Das Gleichstromproblem bei der Fehlerstromschutzschaltung : win vernachlässigbares Sicherheitsrisiko

Autor(en): **Biegelmeier, Gottfried**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **82 (1991)**

Heft 7

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-902951

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

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

http://www.e-periodica.ch

Das Gleichstromproblem bei der Fehlerstromschutzschaltung – ein vernachlässigbares Sicherheitsrisiko

Gottfried Biegelmeier

Fehlerstromschutzschalter waren für die Erfassung von Wechsel-Fehlerströmen konzipiert. Seit zwei Jahrzehnten wird diskutiert, ob die Schalter auch funktionieren sollen, wenn Fehlerströme mit Gleichstromkomponenten fliessen, wie sie bei Isolationsfehlern von elektrischen Betriebsmitteln der Schutzklasse I, die Gleichrichterschaltungen enthalten, entstehen können. Der Aufsatz zeigt, dass eine solche Funktion nicht gefordert werden muss, weil nur ein vernachlässigbares Sicherheitsrisiko besteht.

Les disjoncteurs de protection à courant de défaut ont été conçus pour saisir les courants de défaut alternatifs. Depuis deux décennies on discute la question de savoir si ces interrupteurs doivent aussi fonctionner en cas d'écoulement de courants de défaut avec composantes du courant continu, comme ils peuvent se produire lors de défauts d'isolation dans les matériels électriques de la classe de protection I équipés de montages en redresseur. L'article montre qu'une telle fonction ne doit pas être exigée, puisque de toute façon le risque pour la sécurité est négligeable.

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

Technische Gegebenheiten und Lösungsversuche

Fehlerstromschutzschalter erfassen Fehlerströme mit einem Summenstromwandler und sind daher eigentlich nur für Wechselstromanlagen vorgesehen. Mit der modernen Halbleitertechnik werden aber Schaltungen in Verbrauchsgeräten angewendet, die Gleichrichter, Thyristoren, Triacs usw. enthalten, die zur Regelung der Leistungsaufnahme oder bei Motoren zur stufenlosen Regelung der Drehzahl dienen. Bei einem Körperschluss können dann Fehlerströme zum Fliessen kommen, die Gleichstromkomponenten enthalten, und dadurch wird das Auslöseverhalten der Fehlerstromschutzschalter nachteilig beeinflusst. Das Problem ist seit langem bekannt und wurde schon oft beschrieben [1...6].

Schon hier sei besonders darauf hingewiesen, dass dieses Verhalten, das bis zum Nichtauslösen gehen kann, naturgemäss nur bei Fehlerströmen, also bei Isolationsfehlern, die Ströme zur Erde mit Gleichstromkomponenten verursachen, auftritt. Betriebsströme mit Gleichstromkomponenten, auch reine Gleichströme, die als Laststrome elektrischer Betriebsmittel zwischen den aktiven Leitern fliessen, beeinflussen das Auslöseverhalten von Fehlerstromschutzschaltern nicht. Ihre Summe ist ja nach dem ersten Kirchhoffschen Gesetz zu jedem Zeitpunkt Null, und damit wird der Summenstromwandler nicht erregt. Dieses Gesetz ist unabhängig von der Frequenz und der Kurvenform.

Grundsätzlich können zwei Arten elektronischer Steuerungen unterschieden werden, die Wellenpaketsteuerung und die Phasenanschnittsteuerung. Die *Wellenpaketsteuerung* beeinflusst die Auslösefunktion von FI-Schutzschaltern praktisch nicht. Sie verzerrt weder die Kurvenform, noch erzeugt sie Oberwellen oder eine Gleichstromkomponente [7]. Sie wird hauptsächlich bei Elektrowärmegeräten angewendet. Die *Phasenanschnittsteuerung* wird vor allem zur Drehzahlregelung bei Motoren und zur Steuerung der Leistungsaufnahme bei

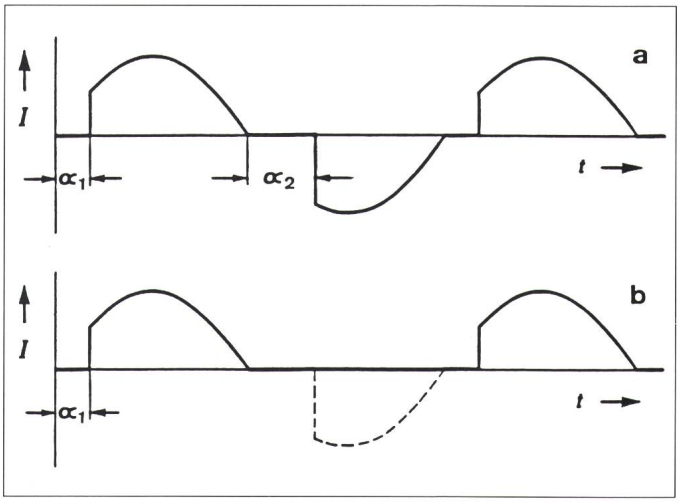

Bild 1
Phasenanschnittsteuerungen zur Leistungs- und Drehzahlregelung von Verbrauchsgeräten
a symmetrische Phasenanschnittsteuerung
b unsymmetrische Phasenanschnittsteuerung

Beleuchtungsanlagen angewendet [8]. Man unterscheidet dabei symmetrische und unsymmetrische Phasenanschnittsteuerungen (Bild 1), wobei nur die unsymmetrischen Steuerungen Gleichstromkomponenten erzeugen.

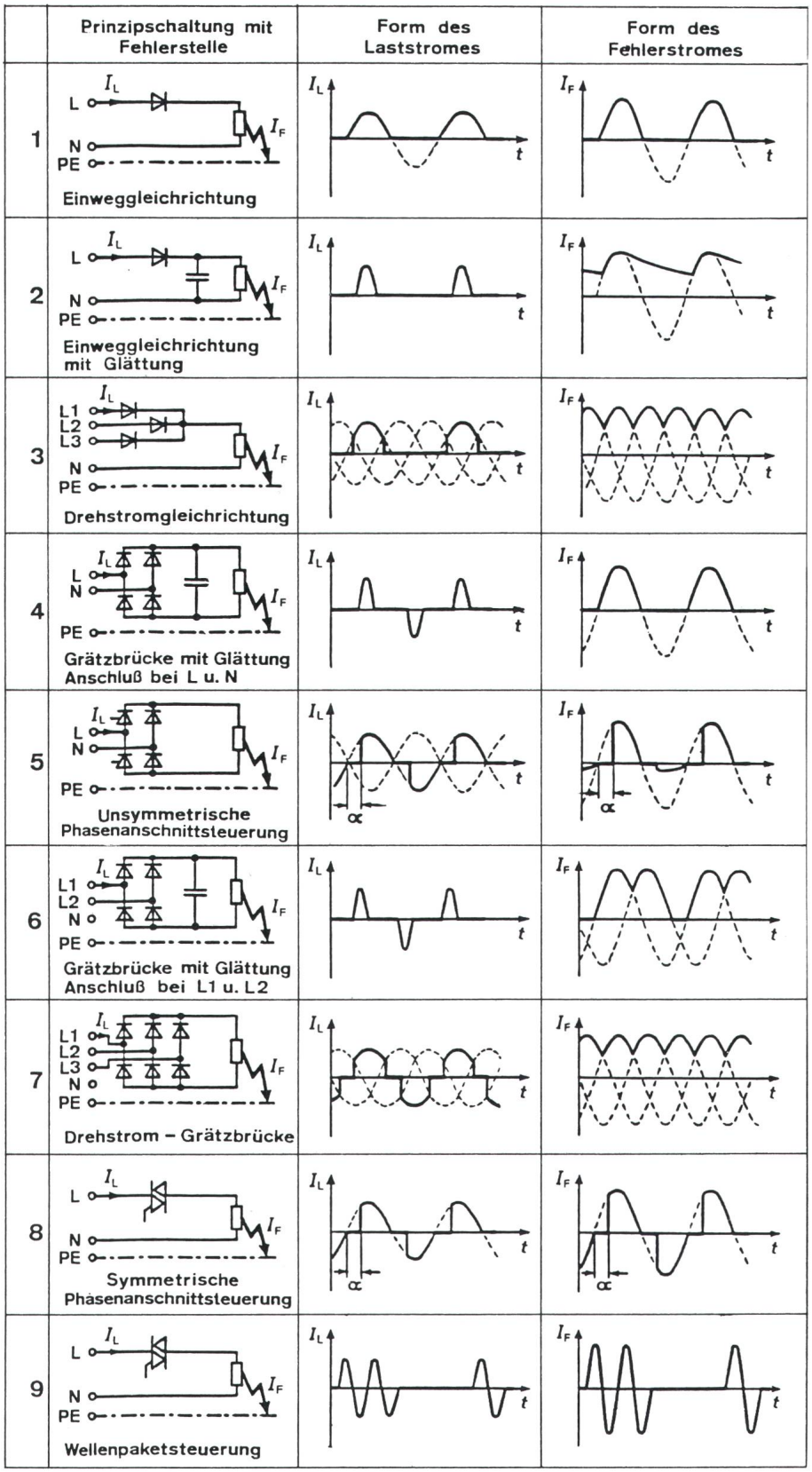

Bild 2 Schaltungen mit Gleichrichtern und Phasenanschnittsteuerungen
Das Bild zeigt die verschiedenen Schaltungen, die in Verbrauchsgeräten vorkommen können, zusammen mit zugeordneten Betriebsströmen I_L (Lastströme am Eingang) und Fehlerströmen I_F

Theoretisch könnte auch eine Ungleichheit der Steuerwinkel der positiven und negativen Halbwellen, α_1 und α_2, oder das gänzliche Ausfallen einer Stromrichtung durch einen Fehler im Regelgerät bei symmetrischen Steuerungen zu einer Gleichstromkomponente führen. Diese Fälle haben aber keine praktische Bedeutung.

Selbstverständlich können auch Gleichrichterschaltungen in Verbrauchsgeräten beim Körperschluss zu Fehlerströmen mit Gleichstromkomponenten führen. Bild 2 zeigt die verschiedenen Schaltungen, die in der Praxis auftreten können. Neben den Schaltungen sind die Formen der Betriebsströme bei fehlerfreiem Betrieb I_L und die Fehlerströme I_F gezeigt, die beim Körperschluss über den Schutzleiter zur Erde fliessen. Die Polarität dieser Fehlerströme ist zufällig, so dass beide Richtungen mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten können. Besonders bemerkenswert sind die Fälle, in denen Gleichstrom ohne Nullannäherung entstehen kann. Dies ist für die Einweggleichrichtung mit Glättungskondensator und die Drehstromgleichrichtung der Fall (Schaltungen *2*, *3* und *7* in Bild 2). Einen Sonderfall stellt die Gleichrichter-Brückenschaltung dar, wenn sie an zwei Aussenleiter angeschlossen wird (Schaltung *6*). In diesem Fall wird die stromlose Pause durch die beiden Doppelhalbwellen eingeengt und zwar bis auf weniger als 150 elektrische Grade.

Der Einfachheit halber werden in der Folge alle Gleichrichterschaltungen und Schaltungen zur Phasenanschnittsteuerung, die Fehlerströme mit Gleichstromkomponenten erzeugen können, als Gleichrichter bezeichnet. Früher wurden Gleichrichterschaltungen zur Umformung und Steuerung grosser Leistungen verwendet. Jetzt sind kleine und billige Halbleiterbauelemente vorhanden (Dioden, Thyristoren, Triacs, usw.), mit denen man Verbraucher mit Leistungen $< 1{,}2$ kW technisch günstig regeln und steuern kann. Die Gleichrichterschaltungen benützen dafür praktisch immer Gleichrichter mit Nennströmen bis etwa 5 A. In Bild 3 wird eine Übersicht gemäss [8] über einige stromrichtergespeiste Geräte im Bereich kleiner Leistungen gegeben.

Der Umstand, dass pulsierende Gleichfehlerströme, die in jeder Periode den Wert Null, oder fast Null, annehmen und Gleichfehlerströme,

Art der Last	Gerät	Stromrichterschaltung
Ohmsche Verbraucher	Dimmer	Triac (Anschnittsteuerung)
	Dämmerungsschaltung	Triac (Anschnittsteuerung)
	Kochplatte	Schwingungspaketsteuerung
	Regler für Durchlauferhitzer	Schwingungspaketsteuerung
	Fernsehgerät	Einwegschaltung
	Heimsonnen (Stellung Infrarot)	Einwegschaltung
	Geschaltete Netzgeräte	Zweiweg-Brückenschaltung mit Glättung
Induktive Verbraucher	Bohrmaschine (Universalmotoren)	Einwegschaltung
	Fluoreszenzröhren (mit induktivem Vorschaltgerät)	Triac
	Brummarmer Schütz	Einwegschaltung
	Geräte mit drehzahlgeregelten Asynchronmotoren	Zweiweg-Brückenschaltung mit Glättung

Bild 3 Stromrichtergespeiste Geräte kleiner Leistungen
Diese Tabelle wurde [8] entnommen

wie sie etwa bei Drehstrombrückenschaltungen entstehen, also sich nur wenig dem Wert Null nähern, bei herkömmlichen FI-Schutzschaltern zum Versagen der Auslösung führen, hat sofort zu grossen Bedenken geführt, die sich in jahrzehntelangen Diskussionen in den Vorschriftengremien niedergeschlagen haben.

Bekanntlich können aber pulsierende Gleichfehlerströme, wie sie bei einem Körperschluss bei Geräten mit Gleichrichtern der Schaltungen *1, 4, 5* und *8* nach Bild 2 entstehen, durch FI-Schutzschalter mit Summenstromwandlern aus einem Kernmaterial mit geringer Remanenz beherrscht werden, sofern der pulsierende Gleichstrom der folgenden Definition entspricht (International Electrotechnical Vocabulary 101-04-34): *Ein pulsierender Gleichstrom ist ein Strom von pulsierender Wellenform, der in jeder Periode der Nennfrequenz des Netzes während einer einzelnen Zeitspanne, ausgedrückt im Gradmass, von mindestens 150°, den Wert Null oder einen Wert von nicht mehr als 0,006 A Gleichstrom annimmt.* Derartige FI-Schutzschalter werden in der modernen Normung als FI-Schutzschalter der Type *A* bezeichnet, zum Unterschied von den FI-Schutzschaltern, die nur mit sinusförmigem Wechselstrom einwandfrei funktionieren, für die die Typenbezeichnung *AC* genormt wurde.

In den meisten Ländern wird verlangt, dass A- oder AC-FI-Schutzschalter für den Fehlerschutz netzspannungsunabhängig arbeiten. Fehlerströme, die bei Drehstrombrückenschaltungen nach den Schaltungen *3* und *7*, aber auch bei Anwendung der Schaltungen *2* oder *6* entstehen können, werden von AC- oder A-FI-Schutzschaltern trotzdem nicht beherrscht. Bei der Schaltung *6* ist zwar eine stromlose Pause vorhanden, aber sie ist zu kurz, als dass im Wandlerkern der Remanenzpunkt erreicht würde.

Um auch Fehlerströme zu erfassen, die eine Gleichstromkomponente enthalten, ohne dass eine stromlose Pause innerhalb einer Wechselstromperiode vorhanden ist, wurde der FI-Schutzschalter der Bauform *B* genormt. Er lässt sich aber derzeit für die Gleichstromerfassung nur mit einem netzspannungsabhängigen elektronischen Baustein realisieren, wodurch Probleme der Zuverlässigkeit und der Wirtschaftlichkeit entstehen können. Derzeit gibt es noch keine FI-Schutzschalter der Bauform *B* auf dem Markt. Man versucht daher den Weg zu gehen, die Schaltungen, die Schwierigkeiten verursachen, in den Verbrauchs- und Steuergeräten zu verbieten. Es sind dies die Schaltungen *2, 3, 6* und *7*. Auch Isoliertransformatoren oder Schutzisolierung der kritischen Geräteteile wären denkbar.

Diese Entwicklung bedeutet eine beachtliche wirtschaftliche Belastung. FI-Schutzschalter der Bauform *A* kosten etwa 40% mehr als jene der Bauform *AC*. Sie sind empfindlicher gegen Stossströme und werden daher mit elektronischen Bausteinen im Auslöserkreis ausgestattet. Aber auch bei den Verbrauchsgeräten treten Schwierigkeiten auf. Die Behauptung, dass Drehstrombrückenschaltungen nur in industriellen Geräten verwendet werden, stimmt nicht (man findet sie zum Beispiel in Klimageräten) und die Hersteller der Verbrauchsgeräte wehren sich verständlicherweise gegen eine Einschränkung ihrer Konstruktionsfreiheit.

In der Folge soll daher untersucht werden, ob das Gleichstromproblem nicht ein vernachlässigbares Sicherheitsrisiko darstellt und ob bei den FI-Schutzschaltern nicht die Bauform *AC* ausreicht. Diese Frage ist um so mehr berechtigt, als sich in den letzten Jahren durch Überprüfung der Funktionstüchtigkeit von FI-Schutzschaltern in grösstem Stil (40 000 Anlagen in der BRD, einige tausend Anlagen in Österreich und in Dänemark) herausgestellt hat, dass bei einer mittleren Einbaudauer von 10 Jahren die Ausfallsrate der FI-Schutzschalter in der Grössenordnung von 2...5% liegt.

Bezüglich der in Haushaltsgeräten verwendeten Gleichrichter wurde bereits gesagt, dass ihr Nennstrom kaum

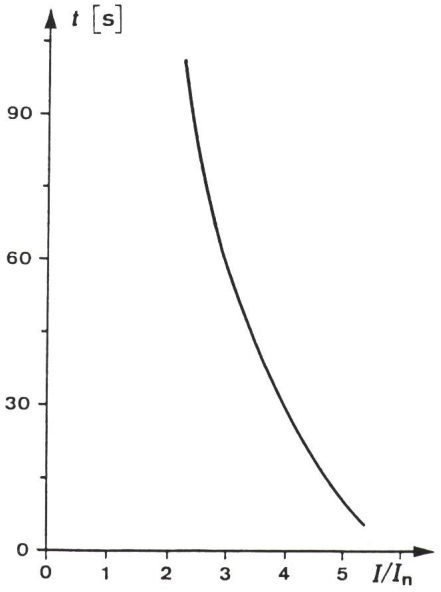

Bild 4 Zerstörungskennlinie eines Brückengleichrichters mit 6 A Nennstrom
I/I_n Belastungsstrom I, bezogen auf den Nennstrom I_n
t Belastungsdauer

5 A übersteigt. Bei einem Körperschluss werden diese Gleichrichter mit dem normalen Betriebsstrom und dem Fehlerstrom belastet. Tritt der Körperschluss unmittelbar nach dem Gleichrichter auf, dann wird die Höhe des Fehlerstromes durch den Widerstand der Fehlerschleife, der bei der Nullung sehr niedrig ist, begrenzt. Der Gleichrichter wird dann sofort zerstört. Bei der FI-Schutzschaltung begrenzt der Anlagenerder den Fehlerstrom, und das Zeitintervall bis zur Zerstörung der Gleichrichter hängt davon ab, um welchen Faktor der Fehlerstrom höher ist als der Gleichrichternennstrom. Bild 4 zeigt das Prinzip einer Zerstörungskennlinie eines Brückengleichrichters mit einem Nennstrom von 6 A.

Die oben beschriebenen, oft von wirtschaftlichen Interessen getragenen Diskussionen haben nun in den vergangenen Jahrzehnten zu einer Verzerrung grundsätzlicher Probleme des Schutzes gegen gefährliche Körperströme geführt. Einerseits beruht das System des dreifachen Schutzes: Basisschutz, Fehlerschutz, Zusatzschutz [9] auf einem kaskadenförmigen Aufbau (Bild 5), andererseits wurde viel zu wenig beachtet, dass das Gleichstromproblem vom Netzsystem (TN-System oder TT-System) abhängt. Gerade bei der Nullung (TN-System) hat man die grundsätzliche Erkenntnis übersehen, dass bei dieser Schutzmassnahme im Fehlerfall praktisch immer die Überstromschutzeinrichtungen und nicht die FI-Schutzschalter ausschalten.

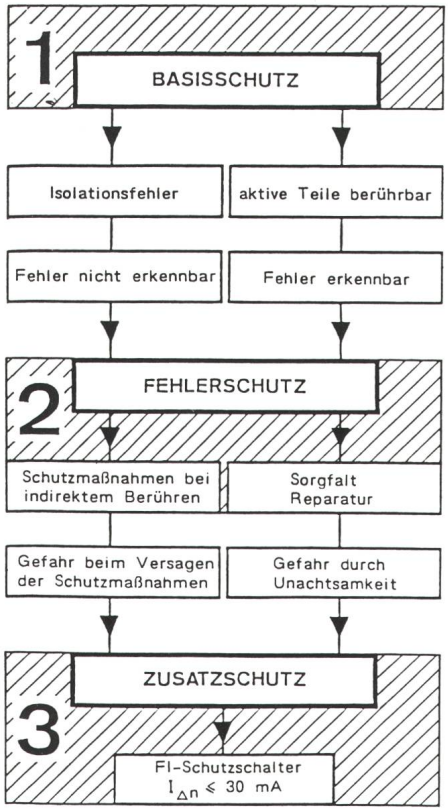

Bild 5 Dreifache Sicherheit durch kaskadenförmigen Aufbau des Schutzes
Durch einen kaskadenförmigen Aufbau des Schutzes aus Basisschutz, Fehlerschutz und Zusatzschutz wird eine dreifache Sicherheit gegen gefährliche Körperströme erreicht

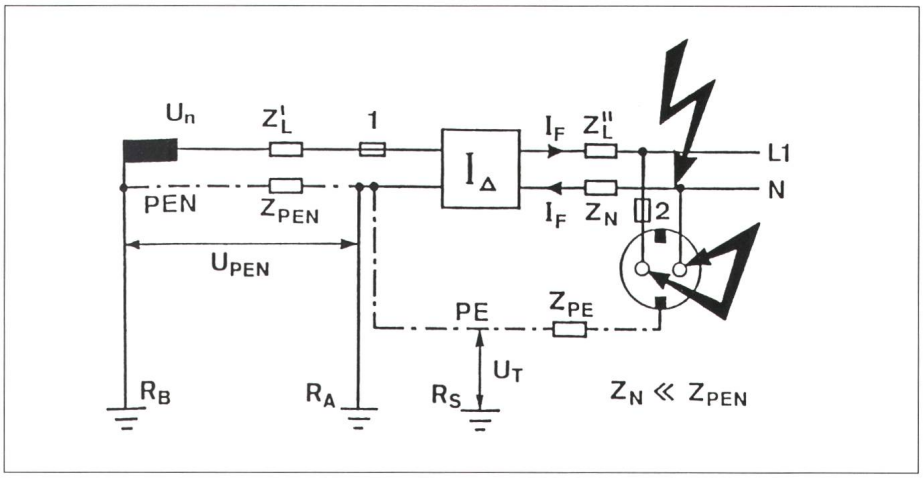

Bild 6 Kein Auslösen des FI-Schutzschalters bei L-N-Kurzschlüssen
Bei Kurzschlüssen L–N versagen FI-Schutzschalter als Schutz bei indirektem Berühren in genullten Anlagen
1 Hausanschlusssicherung
2 Stromkreissicherung
U_{PEN} Spannungsabfall am PEN-Leiter
U_T Berührungsspannung in der Verbraucheranlage
R_A Erdung in der Verbraucheranlage
R_S Standortwiderstand
R_B Betriebserdung des PEN-Leiters in der Umgebung der Transformatorenstation

Die wesentlichste Erkenntnis bei der Beurteilung des Restrisikos, das durch Fehlerströme mit Gleichstromkomponenten entsteht, bildet aber die Tatsache, dass in den vergangenen Jahrzehnten kein einziger Unfall bekannt wurde, der durch das Nichtauslösen eines FI-Schutzschalters infolge von Fehlerströmen mit Gleichstromkomponenten entstanden ist. Warum das so ist, soll in den folgenden Abschnitten dargestellt werden.

Das Gleichstromproblem beim Fehlerschutz

Anlagen mit Nullung (TN-System)

Hier sei zunächst noch einmal auf einen grundsätzlichen Fehler in den internationalen Normen IEC-Publ. 364, § 41, hingewiesen. Darin werden Überstromschutzeinrichtungen und FI-Schutzschalter als Ausschalteinrichtungen im TN-System für den Schutz bei indirektem Berühren (Fehlerschutz) als gleichwertig angeführt. FI-Schutzschalter können aber nur auslösen, wenn ein Körperschluss über den Schutzleiter einen Fehlerstrom zum Anlagenerder oder PEN-Leiter erzeugt.

Bei Kurzschlüssen Aussenleiter-Neutralleiter, die ebenso wahrscheinlich – wenn nicht wahrscheinlicher – sind wie Körperschlüsse, löst der FI-Schutzschalter nicht aus (z.B. Durchbrennen von Glühlampen). Der Fehlerstrom fliesst ja dann gleichzeitig in den beiden entgegengesetzten Richtungen durch den Summenstromwandler des FI-Schutzschalters, so dass dieser nicht erregt wird (Bild 6).

Die Höhe der Fehlerspannungen und der dadurch bedingten Berührungsspannungen in der Anlage hängt bei einem Kurzschluss vom Verhältnis der Impedanz des PEN-Leiters zur Impedanz des Neutralleiters ab, die je nach Anlage verschieden sein können. Der Spannungsabfall am PEN-Leiter beträgt, falls gleiche Querschnitte Aussenleiter, N-Leiter und PEN-Leiter voraussgesetzt werden, ungefähr

$$U_{PEN} < 0{,}5 \cdot U_N \cdot Z_{PEN}/(Z_{PEN} + Z_N)$$

oder, wenn man mit dem Erfahrungswert der Praxis beim Netz 3N~380 V rechnen will, mit

$$U_{PEN} < 100\ \text{V} \cdot Z_{PEN}/(Z_{PEN} + Z_N).$$

Je nach der Verteilung der Betriebserden des PEN-Leiters und der angeschlossenen Erdungen in den Verbraucheranlagen werden Fehlerspannungen U_F in den Verbraucheranla-

gen gemessen, die meist wesentlich kleiner sind als der Spannungsabfall am PEN-Leiter. Man misst sie mit einem Voltmeter mit 40 kOhm Innenwiderstand zwischen dem PE-Leiter und einer Hilfserde ausserhalb des Spannungstrichters des Anlagenerders (z.B. 100 m vom Gebäude entfernt). Die Berührungsspannungen in der Verbraucheranlage sind dann wieder kleiner als die Fehlerspannung U_F und hängen vom Standort ab [10].

Erfolgt der Kurzschluss in der Nähe der Schutzleiterabzweigung vom PEN-Leiter nach dem FI-Schutzschalter, dann ist es so als ob der Schutzschalter überhaupt nicht vorhanden wäre, und die nächste vorgeschaltete Überstromschutzeinrichtung schaltet aus. Wird etwa an dieser Stelle eine Steckdose installiert, und der FI-Schutzschalter soll innerhalb der neuerdings vorgeschriebenen kurzen Zeiten (0,4 s oder 0,2 s) ausschalten, so ist dies bei Kurzschlüssen oft nicht möglich, obwohl die gleichen Fehlerspannungen auftreten wie bei Körperschlüssen.

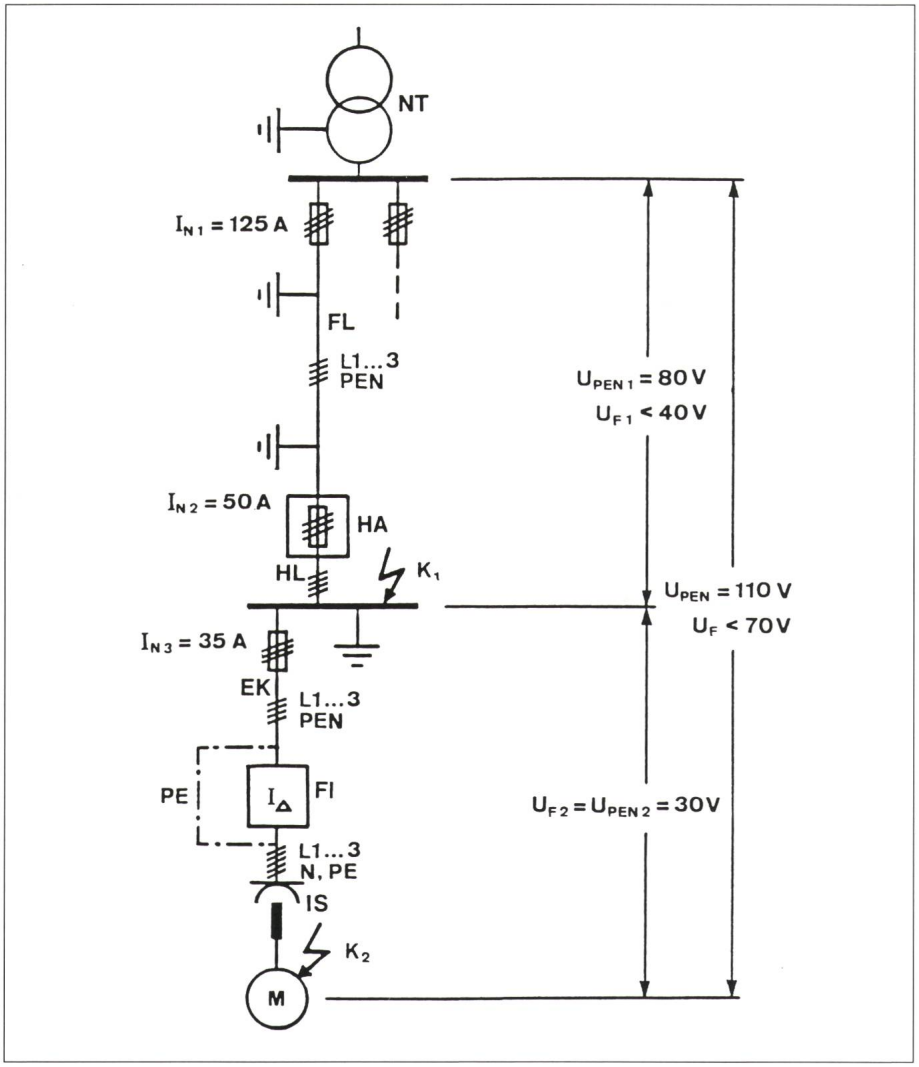

Bild 7 Versorgungsnetz mit Freileitung und Erdkabel
Ländliches Versorgungsnetz mit einer Freileitung zu einer landwirtschaftlichen Betriebsstätte. Geräteschuppen in 100 m Entfernung über ein Erdkabel YY 4 · 10 mm² versorgt, mit Industriesteckvorrichtungen 32 A. FI-Schutzschalter im Geräteschuppen. Schutzleiteranschluss an den PEN-Leiter vor FI-Schutzschalter.

NT Netztransformator: 10/0,4 kV, $S_N = 100$ kVA, $U_{KN} = 6\%$
K1 Kurzschluss *1* mit $Z_1 = 0{,}87\,\Omega + 0{,}07\,\Omega = 0{,}94\,\Omega$, $I_{K1} = 234$ A
FL Freileitung: 4 · 95 mm² Al, $L_1 = 1120$ m
HL Hauptleitung: H07V-R, $L_2 = 30$ m, 16 mm²
HA Hausanschluss
EK Erdkabel: YY4 · 10 mm², $L_3 = 100$ m
IS Industriesteckvorrichtung, $I_N = 32$ A
FI Fehlerstromschutzschalter
K2 Kurzschluss *2* mit $Z_2 = 1{,}3\,\Omega$, $I_{K''} = 169$ A

Der FI-Schutzschalter ist daher aus prinzipiellen Gründen nicht geeignet, in genullten Verbraucheranlagen den Schutz bei indirektem Berühren sicherzustellen. Es handelt sich also nicht um ein Restrisiko, sondern um eine grundsätzliche Unmöglichkeit. Dies sollte insbesondere dann beachtet werden, wenn FI-Schutzschalter eingesetzt werden, wenn infolge der Leitungsimpedanzen die ungerechtfertigt kurzen Ausschaltzeiten der IEC-Normen nicht eingehalten werden können.

Zwei Beispiele aus der Praxis sollen noch bessere Klarheit schaffen. Auf der ganzen Welt gibt es Tausende von Installationen, bei denen die Kurzschlussströme nur einige hundert Ampere betragen (besonders bei Anlagen, welche über lange Stichleitungen versorgt werden). Die Anlage nach Bild 6 könnte zum Beispiel am Ende eines Netzausläufers mit einem Schleifenwiderstand bis zum Hausanschluss von 1 Ω liegen, so dass der Kurzschlussstrom 220 A betragen würde. Es sei ferner angenommen, dass es sich um einen genullten Gewerbebetrieb handle, in dem Industriesteckvorrichtungen mit einem Nennstrom von 32 A montiert sind. Die Steckvorrichtungen seien über 6-mm²-Leitungen versorgt, die mit 35 A abgesichert sind.

Bei 200 A Kurzschlussstrom beträgt die Ausschaltzeit etwa 2 s, das heisst, die Nullung wäre im obigen Fall nach bisher geltenden Bestimmungen vollkommen in Ordnung. Nach den neuen IEC-Normen wird aber eine Zeit von 0,4 s verlangt, und es müsste also ein FI-Schutzschalter montiert werden. Bei einem L-N-Kurzschluss im Verteiler oder in der Steckdose ist der FI-Schutzschalter wirkungslos. Die Länge der Steckdosenleitung beträgt 5 m (Gesamtlänge 10 m, Gesamtwiderstand der Leitung 0,03 Ω). Gegenüber 1 Ω in der Netzschleife ist damit der Widerstand der Steckdosenleitung vernachlässigbar. Die Hausanschlusssicherung für I_N = 63 A spricht bei einem Kurzschluss in der Hauptleitung in 50 s an (Bedingung des Verteilungsnetzes). Auch hier ist die Nullungsbedingung erfüllt. Die Fehlerspannung, die beim Kurzschluss auftritt, ist also die gleiche wie beim Körperschluss, der Einbau eines FI-Schutzschalters hat die Wirksamkeit der Schutzmassnahme nur vorgetäuscht.

Als zweites Beispiel zeigt Bild 7 ein ländliches Versorgungsnetz mit einer

Freileitung zu einem Bauernhof, von dem aus in 100 m Entfernung ein Schuppen mit einer Kreissäge und verschiedenen anderen Geräten versorgt wird. Der Schuppen wird über ein Erdkabel YY 4·10 mm² versorgt, an das Industriesteckvorrichtungen für I_N = 32 A angeschlossen sind und das mit einer Schmelzsicherung für 35 A Nennstrom abgesichert ist. Die bisher geltenden Nullungsbedingungen sind eingehalten, nicht aber die neuen Bestimmungen nach den IEC-Normen. Wird nun ein FI-Schutzschalter im Schuppen vor der Steckdose eingebaut, so ist er bei Kurzschlüssen wieder unwirksam, obschon die Fehlerspannungen gleich hoch sind wie bei Körperschlüssen. Die zu erwartenden Fehlerspannungen können leicht abgeschätzt werden: Durch die vielen Betriebserdungen im Verteilungsnetz bleibt die Fehlerspannung U_{F1} unter 40 V, und die Gesamtfehlerspannung U_F bei einem Körperschluss im Motor ergibt sich mit

$$U_F = U_{F1} + U_{F2} = U_{F1} + U_{PEN2} < 40\ \text{V} + 30\ \text{V} = 70\ \text{V}.$$

Welche Aufgabe haben also FI-Schutzschalter in genullten Anlagen? Abgesehen von der wichtigen Funktion des Zusatzschutzes stellt ein zentraler FI-Schutzschalter in einer genullten Anlage ein wichtiges Schutzorgan dar. Er bildet eine Art Isolationswächter, der Fehler schon im Entstehungszustand erkennen kann und so von grossem Wert, vor allem für den Brandschutz, ist.

Man kann es aber vertreten, in Ausnahmefällen den FI-Schutzschalter auch für den Schutz bei indirektem Berühren zuzulassen, wenn bei Kurzschlüssen die vorgeschaltete Überstromschutzeinrichtung ausschaltet, wobei dann bei der Ausschaltbedingung Konzessionen gemacht werden können. In den österreichischen Vorschriften ÖVE-EN 1, Teil 1, wird zum Beispiel für diesen Fall der Wert 2,5 für den Faktor m zugelassen.

Nimmt man zum Beispiel an, dass der Schuppen in Bild 7 in einer Entfernung von 200 m vom Bauernhaus stünde, dann ist die Nullungsbedingung nicht mehr eingehalten. Der Kurzschlussstrom beträgt ja nur mehr 133 A und nicht, wie erforderlich, 175 A. Lässt man aber als Ausschaltstromstärke 2,5mal 35 A = 87,5 A zu, dann kann wieder genullt werden, und bei Körperschlüssen übernimmt der FI-Schutzschalter im Schuppen die Ausschaltung. Für diese Sonderfälle wird also das Restrisiko akzeptiert, dass bei Kurzschlüssen die Ausschaltung durch die vorgeschaltete Schmelzsicherung etwas länger dauert.

Noch ein Wort über den Brandschutz. Wird in einer genullten Anlage zentral für die Isolationsüberwachung und den Brandschutz ein FI-Schutzschalter, zum Beispiel mit einem Nennfehlerstrom von 0,3 A montiert, dann muss er stossstromfest selektiv sein (Bauform S), damit er mit den nachgeschalteten LS-Schaltern selektiv arbeitet, das heisst beim Schalten der LS-Schalter bei Kurz- und Körperschlüssen darf er nicht auslösen. Auch wegen des Schutzes gegen Fehlauslösungen bei Gewittern ist die Bauform S zu fordern [11, 12].

Da also der FI-Schutzschalter in der Regel in genullten Anlagen nicht für den Fehlerschutz, sondern mit einem Nennfehlerstrom von 30 mA für den Zusatzschutz, oder in der Bauform S mit einem Nennfehlerstrom von 100 oder 300 mA für den Brandschutz dient, hat das Gleichstromproblem bei der Nullung keine Bedeutung. Aber selbst in den wenigen Sonderfällen, in denen, wie beschrieben, der FI-Schutzschalter zusammen mit der vorgeschalteten Überstromschutzeinrichtung für den Fehlerschutz eingesetzt wird, können Gleichfehlerströme in genullten Anlagen keine Gefahren verursachen.

Man erkennt aus Bild 8, dass Fehlerströme, die nach dem Gleichrichter über den PEN-Leiter fliessen, also Gleichstromkomponenten aufweisen, zu keinen gefährlichen Fehlerspannungen führen können, wenn die Stromstärke so niedrig bleibt, dass die Gleichrichter nicht innerhalb kurzer Zeit zerstört werden. Für Gleichrichternennströme bis 5 A ist dies nach Bild 4 für Stromstärken bis etwa 25 A der Fall, wobei zu bedenken ist, dass sich der Gesamtstrom im Gleichrichter aus dem Betriebsstrom und dem Fehlerstrom ergibt. Aber selbst bei einem Fehlerstrom von rund 100 A und einem satten Körperschluss unmittelbar nach dem Gleichrichter (Fehlerstelle *2* in Bild 8), der sich bei einem unrealistisch hohen Schleifenwiderstand von etwa 2 Ohm ergeben würde, bleibt der Spannungsfall am PEN-Leiter unter 100 V ($R_{PEN} \cdot I_F$ = 1 Ω x 100 A) und die Fehlerspannung infolge der PEN-Leitererdungen meist unter 50 V. Bei diesem Fehlerstrom wird der Gleichrichter sofort zerstört (Bild 4), der Fehlerstrom wird zum Wechselstrom und der FI-Schutzschalter löst wieder ordnungsgemäss aus, wenn nicht schon vorher die Überstromschutzeinrichtung ausgeschaltet hat.

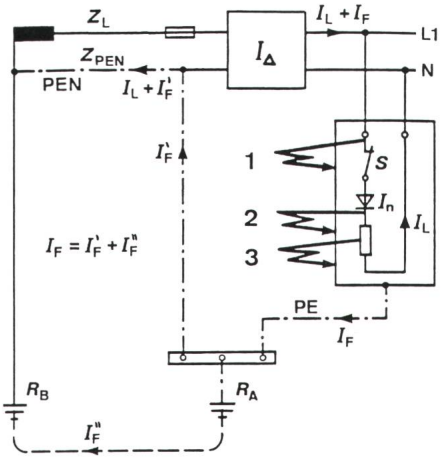

Bild 8 Pulsierende Gleichfehlerströme bei der Nullung

1 Körperschluss vor dem Gleichrichter
2 Körperschluss unmittelbar nach dem Gleichrichter
3 Körperschluss mit Fehlerwiderstand nach dem Gleichrichter
S Geräteschalter
R_B Betriebserdung des PEN-Leiters
R_A Erdung in der Verbraucheranlage
I_n Nennstrom des Gleichrichters, z.B. 5 A
I_L Betriebsstrom des Gerätes
I_F Fehlerstrom

Zusammenfassend kann also für das TN-System folgendes festgestellt werden:

a) Bei der Nullung werden Körperschlüsse in der Regel durch die Überstromschutzeinrichtungen unabhängig von der Stromform ausgeschaltet. Nur in Sonderfällen werden FI-Schutzschalter zusammen mit vorgeschalteten Überstromschutzeinrichtungen für den Schutz bei indirektem Berühren verwendet.

b) Bei Körperschlüssen nach den Gleichrichterschaltungen können durch die in Hausinstallationen verwendeten Betriebsmittel wegen der kleinen Gleichrichternennströme bis etwa 5 A keine gefährlichen Fehlerspannungen in der Anlage entstehen. Überschreiten die Fehlerströme den fünffachen Gleichrichternennstrom, dann werden die Gleichrichter rasch zerstört (Bild 4) und es fliessen wieder Wechselfehlerströme, bei denen der FI-Schutzschalter vorschriftsmässig ausschaltet, wenn nicht schon vorher die Überstromschutzeinrichtung ausgeschaltet hat.

Damit wird das Gleichstromproblem des FI-Schutzschalters in genullten Verbraucheranlagen bedeutungslos.

Anlagen mit FI-Schutzschaltung (TT-System)

Bei der FI-Schutzschaltung können im Falle eines Körperschlusses bei hohen Erdungswiderständen in der geschützten Anlage pulsierende Gleichfehlerströme dauernd zum Fliessen kommen. Dadurch können gefährliche Fehlerspannungen entstehen, wobei Gleichrichter mit den Schaltungen *1, 4* und *5* (Bild 2) zum Versagen der FI-Schutzschalter der Bauform *AC* führen. Bei den Gleichrichtern mit den Schaltungen *2, 3, 6* und *7* nach Bild 2 entstehen Gleichfehlerströme ohne Nullannäherung, bei denen die FI-Schutzschalter der Bauformen *AC* und *A* versagen.

Die nachfolgenden Ausführungen vergleichen das dadurch entstehende Restrisiko mit dem Risiko, das durch das reine mechanische Versagen der FI-Schutzschalter infolge von Alterungserscheinungen bedingt ist und derzeit bei einer mittleren Einbaudauer der Schalter von etwa 10 Jahren im Mittel bei einer Ausfallsrate von 3% liegt. Die Überlegung ist einfach. Wenn ein FI-Schutzschalter mechanisch versagt, dann verursacht ein Körperschluss irgendwo in der Installation oder in einem Verbrauchsgerät während längerer Zeitspannen eine gefährliche Fehlerspannung in der ganzen Installation.

Wenn ein FI-Schutzschalter versagt, weil in einem Betriebsmittel der Schutzklasse I nach dem Gleichrichter ein Körperschluss auftritt, liegen die Verhältnisse ganz anders. Wie bereits gesagt, liegen bei den in den Hausinstallationen verwendeten Betriebsmitteln, falls sie Gleichrichterschaltungen überhaupt benützen, die Nennströme der Gleichrichter praktisch immer unter 5 A. Setzt man für die Risikoüberlegung die Grenze für die Erdungswiderstände der Verbraucheranlage bei maximal 10 Ohm, dann beträgt der Fehlerstrom bei einer treibenden Spannung von 220 V 22 A, wenn, wie meistens der Fall, die Widerstände der Betriebserden und der Leitungen gegenüber dem Erdungswiderstand der Verbraucheranlage vernachlässigt werden können. Zusätzlich wird der Gleichrichter dann noch mit dem Betriebsstrom des Verbrauchsgerätes belastet und innerhalb kurzer Zeit zerstört. Unter 10 Ohm Erdungswiderstand in der Anlage ist es also unwahrscheinlich, dass gefährliche Fehlerspannungen dauernd bestehen bleiben. Da die statistische Verteilung der Erdungswiderstände R_A in den Anlagen bekannt ist, ist der Risikominderungsfaktor f_1 durch den Prozentsatz der Anlagen bestimmt, deren Erdungswiderstand über einem Wert liegt, der als Gefahrengrenze für die Fehlerspannung auszuwählen ist und mit 10 Ohm angenommen wurde.

Es wirken aber noch eine Reihe weiterer Faktoren gefahrenmindernd und müssen daher für den Risikovergleich herangezogen werden:

a) Die Zahl der in den Hausinstallationen verwendeten Betriebsmittel, die Fehlerströme mit Gleichstromkomponenten verursachen können, verglichen mit der Gesamtzahl der Betriebsmittel (Risikominderungsfaktor f_2).

b) Die Wahrscheinlichkeit, dass der Körperschluss in einem Betriebsmittel nach dem Gleichrichter, vor dem Gleichrichter oder an der Anschlussstelle des Betriebsmittels oder in der festen Installation entsteht (Risikominderungsfaktor f_3).

c) Die Gefahrenminderung, die dadurch bedingt ist, dass Gleichfehlerströme nur bei eingeschaltetem Betriebsmittel entstehen können, während im allgemeinen Körperschlüsse unentdeckt bleiben und dauernd anstehen können, zum Beispiel in der Installation oder an den Anschlussstellen der Betriebsmittel (Steckvorrichtungen), (Risikominderungsfaktor f_4).

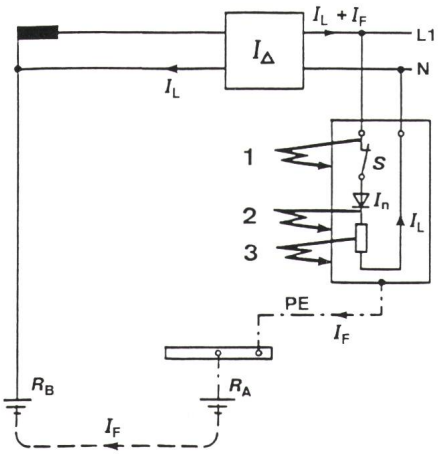

Bild 9 Pulsierende Gleichfehlerströme bei der Fehlerstromschutzschaltung

1 Körperschluss vor dem Gleichrichter
2 Körperschluss unmittelbar nach dem Gleichrichter
3 Körperschluss mit Fehlerwiderstand nach dem Gleichrichter
S Geräteschalter
R_A Erdung in der Verbraucheranlage
R_B Betriebserdung des Neutralleiters
I_N Nennstrom des Gleichrichters
I_L Betriebsstrom des Gerätes
I_F Fehlerstrom über den Anlagenerder

Die Verhältnisse bei der FI-Schutzschaltung sind in Bild 9 dargestellt. Der Fehlerstrom I_F fliesst über den Anlagenerder R_A und erzeugt dort die Fehlerspannung. Gleichfehlerströme können nur bei eingeschaltetem Gerät und Körperschluss nach dem Gleichrichter entstehen. Dabei ist der Fehler unmittelbar nach dem Gleichrichter der gefährlichste Fall, weil bei nicht satten Körperschlüssen die Teilinnenwiderstände des Betriebsmittels als Vorwiderstände die Fehlerspannung herabsetzen.

In der Folge sollen die Risikominderungsfaktoren geschätzt und mit dem Risiko verglichen werden, das durch das mechanische Versagen der FI-Schutzschalter bedingt ist. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich um grobe Schätzungen handelt, aber Ziel dieser Studie ist es, dimensionsmässig die Risiken abzuschätzen.

Die Risikominderungsfaktoren

Es sei darauf hingewiesen, dass die Risikominderungsfaktoren zwar für die Fehlerstromschutzschaltung (TT-System) eine besondere Bedeutung haben, weil sie den Risikovergleich mit dem Risiko erlauben, das durch das mechanische Versagen eines FI-Schutzschalters entsteht, aber prinzipiell auch für die Nullung gelten. Nur tritt bei der Nullung anstelle des Erdungswiderstandes R_A der Anlage der PEN-Leiterwiderstand R_{PEN}, dadurch wird der Risikominderungsfaktor f_1 praktisch Null, und damit wird das Gleichstromproblem bei der Nullung bedeutungslos.

Der Risikominderungsfaktor der Anlagenerdungen (f_1): Die statistische Verteilung der Erdungswiderstände R_A von Anlagen mit FI-Schutzschaltung wurde von der Oberösterreichischen Kraftwerke AG in 601 Anlagen gemessen. Es waren Anlagen in der Landwirtschaft, aber auch in Hausinstallationen, Gewerbe usw., im verbauten Gebiet und im freien Gelände, und zwar in einer Gegend mit zum Teil auch hohen spezifischen Erdwiderständen. Die Werte sind also

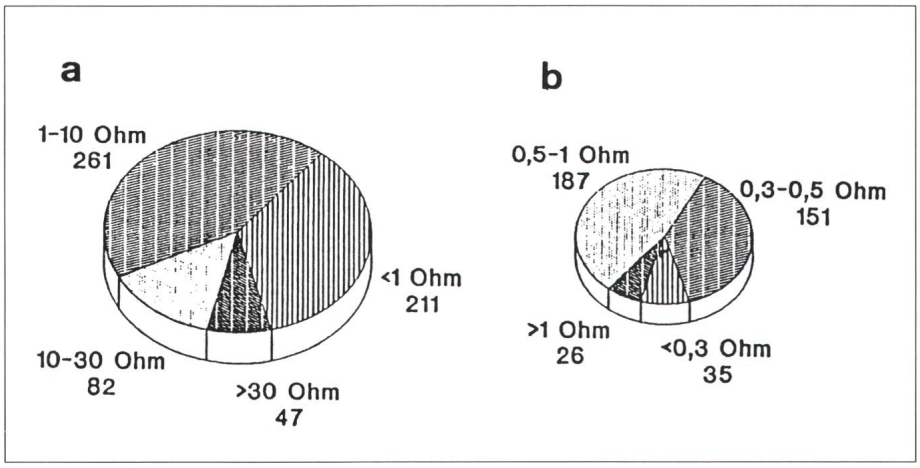

Bild 10 Statistik der Erdungswiderstände und Schleifenwiderstände in Verbraucheranlagen
a Erdungswiderstände von 601 Verbraucheranlagen mit FI-Schutzschaltung
b Schleifenwiderstände von 399 Verbraucheranlagen mit Nullung
Messungen wurden von der Oberösterreichischen Kraftwerke AG durchgeführt

durchaus auch für ein grösseres Kollektiv repräsentativ. Die Verteilung ist in Bild 10 dargestellt, in dem zum Vergleich auch die Messergebnisse für die Schleifenwiderstände von 399 genullten Verbraucheranlagen dargestellt sind. Lässt man, wie früher gesagt, 10 Ohm als Obergrenze für den Erdungswiderstand in den Anlagen mit FI-Schutzschaltung zu, dann ergibt sich der Risikominderungsfaktor f_1 mit

$$f_1 < \frac{\text{Zahl der Anlagen mit } R_A > 10 \text{ Ohm}}{\text{Gesamtzahl der Anlagen}} = \frac{129}{601} = 0{,}2$$

$$f_1 < 0{,}2$$

Der Risikominderungsfaktor für Betriebsmittel, die Fehlerströme mit Gleichstromkomponenten verursachen können (f_2): Die Zahl der in den Hausinstallationen verwendeten Betriebsmittel, die Fehlerströme mit Gleichstromkomponenten verursachen können, ist sicher sehr gering. Sie soll mit 1% aller verwendeten Betriebsmittel konservativ geschätzt werden. Damit ergibt sich der Risikominderungsfaktor $f_2 < 0{,}01$. Hier ist besonders zu beachten, dass nur Betriebsmittel mit Gleichrichtern der Schutzklasse I, also mit Schutzleiter, Fehlerströme mit Gleichstromkomponenten erzeugen können. Die vielen schutzisolierten Geräte, auch mit Gleichrichterschaltungen, die heute vorwiegend für Haushaltsgeräte und Elektrowerkzeuge verwendet werden, sind problemlos, weil auch im Falle eines Isolationsfehlers in der Regel keine Fehlerströme gegen Erde fliessen.

Der Risikominderungsfaktor, der durch die Lage der Fehlerstelle in der Verbraucheranlage entsteht (f_3): Der Körperschluss kann entweder in der festen Installation, bei den Anschlussstellen zu den Verbrauchsgeräten (Steckvorrichtungen, Anschlussleitungen, Geräteanschlussdosen) oder in den Betriebsmitteln vor oder nach dem Gleichrichter entstehen. Nur Körperschlüsse unmittelbar nach dem Gleichrichter können zu Fehlerströmen mit Gleichstromkomponenten führen, die gefährliche Fehlerspannungen verursachen. Nimmt man die vier genannten Fehlermöglichkeiten als gleich wahrscheinlich an, dann ergibt sich der Risikominderungsfaktor f_3 mit 0,25.

Der Risikominderungsfaktor, der durch die zeitliche Begrenzung der Fehlerströme mit Gleichstromkomponenten bedingt ist (f_4): Das Risiko eines Elektrounfalls wird bei Fehlerströmen mit Gleichstromkomponenten dadurch weiter vermindert, dass diese Fehlerströme nur bei eingeschaltetem Gerät und nur eine begrenzte Zeit fliessen können. Im Gegensatz dazu kann zum Beispiel ein Fehler in der festen Installation oder bei den Anschlussstellen der Betriebsmittel zeitlich unbegrenzt anstehen. Der Zahlenwert des Risikominderungsfaktors f_4 ist kaum zu schätzen. Er bildet daher nur eine zusätzliche Sicherheit für den Risikovergleich.

Der Risikovergleich für die Fehlerstromschutzschaltung

Die Wahrscheinlichkeit, mit der in einer elektrischen Anlage per annum Körperschlüsse entstehen, werden mit W_1 bezeichnet. W_1 (Körperschlüsse/annum) = 0,1 bedeutet also, dass in einer Anlage in zehn Jahren, oder in zehn Anlagen in einem Jahr, ein Körperschluss vorkommt, also ein durchaus realistischer Wert.

Die Wahrscheinlichkeit einer Gefährdung infolge eines mechanischen Versagens von FI-Schutzschaltern soll mit W_2 bezeichnet werden. W_2 (FI-mechan. Versagen) = 0,03 bedeutet, dass bei Überprüfung von FI-Schutzschaltern 3% der Schalter nicht auslösen, und das bedeutet gleichzeitig, dass 3% von Körperschlüssen in elektrischen Anlagen infolge des Nichtauslösens von FI-Schutzschaltern durch mechanisches Versagen gefährliche Fehlerspannungen verursachen können.

Die Wahrscheinlichkeit einer Gefährdung infolge eines elektrischen Versagens von FI-Schutzschaltern, verursacht durch Fehlerströme mit Gleichstromkomponenten, soll mit W_3 bezeichnet werden. W_3 (FI-elektr. Versagen) = 0,003 bedeutet, das 3 Promille von Körperschlüssen in elektrischen Anlagen infolge des Nichtauslösens von FI-Schutzschaltern durch Fehlerströme mit Gleichstromkomponenten gefährliche Fehlerspannungen verursachen können.

Damit entstehen gefährliche Fehlerspannungen in einem Jahr infolge des mechanischen Versagens von FI-Schutzschaltern mit einer Gesamtwahrscheinlichkeit von $W_g < W_1 \cdot W_2$ (z.B. $W_g < 0{,}1 \cdot 0{,}03 = 0{,}003$), das heisst in einem Jahr wird in tausend Anlagen dreimal ein Körperschluss auftreten, der infolge mechanischen Versagens des FI-Schutzschalters eine gefährliche Fehlerspannung verursacht. Dies muss noch nicht zu einem Unfall führen, aber die Unfallgefahr ist eminent.

Die Gefährdung durch Fehlerströme mit Gleichstromkomponenten kann nun ebenfalls abgeschätzt werden. W_3 ergibt sich aus dem Produkt der Risikominderungsfaktoren, denn bei einem Körperschluss können Fehlerströme mit Gleichstromkomponenten nur bei Geräten der Schutzklasse I mit Gleichrichterschaltungen auftreten (f_2) und wieder nur dann, wenn der Körperschluss nach dem Gleichrichter erfolgt (f_3), und auch in diesem Fall kann eine gefährliche Fehlerspan-

nung nur entstehen, wenn der Erdungswiderstand entsprechend hoch ist (f_1). Damit folgt für W_3: $W_3 < f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$ (z.B. $W_3 < 0{,}2 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}25 = 0{,}005$). Damit entstehen gefährliche Fehlerspannungen in einem Jahr infolge des Nichtauslösens von FI-Schutzschaltern beim Fliessen von Fehlerströmen mit Gleichstromkomponenten mit einer Gesamtwahrscheinlichkeit von $W_g < W_1 \cdot W_3$ (z.B. $W_g < 0{,}1 \cdot 0{,}0005 = 0{,}00005$), das heisst in einem Jahr werden in hunderttausend Anlagen nicht einmal fünf Fälle auftreten, die infolge elektrischen Versagens des FI-Schutzschalters bei Fehlerströmen mit Gleichstromkomponenten eine gefährliche Fehlerspannung verursachen können. Tatsächlich dürfte das Risiko wegen der grossen Sicherheitsreserven noch um ein bis zwei Zehnerpotenzen geringer sein.

Das Gesamtrisiko in einer Anlage, das durch mechanisches Versagen von FI-Schutzschaltern und durch Fehlerströme mit Gleichstromkomponenten bei Körperschlüssen entsteht, kann wie folgt dargestellt werden:

$$W_g < W_1 \cdot [W_2 + (1 - W_2) \cdot W_3]$$

Mit den im Text angegebenen Zahlenwerten ergibt sich daraus:

$$W_g < 0{,}1 \cdot [0{,}03 + (1 - 0{,}03) \cdot 0{,}0005] < 0{,}1 \cdot [0{,}03 + 0{,}000485]$$

Das Risiko, das bei der Fehlerstromschutzschaltung durch Fehlerströme mit Gleichstromkomponenten entsteht, ist also um mindestens zwei Zehnerpotenzen geringer als das Risiko, das durch mechanisches Versagen der FI-Schutzschalter entsteht.

Das Gleichstromproblem beim Zusatzschutz

Der Zusatzschutz schützt bei direktem Berühren aktiver Teile, bei Schutzleiterverwechslungen und Schutzleiterunterbrechungen sowie beim Versagen von Schutzisolationen [9], aber im wesentlichen kann der Zusatzschutz immer auf den Schutz bei direktem Berühren aktiver Teile zurückgeführt werden. Der menschliche Körper ist aber kein Gleichrichter und damit hat das Gleichstromproblem für den Zusatzschutz keine Bedeutung. Dies wurde auch schon mehrmals in den Diskussionen in nationalen und internationalen Normengremien festgestellt. Das Argument, dass vielleicht einmal in einem Gerät ein aktiver Teil nach einem Gleichrichter berührt werden könnte, ist konstruiert, denn dieser Fall stellt ein vernachlässigbares Sicherheitsrisiko dar.

Auch Bedenken, dass ein Gerät der Schutzklasse I mit einer Gleichrichterschaltung längere Zeit hindurch mit einem Isolationsfehler nach dem Gleichrichter betrieben wird, also ein pulsierender Gleichfehlerstrom fliesst und dadurch Gefahren entstehen können, wenn in der gleichen Anlage gleichzeitig ein aktiver Leiter direkt berührt wird, sind nicht stichhaltig. Der 30-mA-Schalter funktioniert zwar bei pulsierenden Gleichfehlerströmen nicht, aber bei einer Berührung wird zusätzlich der Körperstrom als reiner Wechselstrom zum Fliessen kommen. Damit wechselt die Polarität des Gesamtstromes auch ins Negative, und der Schalter löst im allgemeinen aus (Bild 11).

Zusammenfassende Beurteilung

Die Konsequenzen der gewonnenen Erkenntnisse sind von grosser Tragweite. Zunächst sollen die wesentlichsten Ergebnisse der Untersuchung der Reihe nach angeführt werden und danach werden aus diesen Ergebnissen die Folgerungen für eine moderne Technik des Fehlerstromschutzes gezogen.

a) In den vergangenen 25 Jahren, seit dem Bekanntwerden des Gleichstromproblems bei der FI-Schutzschaltung, ist kein einziger Unfall bekanntgeworden, der durch das Nichtauslösen eines FI-Schutzschalters infolge von Fehlerströmen mit Gleichstromkomponenten entstanden ist.

b) Das Gleichstromrisiko wird sich in Zukunft nicht vergrössern, weil immer

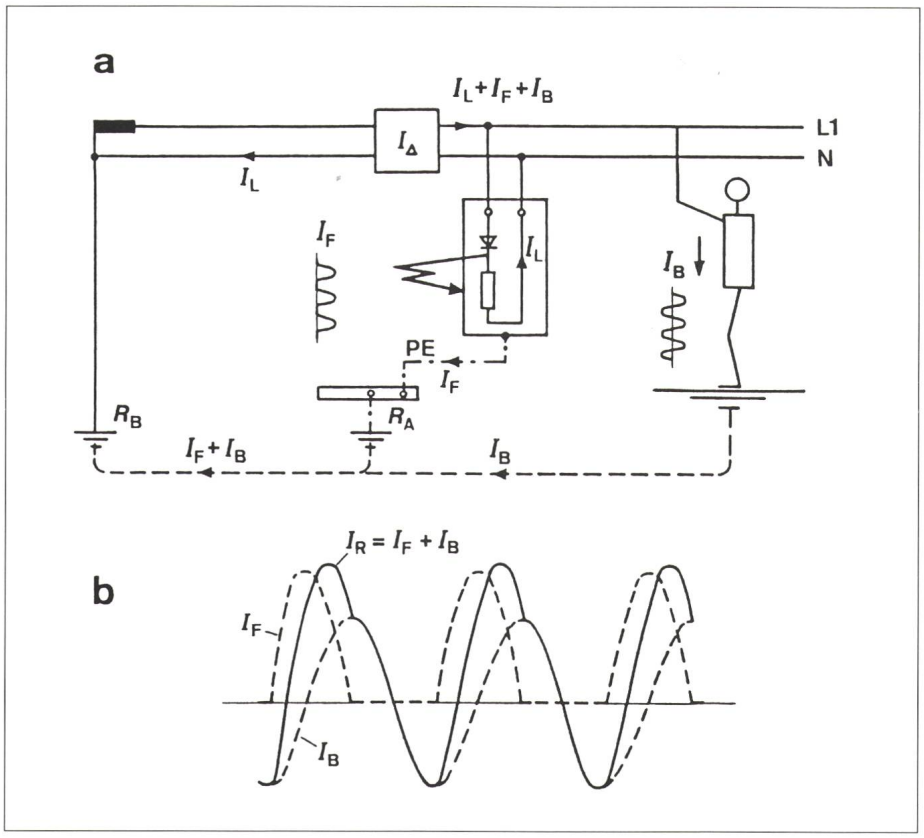

Bild 11 Funktionstüchtigkeit eines FI-Schutzschalters in Geräten mit Gleichrichterschaltungen

Fehlerstromschutzschalter mit Nennfehlerstrom $I_{\Delta n} = 30$ mA bei Isolationsfehlern in Geräten in Schutzklasse I mit Gleichrichterschaltungen, die pulsierende Gleichfehlerströme erzeugen und gleichzeitiger Berührung eines aktiven Teiles in der Anlage durch einen Menschen.

a Schaltbild
b Beispiel einer resultierenden Kurvenform des Fehlerstromes in Summenstromwandler
R_A Erdung in der Verbraucheranlage
R_B Betriebserdung des Neutralleiters
I_F Pulsierender Gleichfehlerstrom infolge Isolationsfehlers nach dem Gleichrichter
I_B Körperstrom durch den Menschen
I_R Resultierender Fehlerstrom: $I_R = I_F + I_B$

mehr Verbrauchsgeräte der Schutzklasse II im Haushalt Verwendung finden, bei denen eingebaute Gleichrichterschaltungen keine Fehlerströme mit Gleichstromkomponenten verursachen können.

c) Das Gleichstromproblem existiert nicht bei Einbau von FI-Schutzschaltern in genullten Verbraucheranlagen (TN-Systemen).

d) Das Gleichstromproblem existiert nicht bei der Verwendung von FI-Schutzschaltern mit einem Nennfehlerstrom von 30 mA für den Zusatzschutz.

e) Das Gleichstromproblem stellt bei der Verwendung von FI-Schutzschaltern für Fehlerstromschutzschaltungen (TT-Systeme) ein vernachlässigbares Sicherheitsrisiko dar.

Damit ergeben sich für die Errichtungsnormen von Niederspannungsanlagen und für die Normen für den Bau von FI-Schutzschaltern folgende Konsequenzen:

f) Sowohl für den Schutz bei indirektem Berühren (Fehlerschutz) als auch für den Zusatzschutz genügt die Bauform *AC* von FI-Schutzschaltern.

g) Demzufolge genügt es, in die internationalen und nationalen Normen für FI-Schutzschalter nur die Wechselstromausführung (Bauform *AC*) aufzunehmen.

Die für dieses Problem zuständige Arbeitsgruppe der IEC, nämlich IEC-ACOS-Arbeitsgruppe Gleichstromkomponenten, hat im Dezember 1990 in Paris die folgende Stellungnahme abgegeben, die in etwa mit den Ansichten dieses Aufsatzes übereinstimmt. Wegen der grossen wirtschaftlichen und technischen Bedeutung wird er in der Folge im englischen Originaltext wiedergegeben:

«In line with the general principles of ISO/IEC Guide 51, the WG has considered the overall risk of failure of protective provisions within electrical installations. The risk due to DC components within RCD protected circuits has again been reviewed and considered much less important than other factors affecting the reliable functioning of RCDs. In view of this, the WG considered that publication of the Report requested would be premature and could impair studies in progress in IEC/SC 23E in cooperation, in particular, with TC 56. – The WG therefore suggests that for the time being no further work be undertaken on such a report.»

Damit ist diese leidige Frage, deren Behandlung so viel Arbeitszeit und damit Geld gekostet hat, endlich bereinigt. Die Arbeitsgruppe wird bei der nächsten Sitzung von ACOS (Advisory Committee on Safety der IEC) im April 1991 obige Stellungnahme vorlegen.

Literatur

[1] Untersuchungen über den Einfluss von Gleichströmen auf den Auslösestrom von Fehlerstrom-Schutzschaltern. Geschäftsbericht 1966. Köln, TÜV-Rheinland, 1966.

[2] *G. Deloux* e. a.: Fonctionnement des dispositifs différentiels en présence d'une composante continue. Rev. Gén. Electr. 87(1978)10, p. 751...759.

[3] *H. Thielen* und *U. Valentin:* Beeinflussung der Fehlerstrom-Schutzschalter durch Fehlergleichströme. ETZ 100(1979)15, S. 834...836.

[4] *A. Winkler:* Gleichstrombeeinflussung bei FI-Schutzschaltern. ETZ-B 29(1977)5/6, S. 166...177.

[5] *R. Eltschka* und *H. Hofschneider:* Zum Betriebsverhalten eines Fehlerstrom-Schutzschalters in Drehstromkreisen unter Berücksichtigung einer Gleichstromvormagnetisierung. ÖZE 29(1976)9, S. 360...368.

[6] *H. Zürneck:* Wirkungen von Fehler-Gleichströmen auf FI-Schutzschalter. ETZ-B 28(1976) 6/7, S. 170...172.

[7] *U. Kröger:* Beeinflussung von FI-Schutzschaltern durch Schwingungspaket-Steuerung. ETZ-B 28(1976)6/7, S. 172...175.

[8] *M. Tayefeh-Emamverdi:* FI-Schalter für Gleichfehlerströme. Bull. SEV/VSE 73(1982)9, S. 400...408.

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

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

[11] *G. Biegelmeier:* Die langsame «schnelle Nullung». Bull. SEV/VSE 75(1984)23, S. 1413...1417.

[12] *G. Biegelmeier:* Gedanken über die Nullung (TN-System) als optimalen Fehlerschutz (Schutzmassnahme bei indirektem Berühren) in elektrischen Anlagen. ÖZE 37(1984)12, S. 483...493.