpunkt der Praxis aus sind

diese Geräte hinsichtlich der Zuverlässigkeit den Schmelzsicherungen als gleichwertig zu betrachten.

– Ganz anders verhält es sich mit *Fehlerstromschutzschaltern*. Die Überprüfungen der vergangenen Jahre, vor allem aber die Ergebnisse der Berufsgenossenschaft und der österreichischen Elektrizitätsversorgungsunternehmen haben gezeigt, dass Ausfallquoten $F(t)$ in der Grössenordnung von Prozenten erwartet werden müssen [8]. Dabei können die Mittelwerte der Ausfallquoten leicht ein falsches Bild liefern, weil natürlich Schalter, die zehn Jahre eingebaut sind, höhere Ausfallquoten ergeben als Schalter, die erst wenige Jahre eingebaut sind. Die vorläufigen Ergebnisse des österreichischen Grossversuchs sind in Bild 10 dargestellt. Es zeigt die Ausfallquoten von 3231 Fehlerstromschutzschaltern zusammen mit den berechneten Ausfallraten in fit, zusammengefasst in Fünfjahresperioden von 1970 bis 1990. Gegenüber diesem Zuverlässigkeitsproblem stellen alle anderen Probleme der Fehlerstromschutzschalter, zum Beispiel die Fehlerströme mit Gleichstromkomponenten, ein vernachlässigbares Restrisiko dar [13].

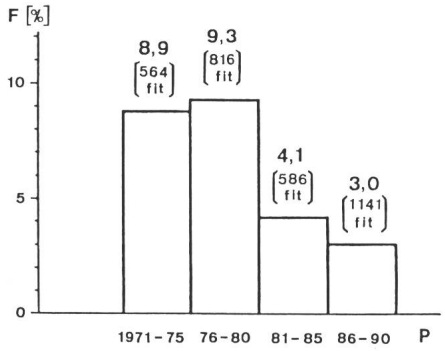

Bild 10 Ausfallquoten bei Fehlerstromschutzschaltern
Ergebnisse der Überprüfung von 3231 Fehlerstromschutzschaltern mit 207 Ausfällen durch Elektrizitätsversorgungsunternehmen in Oberösterreich, Steiermark, Wien und dem Burgenland. Mittelwerte der Fünfjahresperioden für die Ausfallquoten F [%] und Ausfallraten λ in fit (dabei wurde eine Lagerzeit vor dem Einbau von einem halben Jahr angenommen).
F Ausfallquote
P Einbauperiode

Man kann voraussetzen, dass in der Schweiz die Ergebnisse ähnlicher Anlagenüberprüfungen günstiger ausfallen würden, weil FI-Schutzschalter SEV-prüfpflichtig sind.

Die oben genannten, schwerwiegenden Probleme bei der Technik des FI-Schutzschalters, die auch den Herstellern eine grosse Verantwortung durch die Produkthaftung aufbürden, sind ein weiteres Argument für die Anwendung der Schutzmassnahme Nullung mit Zusatzschutz. Neue technische Entwicklungen lassen hoffen, dass in wenigen Jahren FI-Schutzschalter zur Verfügung stehen werden, die praktisch ohne Fehlauslösungen arbeiten und eine Zuverlässigkeit besitzen, die der von Leitungsschutzschaltern nahekommt. Für die jetzt auf dem Markt befindlichen FI-Schutzschalter erzwingen die genannten Überprüfungsergebnisse hingegen die Empfehlung, im TT-System immer mindestens zwei FI-Schutzschalter in Serie zu schalten, da im TT-System der Schutz der Anlage gegen gefährliche Körperströme ausschliesslich vom Schalter abhängt.

Zum Schluss sei dem Autor eine Bemerkung gestattet. Die Erkenntnis, dass die Nullung mit Zusatzschutz durch 30-mA-FI-Schutzschalter das Optimum für den Schutz gegen gefährliche Körperströme zu sein scheint, ist nicht dadurch beeinflusst worden, dass dieser Aufsatz im Bulletin des SEV erscheint und gerade in der Schweiz dieses Schutzsystem immer angewendet worden ist. Ebensowenig ist die Forderung für die FI-Schutzschalter, dass sie nicht fehlauslösen dürfen und somit die Bauformen «S» (40 ms minimale Auslösezeit) und «G» (10 ms minimale Auslösezeit) zu bevorzugen sind, dadurch entstanden, dass ein Schweizer Hersteller bereits derartige Schalter entwickelt hat und vertreibt [14]. Alle Aussagen in diesem Aufsatz haben nur ein Ziel, nämlich die Sicherheit der Elektrizitätsanwendung zu erhöhen und neue Wege für die internationalen Errichtungsvorschriften aufzuzeigen.

Literatur

[1] International Electrotechnical Commission: IEC-Report 479 «Effects of current passing through the human body and through the body of domestic animals.» – Part 1: General aspects, second edition, 1984 (under revision). Chapter 1: Electrical impedance of the human body. Chapter 2: Effects of alternating current in the range of 15–100 Hz. Chapter 3: Effects of direct current. – Part 2: Special aspects, second edition, 1987. Chapter 4: Effects of alternating currents with frequences above 100 Hz. Chapter 5: Effects of special wave forms of current. Chapter 6: Unidirectional single impuls currents of short duration. – Part 3: General aspects for domestic animals (under consideration). Chapter 7: Electrical impedances of domestic animals. Chapter 8: Effects of alternating current 50/60 Hz.

[2] Effects of sinusoidal alternating current in the range of 15 Hz to 100 Hz. IEC 64 (Central Office) 211: Revision of Publ. 479, Part 1 Chapter 2.

[3] IEC 64 (Secretariat) 562, Revision of Publ. 479, Part 1 Chapter 1: Electrical impedance of the human body; Chapter 2: Effects of direct current.

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

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

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

[7] *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.1472–1476.

[8] *G. Biegelmeier* und *D. Kieback*: Das Problem der Zuverlässigkeit der Fehlerstromschutzschaltung. Bull IVSS, (1990)11.

[9] *G. Biegelmeier, D. Kieback, K.H. Krefter* und *H. Eder*: Über die Einschränkung der Verfügbarkeit der Stromversorgung von Niederspannungsanlagen durch den Einbau von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen. Elektrizitätswirtschaft 90(1991)8, S. 400–410.

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

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

[12] IEC 64 (Austria) 38 bis 46: Österreichische IEC-Dokumente mit Vorschlägen für eine Neufassung von IEC-Publ. 364.

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

[14] *G. Biegelmeier* und *K.P. Rotter:* Neue Wege für die Fehlerstromschutzschaltung. Der Elektriker/Der Energieelektroniker, VDEW, (1991)3, S.81–83.