

# 5 Schutzmaßnahme: Automatische Abschaltung der Stromversorgung – DIN VDE 0100-410, Abschnitt 411

## 5.1 Allgemeine Anforderungen

### 5.1.1 Einführung

Der Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung muss erfüllt werden durch den

- Basisschutz (Schutz gegen direktes Berühren), realisiert durch eine Basisisolierung der aktiven Teile oder durch Abdeckungen oder Umhüllungen und den
- Fehlerschutz (Schutz bei indirektem Berühren), realisiert durch den Schutzpotentialausgleich über die Haupterdungsschiene und die automatische Abschaltung der Stromversorgung

Den Zusammenhang zwischen der übergeordneten Schutzmaßnahme für den Schutz gegen elektrischen Schlag und den damit verbundenen Schutzvorkehrungen zeigt **Bild 5.1**.

Als Basisschutz (Schutz bei direktem Berühren) kommen in erster Linie Schutz durch Isolierung und Schutz durch Abdeckungen oder Umhüllungen zur Anwendung. Wenn die Verhältnisse dies zulassen, sind auch die Maßnahmen „Schutz durch Hindernisse“ und „Schutz durch Anordnung außerhalb des Handbereichs“ zulässig. Beim Fehlerschutz (Schutz bei indirektem Berühren) gilt nach DIN VDE 0100-100, Abschnitt 131.2.2 folgender Grundsatz:

**Personen oder Nutztiere müssen vor Gefahren geschützt werden, die beim Berühren von Körpern elektrischer Betriebsmittel im Falle eines Fehlers entstehen.**

Dies wird bei der Schutzmaßnahme „Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung“ dadurch erreicht, dass

- a) im normalen Betriebsfall keine gefährliche Spannung berührt werden kann (Basisschutz)
- b) eine vorgeschaltete Schutzeinrichtung im Fehlerfall (z. B. Körperschluss in einem Betriebsmittel) die Stromversorgung in einer festgelegten Mindestzeit abschaltet und
- c) die im Fehlerfall auftretende Berührungsspannung bis zur endgültigen Abschaltung möglichst gering bleibt



**Bild 5.1** Darstellung der Schutzmaßnahmen für den Schutz gegen elektrischen Schlag in TT- und TN-Systemen am Beispiel der Schutzmaßnahme „Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung“

Die Anforderung nach Punkt a) entspricht der Basisschutzvorkehrung, die bereits im Kapitel 4.2.2 dieses Buchs besprochen wurde. Die Punkte b) und c) sind Teilschutzvorkehrungen innerhalb der Fehlerschutzvorkehrung. Punkt b) wird durch die erste Teilschutzvorkehrung erfüllt (siehe Bild 5.1), die auch als „Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung“ bezeichnet wird. Anforderungen hierzu sind in DIN VDE 0100-410, Abschnitt 411.3.2 zu finden. Die festgelegten Mindestabschaltzeiten werden in Tabelle 41.1 der Norm angegeben.

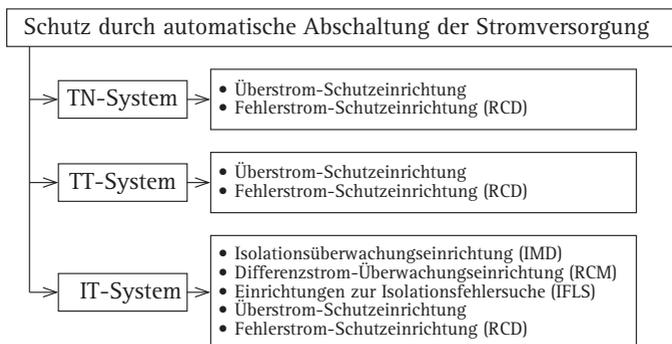
Voraussetzung ist dabei immer, dass sämtliche Körper der elektrischen Betriebsmittel mit einem Schutzleiter verbunden sind, der in jedem Stromkreis mitgeführt wird. Die verschiedenen Schutzleiter werden in den Abzweigboxen, Klemmenkästen und Elektroverteilungen miteinander sowie letztlich mit dem Schutzleiter des einspeisenden Netzsystems (beim TN-System) bzw. mit dem Anlagenerder (beim IT- und TT-System) verbunden. Weitere Einzelheiten sind in Kapitel 5.1 bis Kapitel 5.5 zu finden. Die Spannungsreduzierung der zuvor erwähnten Anforderung in Punkt c) wird durch den „Schutzpotentialausgleich über die Haupterdungsschiene“ nach DIN VDE 0100-410, Abschnitt 411.3.1.2 ermöglicht. Dessen Wirkung wird im nachfolgenden Kapitel 5.1.2 beschrieben.

Bei der vorgenannten Vorkehrung „Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung“ ist eine Koordinierung erforderlich hinsichtlich:

- System nach der Art der Erdverbindung
  - TN-System
  - TT-System
  - IT-System
- Schutzeinrichtung bzw. Überwachungseinrichtung
  - Überstrom-Schutzeinrichtung (SPD)
  - Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD)
  - Isolationsüberwachungseinrichtung (IMD)
  - Differenzstrom-Überwachungseinrichtung (RCM)
  - Einrichtungen zur Isolationsfehlersuche (IFLS)

Anmerkung: Isolationsüberwachungseinrichtung (IMD), Einrichtungen zur Isolationsfehlersuche (IFLS) und Differenzstrom-Überwachungseinrichtungen (RCMs) sind keine Schutzeinrichtungen, sie dürfen jedoch zur Überwachung des ersten Fehlers verwendet werden, bei dem keine Abschaltung erfolgt. Die Überwachungseinrichtungen lösen im Allgemeinen ein hörbares oder ein hör- und sichtbares Signal aus, wenn der vorgewählte Wert überschritten ist.

Bild 5.2 zeigt, welche Schutzeinrichtung und/oder Überwachungseinrichtung für die Schutzmaßnahme „Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung“ in den verschiedenen Netzsystemen eingesetzt werden darf.



**Bild 5.2** Schutzeinrichtungen für den „Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung“ in den verschiedenen Netzsystemen  
 Hinweis: Zur RCM, IMD, IFLS und RCD siehe die diesbezüglichen Ausführungen im Kapitel 5.4

Für Stromversorgungssysteme mit einer Nennspannung  $U_0$  größer als AC 50 V oder DC 120 V wird keine automatische Abschaltung verlangt, wenn im Falle eines Fehlers gegen einen Schutzleiter oder gegen Erde die Spannung automatisch auf AC 50 V oder DC 120 V oder weniger herabgesetzt wird. Dies hat in einer Zeit zu erfolgen, die DIN VDE 0100-410, Tabelle 41.1 für Endstromkreise mit maximal 32-A-Sicherungen vorgibt, oder innerhalb von 5 s bei Verteilerstromkreisen und Stromkreisen, die mit Sicherungen  $> 32$  A abgesichert sind.

Ist eine automatische Abschaltung in der geforderten Abschaltzeit nicht möglich, weil beispielsweise nur ein begrenzter Kurzschlussstrom zur Verfügung steht, sollte als erstes geprüft werden, ob durch den Einsatz einer Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD) die Abschaltzeit dennoch erreicht werden kann (siehe Kapitel 5.2.4 in diesem Buch). Ist der Einsatz einer RCD nicht möglich, sollte die Anwendung einer anderen Schutzmaßnahme in Erwägung gezogen werden. Wenn auch dies nicht möglich ist, darf die Spannung automatisch auf AC 50 V oder DC 120 V oder weniger herabgesetzt werden.

In Endstromkreisen mit einer oder mehreren Steckdosen hat dies mit einem Nennstrom bis maximal 63 A sowie für Endstromkreise mit fest angeschlossenen Verbrauchsmitteln bis zu einem Nennstrom von 32 A in einer Zeit nach Tabelle 41.1 aus DIN VDE 0100-410 zu erfolgen.

In Verteilerstromkreisen sowie bei Stromkreisen, die nicht unter die o. g. Endstromkreise fallen, muss dies innerhalb von 5 s (TN-System) bzw. 1 s (TT-System) erfolgen.

Wenn es möglich ist, sollte die Spannung nicht nur abgesenkt werden, sondern der Stromkreis sollte innerhalb von 5 s auch abgeschaltet werden. Eine Abschaltung ist auch besonders zu beachten wegen des Schutzes bei Überstrom nach DIN VDE 0100-430.

Diese Spannungsabsenkung ist eine von zwei Vorkehrungen nach Anhang D der DIN VDE 0100-410. Die zweite Vorkehrung bezieht sich auf den zusätzlichen Schutzpotentialausgleich und wird im Kapitel 9.2 dieses Buchs behandelt.

## 5.1.2 Schutzpotentialausgleich über die Haupterdungsschiene

### 5.1.2.1 Aufgabenbeschreibung

Wie im vorigen Abschnitt bereits angedeutet, soll die Wirkung des Schutzpotentialausgleichs über die Haupterdungsschiene die Wirkung der automatischen Abschaltung der Stromversorgung verstärken bzw. die verbleibende Gefährdung verringern. Dies soll im Folgenden erläutert werden.

Bei einem Körperschluss im TN-System wird maximal die halbe Strangspannung (Spannung der Außenleiter gegen Erde)  $U_0$  auftreten.

Diese Überlegung setzt vereinfacht voraus, dass die Querschnitte des mit dem Fehler verbundenen Außenleiters und des beteiligten Schutzleiters bzw. PEN-Leiters gleich sind. Die Spannung  $U_0$  wird demnach aufgeteilt in den Spannungsfall:

- am Außenleiter
- am PEN-Leiter

Als mögliche Berührungsspannung  $U_B$  fällt dann der Spannungsfall über den Schutzleiter an:  $\frac{U_0}{2}$ .

Für übliche Versorgungssysteme im TN-System gilt demnach:

$$U_B \approx \frac{U_0}{2} = \frac{230 \text{ V}}{2} = 115 \text{ V}$$

Detailliertere Angaben sind im nachfolgenden Kapitel 5.2 zu finden (siehe auch Bild 5.5 dieses Buchs).

Im TT-System fällt im Fehlerfall noch eine viel höhere Spannung an. Da der Fehlerstrom in TT-Systemen über den Anlagenerder  $R_A$  fließt, der in diesem Fehlerstromkreis den höchsten Widerstand darstellt, wird die mögliche Berührungsspannung im TT-System fast so groß wie die Spannung gegen Erde ( $U_0$ ). Bei Felduntersuchungen hat man typische Werte zwischen 190 V und 220 V gemessen.

In der Regel kann auf eine automatische Abschaltung der Stromversorgung nur dann verzichtet werden, wenn die Berührungsspannung unter 50 V bleibt. Allerdings wird diese Spannung im Fehlerfall, wie zuvor beschrieben, sowohl beim TT- als auch beim TN-System deutlich überschritten. Deshalb gelten für alle Netzsysteme mit Nennspannungen über 50 V die Abschaltzeiten aus DIN VDE 0100-410, Tabelle 41.1. Die Zeiten werden im nachfolgenden Kapitel 5.2 angegeben.

Da die Spannung innerhalb dieser Abschaltzeit in allen Netzsystemen allerdings immer noch recht hoch ist, wird eine zweite Teil-Schutzvorkehrung vorgeschrieben, um die Berührungsspannung weiter zu reduzieren. Diese zweite Teilvorkehrung ist der **Schutzpotentialausgleich über die Haupterdungsschiene**.

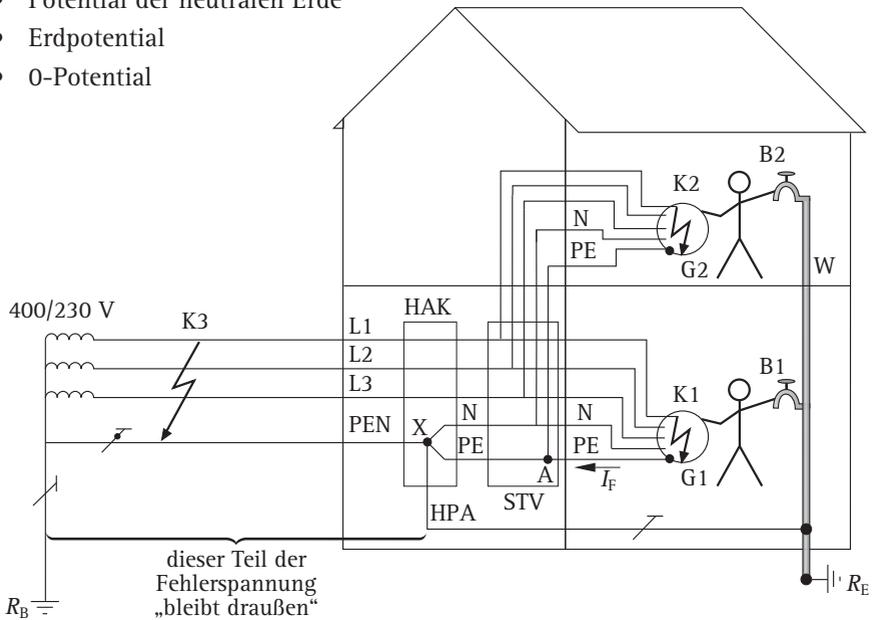
Die Hauptaufgabe des Schutzpotentialausgleichs über die Haupterdungsschiene kann demnach wie folgt beschrieben werden:

Die erste Teil-Schutzvorkehrung innerhalb der Fehlerschutzvorkehrung ist die automatische Abschaltung der Stromversorgung, und die zweite ist der Schutzpotentialausgleich über die Haupterdungsschiene. Diese zweite Teil-Schutzvorkehrung verringert die Berührungsspannung bei einem Körperschluss, damit in der Zeit zwischen dem Auftreten des Fehlers und der endgültigen Abschaltung keine gefährlichen Berührungsströme entstehen.

### 5.1.2.2 Funktionsweise

Die gewünschte Reduzierung der möglichen Berührungsspannung wird erreicht, indem das Potential der Bezugserde aus dem Gebäude herausgehalten wird. Das Potential der Bezugserde (siehe Begriffsbestimmung in Kapitel 2.4 in diesem Buch) wird oft ganz unterschiedlich bezeichnet, so z. B.:

- Potential der fernen Erde
- Potential der neutralen Erde
- Erdpotential
- 0-Potential



**Bild 5.3** Darstellung von Fehlern im TN-System und der Wirkung des Schutzpotentialausgleichs über die Haupterdungsschiene

W Wasserleitung, die im Außenbereich Erdpotential annimmt

$R_E$  Erdungswiderstand der Wasserleitung

$R_B$  Widerstand des Betriebserders; der Betriebserder nimmt wie die Wasserleitung Erdpotential an

G elektrisches Verbrauchsmittel (Gerät)

K Ort des Fehlers (Körperschluss); K1 im Gerät G1 und K2 im Gerät G2

B Stelle der Berührung (B1 im Erdgeschoss und B2 im Obergeschoss)

X Aufteilungspunkt des PEN-Leiters in Neutralleiter und Schutzleiter und zugleich Anschlusspunkt des Schutzpotentialausgleichs (HPA) an den PEN-Leiter des Versorgungsnetzes

A Aufteilungspunkt des PE-Leiters in PE-Leiter zum Gerät G1 und PE-Leiter zum Gerät G2 im STV

HAK Hausanschlusskasten

STV Stromkreisverteiler

HPA Schutzpotentialausgleich über die Haupterdungsschiene

Im Bild 5.3 wird beispielhaft die Wirkung des Schutzpotentialausgleichs über die Haupterdungsschiene veranschaulicht. Zur Erläuterung kann Folgendes gesagt werden:

Der Fehler an der im Bild 5.3 mit K3 bezeichneten Stelle findet im Außenbereich des Gebäudes statt und soll hier nicht weiter beschrieben werden, und auch die Betrachtung eines Fehlers bei G2 (Fehler K2) bleibt für diese Betrachtung unberücksichtigt. Bei einem Fehler bei K1 im Gerät G1 fließt über den Schutzleiter ein Fehlerstrom  $I_F$ . Dieser Strom verursacht einen Spannungsfall entlang der gesamten Länge des Schutzleiters von der Fehlerstelle (Punkt K1) bis zur Haupterdungsschiene (Punkt X) und im weiteren Verlauf auch über den PEN-Leiter bis zum Sternpunkt des speisenden Transformators.

Durch den Schutzpotentialausgleich (im Bild 5.3 als HPA bezeichnet) wird das Potential am Punkt X mit dem Potential am Berührungspunkt (B1) kurzgeschlossen. Der Spannungsfall über den PEN-Leiter fällt deshalb innerhalb des Gebäudes nicht mehr an. Darum kann die mögliche Berührungsspannung  $U_B$  bei einem Fehler bei K1 wie folgt berechnet werden:

$$U_B = I_F \cdot R_{PE}$$

$R_{PE}$  Widerstand des Schutzleiters von der Fehlerstelle K1 bis zum Punkt X (Punkt X im HAK ist zugleich der Anschlusspunkt an der Haupterdungsschiene)

Typische Werte für  $U_B$  liegen im TN-System in der Größenordnung von 80 V... 100 V.

**Beispiel:**

$$R_{PEN} \quad 50 \text{ m}\Omega$$

$$R_{PE} \quad 150 \text{ m}\Omega$$

$$R_{Sch} \quad 400 \text{ m}\Omega = 2 \cdot (R_{PEN} + R_{PE}), \text{ Innenwiderstand der Stromquelle vernachlässigt}$$

$$I_F = \frac{230 \text{ V}}{0,4 \Omega} = 575 \text{ A}$$

$$U_B = I_F \cdot R_{PE} = 575 \text{ A} \cdot 0,15 \Omega = 86 \text{ V}$$

Die zuvor noch recht allgemein formulierte Aufgabenbeschreibung des Schutzpotentialausgleichs über die Haupterdungsschiene wird durch folgende Funktionsbeschreibung konkretisiert:

Der Schutzpotentialausgleich über die Haupterdungsschiene erfüllt die ihm gestellte Aufgabe, indem er dafür sorgt, dass das Potential der neutralen Erde (Bezugserde) nicht ins Innere des Gebäudes gelangt. Auf diese Weise wird die mögliche Berührungsspannung im Fehlerfall reduziert.

Um diese Aufgabe zu erfüllen, müssen über die Haupterdungsschiene verbunden werden:

5

- der Schutzleiter im Gebäude
- (im TN-System) der Schutzleiter des einspeisenden Netzes
- alle leitfähigen Teile, die von außen in das Gebäude führen bzw. die das elektrische Potential der Erde in das Gebäude einführen können.

Zu den zuletzt genannten Teilen gehören z. B.:

- Erdungsanlage
- metallene Rohrleitungen von Versorgungssystemen (z. B. Frischwasser)
- metallene Mäntel von Kabeln (dabei Absprachen mit den Eignern oder Betreibern solcher Kabel nicht vergessen)
- metallene Verstärkung der Gebäudekonstruktion aus bewehrtem Beton, sofern möglich
- metallene Teile der Gebäudekonstruktion (z. B. Stahlstützen bei Stahlskelettbauten)

Anmerkung: Immer wieder taucht die Frage auf, warum der Vor- und Rücklauf der Heizungsanlage mit einbezogen werden soll, obwohl diese kein Erdpotential in das Gebäude einführen können. Genau genommen ist dies auch für die Funktion des Schutzpotentialausgleichs über die Haupterdungsschiene nicht erforderlich. Gemeint waren immer solche Teile, die das Erdpotential einführen können. Trotzdem ist es natürlich nicht falsch, die Heizung mit anzuschließen. Ähnlich verhält es sich mit dem Gasrohr, sofern ein Isolierstück das Eindringen des Erdpotentials verhindert.

## 5.2 Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung im TN-System (DIN VDE 0100-410, Abschnitt 411.4)

### 5.2.1 Allgemeine Anforderungen

Für das TN-System sind als Schutzeinrichtungen zugelassen:

- Überstrom-Schutzeinrichtungen
- RCDs

Dabei ist zu beachten, dass RCDs im TN-C-System nicht anwendbar sind. RCDs können hier keinen Schutz bieten, weil auch der Fehlerstrom durch den Ringkernwandler des RCD fließen würde und im Fehlerfall kein Auslösen möglich wäre.

Wichtigste Voraussetzung im TN-System ist die niederohmige Erdung des Sternpunkts des Transformators oder Generators. Mit diesem geerdeten Punkt sind alle Körper entweder über Schutzleiter oder PEN-Leiter direkt zu verbinden. Wenn kein Sternpunkt vorhanden ist, darf auch ein Außenleiter geerdet werden.

Schutzeinrichtungen und Leiterquerschnitte sind so aufeinander abzustimmen, dass folgende Bedingung erfüllt ist:

$$Z_S \cdot I_a \leq U_0 \quad (5.1)$$

In Gl. (5.1) bedeuten:

- $Z_S$  Impedanz der Fehlerschleife in  $\Omega$ ;  
sie kann gemessen, errechnet oder am Netzmodell ermittelt werden
- $I_a$  Strom in A, der das automatische Abschalten bewirkt, wobei in Abhängigkeit der Spannung gegen Erde  $U_0$  für Wechselspannung und Endstromkreise mit fest angeschlossenen Verbrauchsmitteln mit maximal 32 A Nennstrom und alle anderen Endstromkreise mit maximal 63 A Nennstrom folgende Abschaltzeiten einzuhalten sind:
- 0,8 s bei  $50 \text{ V} < U_0 \leq \text{AC } 120 \text{ V}$
  - 0,4 s bei  $120 \text{ V} < U_0 \leq \text{AC } 230 \text{ V}$
  - 0,2 s bei  $230 \text{ V} < U_0 \leq \text{AC } 400 \text{ V}$
  - 0,1 s bei  $U_0 > \text{AC } 400 \text{ V}$

Für Verteilerstromkreise und Endstromkreise mit höheren Nennströmen als die o. g. ist eine Abschaltzeit von maximal 5 s zulässig.

Der Fehlerstrom ist wesentlich höher als der zum Auslösen notwendige Bemessungsdifferenzstrom von  $5 I_{\Delta n}$ , und damit wird die geforderte Abschaltzeit sowohl bei normalen als auch bei selektiven (zeitverzögerten) RCDs eingehalten. Bei Leistungsschaltern mit Fehlerstromschutz (CBRs und MRCDs) ist darauf zu achten, dass die eingestellte Auslösezeit der geforderten Abschaltzeit entspricht.

$U_0$  Nennspannung Außenleiter gegen den geerdeten Leiter in V

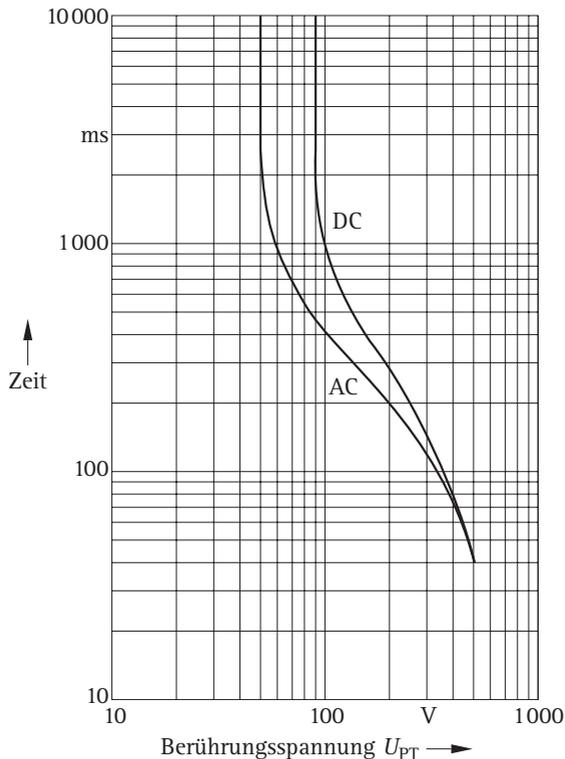
In Verteilungsstromkreisen, z. B. in der Hauptleitung des Hauptstromversorgungssystems eines Wohngebäudes nach DIN 18015-1, können die vorgenannten Anforderungen vielfach nicht erfüllt werden. Deshalb werden solche Anlagenbereiche, also der Verteilungsstromkreis einschließlich der damit versorgten Verteilung, schutzisoliert ausgeführt. Dies muss bei der Auswahl der Verteilung berücksichtigt werden. Für die betroffenen Kabel und Leitungen stellt dies kein Problem dar, weil sie in der Regel als schutzisoliert gelten. In den meisten Fällen reicht es dann aus, wenn eine Abschaltung mindestens in der Zeit des sogenannten „großen Prüfstroms“ (siehe hierzu Kapitel 22 dieses Buchs) stattfindet. Das bedeutet z. B. für Stromkreise bis 63 A eine Abschaltung in spätestens einer Stunde.

Abgesehen von diesen Besonderheiten gelten die entsprechend den zu erwartenden Berührungsspannungen festgelegten Abschaltzeiten beim Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung. Diese Zeiten können aus Bild 5.4 nachvollzogen werden.

Die näheren Zusammenhänge zwischen Spannung/Strom und Abschaltzeiten bei Stromdurchgang durch den menschlichen Körper sind in Kapitel 3.1 dieses Buchs beschrieben. In Bild 5.4 zeigt die Kurve AC (Wechselspannung) die Abschaltzeiten entsprechend der zu erwartenden Berührungsspannung bei Wechselspannungsanlagen; die Kurve DC (Gleichspannung) zeigt die Abschaltzeiten bei Gleichspannungsanlagen.

Für Gleichstromanlagen gelten für Endstromkreise mit fest angeschlossenen Verbrauchsmitteln mit maximal 32 A Nennstrom und alle anderen Endstromkreise mit maximal 63 A Nennstrom folgende maximale Abschaltzeiten:

- 1,0 s bei  $120 \text{ V} < U_0 \leq \text{DC } 230 \text{ V}$
- 0,4 s bei  $230 \text{ V} < U_0 \leq \text{DC } 400 \text{ V}$
- 0,1 s bei  $U_0 > \text{DC } 400 \text{ V}$



**Bild 5.4** Abschaltzeiten in Abhängigkeit von der zu erwartenden Berührungsspannung

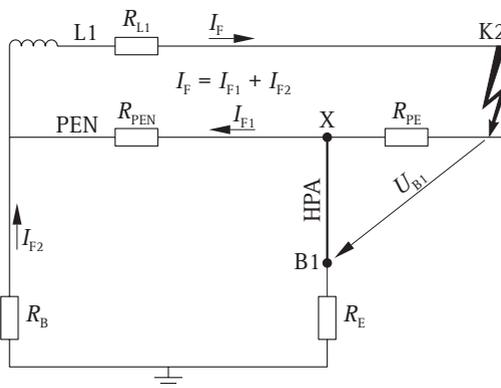
In Kapitel 5.1.2.1 dieses Buchs wurde bereits die mögliche Berührungsspannung im Fehlerfall angegeben und erläutert. Dort wurde davon ausgegangen, dass bei gleichem Leiterquerschnitt für Außen- und PEN-Leiter die berührbare Spannung im Fehlerfall maximal  $U_0/2 = 115 \text{ V}$  beträgt.

In der Praxis muss aber damit gerechnet werden, dass der PEN-Leiter an verschiedenen Stellen im System geerdet wird. Beispielsweise am Transformator-Sternpunkt und an den Haupterdungsschienen der vom Transformator versorgten Gebäude, die in der Regel je über eine eigene Erdungsanlage verfügen. Dies würde den Widerstand des Rückleiters, über den der Fehlerstrom fließt, verkleinern und damit die berührbare Spannung im Fehlerfall reduzieren.

Rechnet man jedoch überschlägig mit einem Gesamterdungswiderstand aller mitwirkenden Betriebserder (zu denen im TN-System auch die Erdungsanlagen der versorgten Gebäude gehören) von  $R_B = 1 \Omega$  und einem PEN-Leiterwiderstand zwischen dem Gebäudeanschluss (z. B. Hausanschlusskasten) und dem einspeisenden Transformator von z. B.  $20 \text{ m}\Omega$ , so ergibt sich eine Reduzierung von etwa  $1 \text{ V}$  für die an der Fehlerstelle berührbare Spannung. Selbst wenn der Widerstand des PEN-Leiters noch höher ausfällt, kann von einer tatsächlichen Reduzierung der Fehlerspannung durch die Erdung des PEN-Leiters kaum gesprochen werden.

Die eigentliche Reduzierung der Fehlerspannung bewirkt hingegen der Schutzpotentialausgleich (siehe Kapitel 5.1.2 dieses Buchs); dies wird im Bild 5.5 an einem entsprechenden Ersatzschaltbild erläutert.

Für Gleichspannungssysteme liegen unter gleichen Voraussetzungen mit ausreichenden Erdungsverhältnissen dieselben Voraussetzungen vor, sodass die Abschaltzeiten für die verschiedenen Spannungssysteme ebenfalls nach Bild 5.4 abgeschätzt werden können.



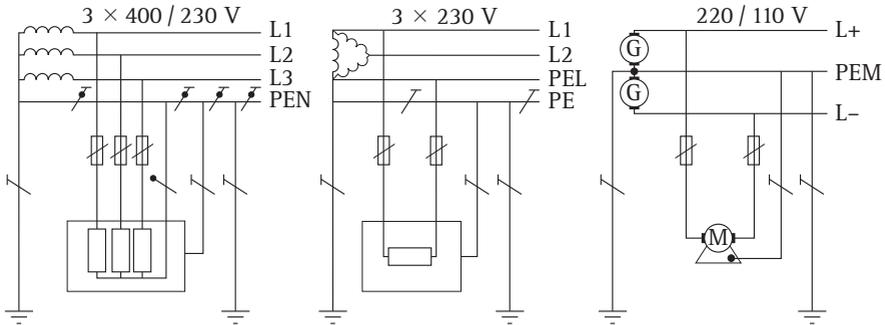
**Bild 5.5** Ersatzschaltbild der Situation bei einem Isolationsfehler bei K2 nach Bild 5.3. Die berührbare Fehlerspannung  $U_{B1}$  reduziert sich um den Betrag, den der Fehlerstrom zwischen Punkt X und dem Sternpunkt des Transformators verursacht.  $U_{B1}$  entspricht somit im Wesentlichen dem Spannungsfall, den der Fehlerstrom  $I_F$  über den Schutzleiter PE im Gebäude verursacht.

## 5.2.2 TN-System mit Überstrom-Schutzeinrichtungen

5

In jeden Außenleiter ist eine Überstrom-Schutzeinrichtung einzubauen. Eine Überstrom-Schutzeinrichtung im Neutraleiter ist zwar zulässig, aber nicht üblich. Im PEN-Leiter oder im Schutzleiter darf keinesfalls eine Überstrom-Schutzeinrichtung eingebaut werden. Ebenso darf der PEN-Leiter sowie der Schutzleiter nicht schaltbar sein.

Bild 5.6 zeigt verschiedene TN-Systeme. Im TN-C-System (Neutraleiter und Schutzleiter in einem Leiter, dem PEN-Leiter, zusammengefasst) nimmt der PEN-Leiter eine Doppelfunktion wahr. Da in diesem Fall bei einem PEN-Leiterbruch eine erhebliche Gefahr besteht, ist ein TN-C-System nur zulässig bei fest verlegten Leitungen mit Querschnitten von mindestens  $10 \text{ mm}^2$  Cu oder  $16 \text{ mm}^2$  Al.



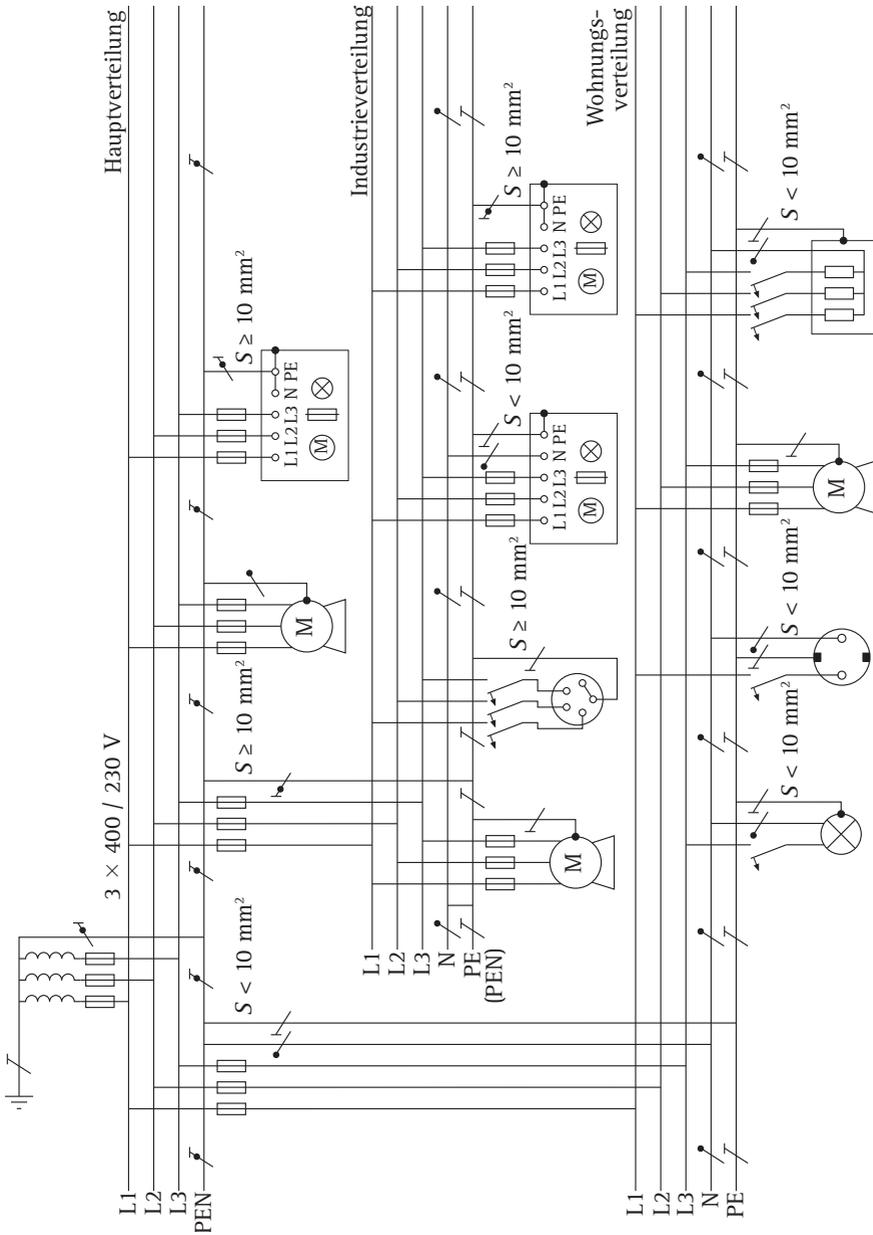
**Bild 5.6** TN-Systeme mit Überstrom-Schutzeinrichtungen

Bei beweglichen Leitungen mit größeren Querschnitten für Einspeiseleitungen von Notstromaggregaten in Niederspannungsnetzen oder für das Überbrücken herausgetrennter Netzteile in Niederspannungsfreileitungs- oder Niederspannungskabelnetzen sind die Leitungen so zu verlegen, dass sie als „fest verlegt“ angesehen werden können.

In allen anderen Fällen, also bei

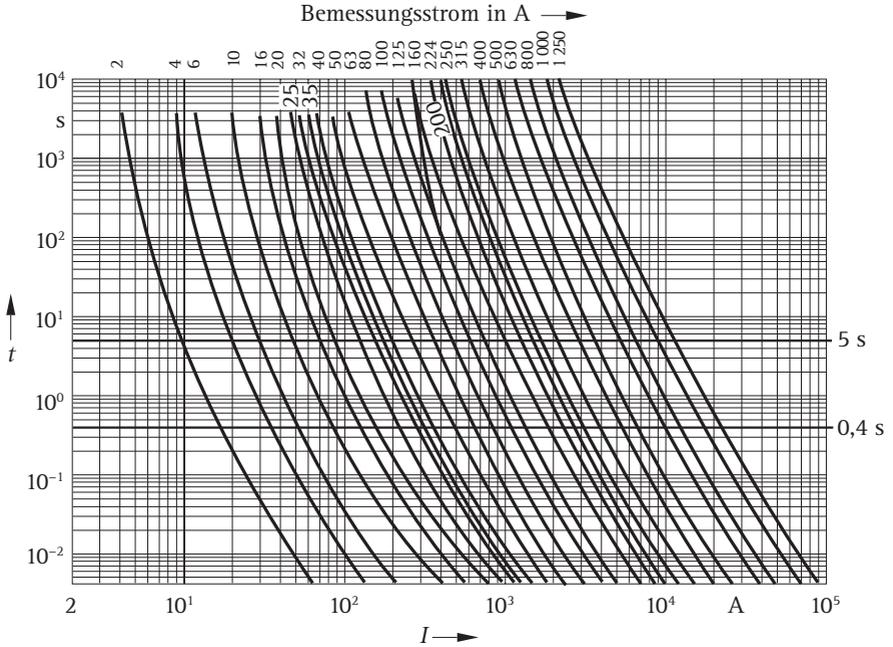
- Leiterquerschnitten  $< 10 \text{ mm}^2$  Cu und  $< 16 \text{ mm}^2$  Al und bei
- beweglichen Leitungen

ist ein TN-C-System unzulässig (Bild 5.7). Nach DIN VDE 0100-444 ist ein PEN-Leiter in einem neu zu errichtenden Gebäude überhaupt zu vermeiden. Dies gilt auch dann, wenn der Betreiber der elektrischen Anlage einen eigenen Transformator unterhält (der Netzbetreiber also lediglich eine Mittelspannungsversorgung zur Verfügung stellt), sofern in der elektrischen Anlage eine „wesentliche Anzahl“ von informationstechnischen Betriebsmitteln enthalten sind oder wahrscheinlich enthalten sein werden.

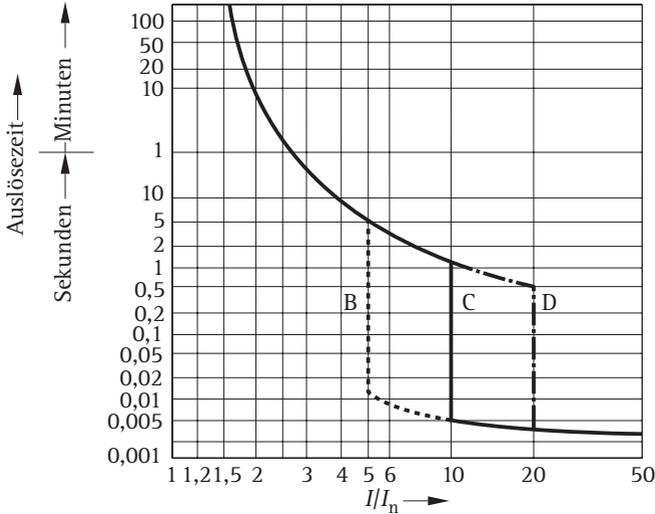


**Bild 5.7** TN-System mit TNC- und TN-S-Systemteilen (alle Querschnittangaben beziehen sich auf Kupferleiter)

5



**Bild 5.8** Strom-Zeit-Kennlinien (obere Grenzkurven) von gG- bzw. gL-Sicherungen



**Bild 5.9** Strom-Zeit-Kennlinien von LS-Schaltern.  
Gilt für LS-Schalter mit Charakteristiken B, C und D

Bei einer Verteilung mit vier Schienen (L1/L2/L3/PEN) dürfen an der PEN-Schiene wahlweise Schutzleiter, Neutralleiter und/oder PEN-Leiter angeschlossen werden. Ist die Verteilung mit fünf Schienen (L1/L2/L3/N/PE) ausgestattet, so darf an der PE-Schiene auch ein PEN-Leiter angeschlossen werden, vorausgesetzt, die PE-Schiene entspricht den Bedingungen, die an eine PEN-Schiene gestellt werden.

Die Koordinierung der Systeme nach Art der Erdverbindung und Überstrom-Schutzeinrichtungen, die durch Gl. (5.1) gegeben ist, macht es erforderlich, bei der Planung einer Anlage die Größe des „kleinsten einpoligen Kurzschlussstroms“ – künftig der Einfachheit halber nur noch „Kurzschlussstrom“ genannt – zu berechnen. Er kann in bestehenden Anlagen auch gemessen werden. Mit dem (gerechneten oder gemessenen) Kurzschlussstrom muss jetzt unter Verwendung des Strom-Zeit-Diagramms der entsprechenden Schutzeinrichtung die Abschaltzeit ermittelt werden. Die jeweils obere Grenzkurve der Kennlinien von Leitungsschutzsicherungen der Betriebsklasse gG bzw. gL ist in Bild 5.8 dargestellt. Für LS-Schalter der Charakteristiken B, C und D gibt Bild 5.9 die jeweils obere Grenzkennlinie an.

Die Berechnung des Kurzschlussstroms muss unter Beachtung von DIN EN 60909-0 (VDE 0102) „Kurzschlussströme in Drehstromnetzen – Berechnung der Ströme“ erfolgen. In Beiblatt 1 zu DIN EN 60909-0 (VDE 0102) „Kurzschlussströme in Drehstromnetzen – Beispiele für die Berechnung von Kurzschlussströmen“ sind verschiedene Beispiele gezeigt. Die Berechnung von Kurzschlussströmen ist in Anhang A (Kapitel 25.1.1) behandelt.

Häufig besteht die Aufgabe auch darin, von einem bestimmten Punkt einer bestehenden Anlage aus, deren Impedanz bekannt ist, die maximal zulässige Stromkreislänge für einen bestimmten Querschnitt zu ermitteln. Die entsprechende Berechnung ist in Anhang A (Kapitel 25.1.2) beschrieben.

### 5.2.3 TN-System mit RCD

Bei Einsatz einer RCD im TN-System (Bild 5.10) ist nach Gl. (5.1) der Strom, der das automatische Abschalten der Schutzeinrichtung in die Wege leitet, der Bemessungsdifferenzstrom der RCD ( $I_a = I_{\Delta n}$ ).

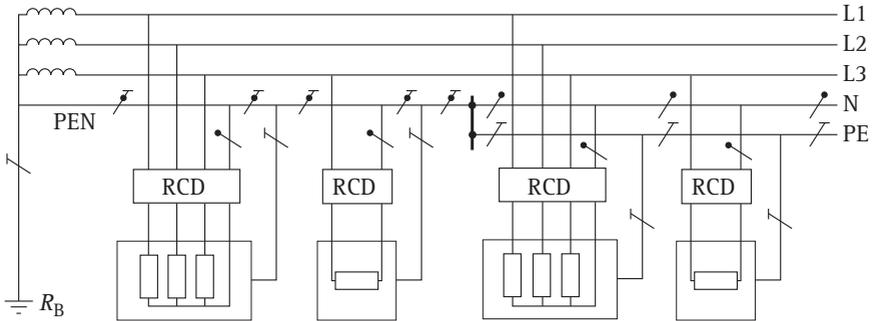
Damit gilt:

$$Z_S = \frac{U_0}{I_a} = \frac{U_0}{I_{\Delta n}} \quad (5.2)$$

Häufig taucht die Frage auf, ob für den Schutz durch automatische Abschaltung auch ein selektiver (zeitverzögerter) RCD eingesetzt werden kann. Diese RCDs werden mit einem  $\square$  gekennzeichnet, und sie dürfen Abschaltzeiten von 500 ms aufweisen. Da der Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung jedoch stets von einem widerstandslosen Körperschluss ausgeht, wird der Feh-

lerstrom im TN-System immer bedeutend höher ausfallen als der Bemessungs-differenzstrom des RCD. DIN VDE 0100-410, Abschnitt 411.4.4 gibt an, dass man davon ausgehen darf, dass der Fehlerstrom  $I_F$  mindestens folgende Größe aufweist:

$$I_F \leq 5 \cdot I_{\Delta n} \quad (5.3)$$



**Bild 5.10** TN-System mit RCDs

Bei Fehlerströmen ab dieser Größenordnung sinkt die Abschaltzeit eines RCD vom Typ S auf Werte deutlich unter 150 ms. Deshalb ist es nach DIN VDE 0100-410, Abschnitt 411.4.4 erlaubt, für den Schutz durch automatische Abschaltung auch einen selektiven RCD vorzusehen.

Es bedeuten (siehe auch Gl. (5.1)):

$Z_S$  Impedanz der Fehlerschleife in  $\Omega$

$I_{\Delta n}$  Bemessungsdifferenzstrom in A

$I_a$  Strom in A, der das automatische Abschalten bewirkt, wobei gilt:

$I_a = I_{\Delta n}$  für normale RCDs

$U_0$  Spannung gegen den geerdeten Leiter in V

Dies hat zur Folge, dass bei Nennspannung  $U_n = 230/400$  V und Bemessungsdifferenzstrom  $I_{\Delta n} = 0,5$  A der Widerstand der Fehlerschleife

$$Z_S = \frac{U_0}{I_{\Delta n}} = \frac{230 \text{ V}}{0,5 \text{ A}} = 460 \Omega$$

betragen dürfte. Auch bei einem selektiven RCD ergäbe sich noch ein genügend hoher Wert für den maximal möglichen Schleifenwiderstand, der in üblichen Anlagen nie erreicht wird. Deshalb können unter Berücksichtigung von heute üblichen Bemessungsdifferenzströmen im TN-S-System RCDs aller bekannten Typen eingesetzt werden, ohne dass die Gefahr besteht, die Abschaltzeiten für die automatische Abschaltung der Stromversorgung zu überschreiten.

RCDs können im TN-S-System in der Regel ohne Einschränkung und ohne Betrachtung der Schleifenimpedanz eingesetzt werden (Reihenschaltung von RCDs siehe Kapitel 5.3.3 und Kapitel 16.5.4.4).

Lediglich bei Steuer- und Messstromkreisen, die sehr lang sind und nur geringe Leitungsquerschnitte haben, und/oder wenn Transformatoren kleiner Leistung mit hohem Innenwiderstand verwendet werden, ist gegebenenfalls die Schleifenimpedanz zu beachten.

Aus diesem Grund wird in DIN VDE 0100-600, Abschnitt 61.3.6.1 in einer Anmerkung darauf hingewiesen, dass bei der Prüfung auf die Messung des Schleifenwiderstands verzichtet werden kann, wenn eine RCD mit einem Bemessungsdifferenzstrom von  $I_{\Delta n} \leq 500$  mA als Abschaltvorrichtung eingesetzt wurde.

## 5.2.4 Kombination von Überstrom-Schutzeinrichtungen und RCDs

In zahlreichen Stromkreisen wird bereits ein RCD gefordert, vor allem in Steckdosenstromkreisen, sofern diese von Laien benutzt werden, was (außer in elektrischen Betriebsstätten) fast immer zutrifft.

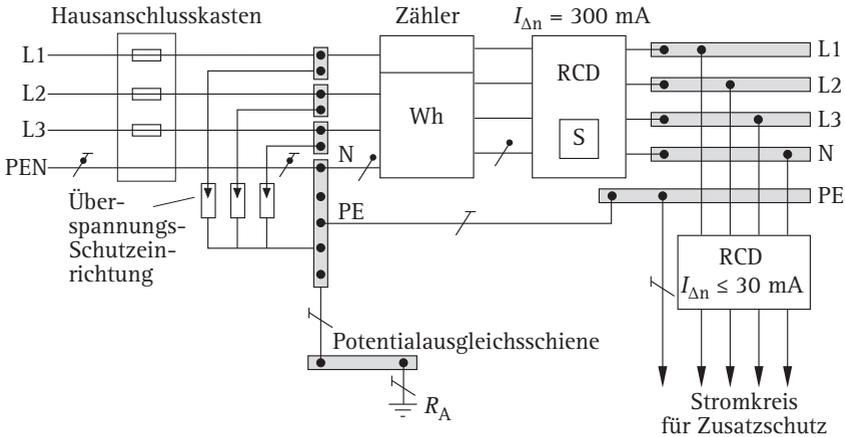
Darüber hinaus kann es erforderlich werden, ein RCD einzusetzen, wenn durch eine Überstrom-Schutzeinrichtung der Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung nicht sicher gewährleistet werden kann. Letzteres trifft vor allem dann zu, wenn durch zu hohe Schleifenwiderstände die Abschaltzeiten nach DIN VDE 0100-410, Tabelle 41.1 mit Überstrom-Schutzeinrichtungen nicht eingehalten werden. In TN-Systemen kommt dies eher selten vor; im TT-System ist dies allerdings die Regel.

Dabei ist Folgendes zu beachten: Wird der RCD lediglich deshalb eingesetzt, weil sonst die rechtzeitige Abschaltung nach DIN VDE 0100-410, Tabelle 41.1 nicht erreicht wird, bleibt die Anforderung selbstverständlich bestehen, dass eine Überstrom-Schutzeinrichtung den Schutz bei Überstrom nach DIN VDE 0100-430 sicherstellen muss.

Häufig werden RCDs jedoch nicht ausschließlich für die Einhaltung der Abschaltzeiten vorgesehen; vielmehr bieten sie darüber hinaus auch einen zusätzlichen Schutz, wie er in bestimmten Räumen und Bereichen unter Umständen ausdrücklich gefordert sein kann (siehe Kapitel 9 dieses Buchs). Dies ist vor allem bei Stromkreisen in Räumen und Bereichen der Fall, die in Normen der Gruppe 700 aus DIN VDE 0100 beschrieben werden (z. B. Badezimmer in DIN VDE 0100-701) sowie in Steckdosenstromkreisen nach DIN VDE 0100-410, Abschnitt 411.3.3.

In Gebäuden, die als TT-System betrieben werden, ist der Einsatz eines RCD aufgrund des zu geringen Fehlerstroms im Fall eines Körperschlusses die Regel. Dabei ist es sinnvoll, nur die Endstromkreise durch einen RCD mit einem Bemessungsdifferenzstrom von  $I_{\Delta n} = 30$  mA zu schützen, in denen Anforderungen

des zusätzlichen Schutzes gelten. Für die Einhaltung der Abschaltzeiten in allen übrigen Bereichen kann dann eingangsseitig ein selektiv (zeitverzögernd) wirkender RCD vorgesehen werden, der einen höheren Bemessungsdifferenzstrom aufweist (siehe zum Thema „Reihenschaltung von RCDs“ Kapitel 5.3.3 sowie Kapitel 16.5.4.4 in diesem Buch) Um zugleich auch einen gewissen Brandschutz zu gewährleisten, sollte der Bemessungsstrom jedoch nicht größer gewählt werden als  $I_{\Delta n} = 300 \text{ mA}$ . Näheres hierzu beschreiben Kapitel 16.5.4.6 und Kapitel 22.14 (siehe auch Bild 5.11).

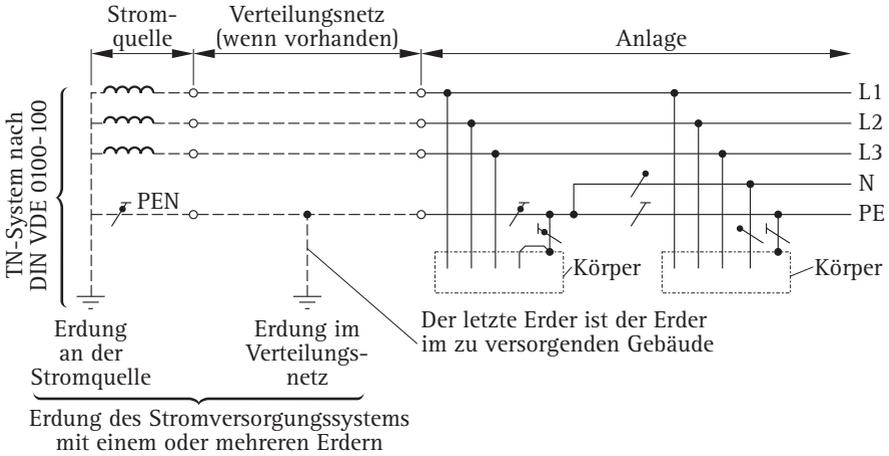


**Bild 5.11** Schutzsystem, bestehend aus Überstrom-Schutzeinrichtungen, Überspannungsschutzeinrichtung und zwei Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCDs), um den Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung, den zusätzlichen Schutz, Belange des Brandschutzes sowie des Überspannungsschutzes zu gewährleisten

### 5.2.5 Notwendigkeit eines Erders im TN-System

Anforderungen an Erdungssysteme sind vor allem in DIN VDE 0100-540 zu finden. Dort wird für alle neuen Gebäude eine Erdungsanlage nach DIN 18014 gefordert. Diese Anforderungen werden im Kapitel 10 dieses Buchs näher beschrieben.

Allerdings wird in der zuvor erwähnten Norm auch gesagt, dass eine elektrische Anlage nicht zwingend einen Erder benötigt, und tatsächlich trifft dies für das häufigste Netzsystem in Deutschland zu (siehe hierzu Kapitel 4.2.3.1 dieses Buchs). In einem TN-System gibt es nach DIN VDE 0100-100, Abschnitt 312.2.1 auch gar keinen Anlagenerder. Vielmehr ist die Erdungsanlage des Gebäudes im TN-System Teil des Betriebserders (siehe Bild 5.12) und gehört deshalb physikalisch gesehen zum Versorgungsnetz, auch wenn er tatsächlich durch den Ort seiner Errichtung zur elektrischen Anlage im Gebäude gehört.



**Bild 5.12** Darstellung eines TN-C-S-Systems nach DIN VDE 0100-100

Die Frage, die sich hier stellt, ist also: Benötigt eine elektrische Anlage einen Erder, wenn es um den Schutz gegen elektrischen Schlag geht?

Für diese Frage muss zunächst der Schutz gegen elektrischen Schlag, wie er in Normen der Reihe DIN VDE 0100 angeführt wird, genauer beschrieben werden. Bild 5.1 zeigt den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Vorkehrungen zu den übergeordneten Schutzmaßnahmen. Danach besteht die typische Schutzmaßnahme im TN- und TT-System (Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung) aus zwei Schutzvorkehrungen: Basisschutzvorkehrung und Fehlerschutzvorkehrung. Mit den bekannten Abweichungen gilt dies natürlich auch für das IT-System.

Bei der Fehlerschutzvorkehrung wird der „Schutz durch automatische Abschaltung im Fehlerfall“ hervorgerufen sowie durch die zusätzliche Wirkung des Schutzpotentialausgleichs über die Haupterdungsschiene (siehe Kapitel 5.1.2).

Um den „Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung“ korrekt ausführen und seine Wirkung anschließend überprüfen zu können, gibt DIN VDE 0100-410, Abschnitt 411.4.4 hierfür folgende Beziehung an:

$$Z_S \leq \frac{U_0}{I_a} \tag{5.4}$$

In dieser Beziehung wird mit  $Z_S$  bei einem TN-System keinesfalls ein Erdungswiderstand eingeschlossen. Vielmehr werden mit  $Z_S$  die Leitungswiderstände der beteiligten Außenleiter sowie des Schutzleiters und der Innenwiderstand der Stromquelle zusammengefasst.

Auch der Schutzpotentialausgleich über die Haupterdungsschiene benötigt keinen Erder, denn er sorgt lediglich dafür, dass das Potential der äußeren Erde nicht ins Gebäude gelangt (siehe Kapitel 5.1.2).

5

Die Erdungsanlage in den versorgten Gebäuden übernimmt im TN-System die Funktion, in Summe den Widerstand des Betriebserders  $R_B$  im Versorgungsnetz zu reduzieren, damit die Bedingung nach DIN VDE 0100-410, Abschnitt 411.4.1 eingehalten werden kann.

Dieser Abschnitt 411.4.1 sagt aus, dass die Erdung in der elektrischen Anlage bei einem TN-System von der zuverlässigen und wirksamen Verbindung des PEN-Leiters oder Schutzleiters mit Erde abhängt. Und weiter heißt es, dass diese Bedingung bei einem öffentlichen Versorgungssystem in der Verantwortlichkeit des Verteilungsnetzbetreibers liegt.

Für Deutschland wurde diese Anforderung konkretisiert, indem sie durch einen rein national gültigen Anforderungstext erläutert wird. Danach wird die zuvor erwähnte Anforderung aus Abschnitt 411.4.1 erfüllt, wenn die Bedingung eingehalten wird, die durch Gl. (5.5) vorgegeben wird. Im nachfolgenden Kapitel 5.2.6 dieses Buchs wird dies näher erläutert.

$$\frac{R_B}{R_E} \leq \frac{50 \text{ V}}{U_0 - 50 \text{ V}} \quad (5.5)$$

Auch in Gl. (5.5) ist  $R_B$  der Betriebserder die Summe aller parallelen Erder (Erder des Transformatorsternpunkts und Erder der durch ihn versorgten elektrischen Anlagen).  $R_E$  ist der kleinste Widerstand in Ohm eines fremden leitfähigen Teils, das sich in Kontakt mit Erde befindet und nicht mit einem Schutzleiter verbunden ist.

Es wird angenommen, dass dieses fremde leitfähige Teil aus irgendeinem Grund mit einem Außenleiter in Kontakt kommen kann. Dabei fließt ein Fehlerstrom über  $R_E$  zur Erde und weiter über  $R_B$  zurück zur Stromquelle. Die Spannung, die durch diesen Strom über  $R_B$  entsteht, liegt im gesamten Netzsystem zwischen Schutzleiter und Erde an. Die Einhaltung der Gl. (5.5) soll gewährleisten, dass diese Spannung nicht größer wird als 50 V. In älteren Normen war in diesem Zusammenhang mit Bezug auf die Gl. (5.5) von der „Spannungswaage“ die Rede. Näheres hierzu wird im nachfolgenden Kapitel 5.2.6 erläutert.

Im Innern des Gebäudes soll durch den Schutzpotentialausgleich über die Haupterdungsschiene ein solches fremdes leitfähiges Teil nicht vorhanden sein (siehe Kapitel 5.1.2 dieses Buchs). Das gilt jedoch nicht für den Außenbereich; hier darf nach der Anforderung der Spannungswaage ein Schluss zwischen einem Außenleiter und einem leitfähigen Gegenstand, der mit Erde in Verbindung steht, keine gefährliche Spannungsanhebung des Schutzleiters entstehen. Erreicht wird dies dadurch, dass  $R_B$  einen möglichst kleinen Wert annimmt. Dies kann jedoch nur der Netzbetreiber gewährleisten. Durch die Parallelschaltung der Erdungsanlagen bei den mit elektrischer Energie versorgten Verbraucheranlagen wird in Summe der

Erdungswiderstand  $R_B$  so gering, dass man die Anforderung der Spannungswaage als erfüllt betrachten kann.

Für die Erdungsanlage gilt zusätzlich, dass er durch den intensiven Kontakt mit dem Gebäudefundament physikalisch betrachtet zusätzlich eine Art Potentialsteuerung bewirkt, die zwar nicht in der Norm direkt gefordert, aber selbstverständlich gerne in Kauf genommen wird.

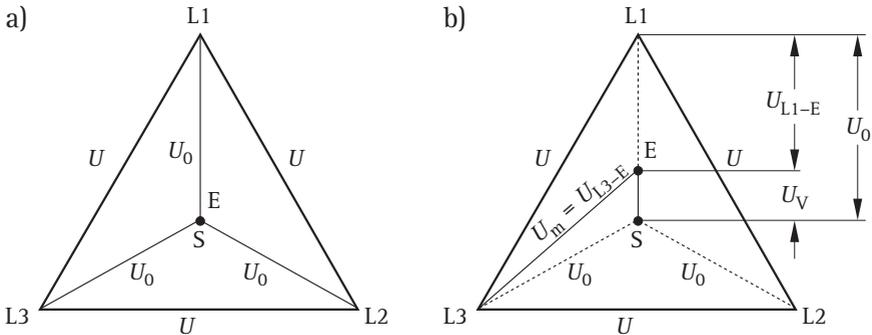
Eine weitere Notwendigkeit kann indirekt abgeleitet werden, wenn man bedenkt, dass sofort bei Neuerrichtung oder zu einem späteren Zeitpunkt eine Blitzschutzanlage errichtet werden soll, die einen Erder dringend benötigt.

Mit anderen Worten: In einem TN-System benötigt man tatsächlich nicht notwendigerweise einen Erder, wenn es um den Schutz gegen elektrischen Schlag geht. Nur durch Einbeziehung der zuvor erwähnten Spannungswaage sowie wegen Anforderungen einer eventuell benötigten Blitzschutzanlage kann von einer gewissen Notwendigkeit gesprochen werden. Weitere Einzelheiten werden im Kapitel 10.1 dieses Buchs beschrieben.

### 5.2.6 Spannungsbegrenzung bei Erdschluss eines Außenleiters – DIN VDE 0100-410, Abschnitt 411.4.1

Die in Verbraucheranlagen vorhandenen Geräte sind in der Regel für eine Reihenspannung von 250 V gebaut und besitzen demnach eine für diese Spannung ausgelegte Isolierung gegen Erde. Dies bedeutet, dass verhindert werden muss, dass die Spannung jedes beliebigen Außenleiters gegen Erde auf über 250 V ansteigt.

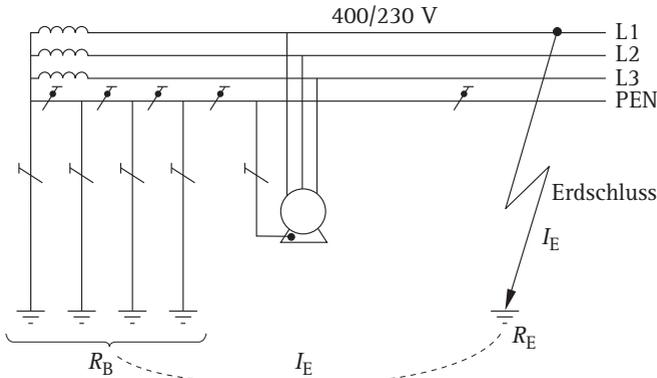
In einem ungestörten symmetrischen Drehstromsystem bilden die drei Außenleiter ein Spannungsdreieck, in dessen Mitte der Sternpunkt S liegt (Bild 5.13 a).



**Bild 5.13** Spannungsdiagramme im Drehstromsystem  
 a) Spannungsdreieck im ungestörten System  
 b) Potentialverschiebung der Außenleiter L1, L2 und L3 sowie des Sternpunkts S bei Erdschluss in Außenleiter L1

Da dieser Mittelpunkt geerdet ist, hat er im ungestörten Netz das Erdpotential E bzw. das Potential null. Die Spannung jedes Außenleiters gegen diesen Mittelpunkt, also gegen Erde bzw. den PEN-Leiter im TN-System oder Neutralleiter im TT-System, ist  $U_0 = U/\sqrt{3}$ . In einem geerdeten 400-V-Drehstromsystem beträgt  $U_0 = 230$  V.

Im Erdschlussfall (Bild 5.14) wird durch den Erdschlussstrom  $I_E$  am Betriebserder  $R_B$  ein Spannungsfall  $U_V$  (zugleich auch Erderspannung an  $R_B$ ) auftreten. Dadurch ändern sich die Potentiale der Außenleiter L1, L2 und L3 sowie das Potential des Sternpunkts S gegenüber dem Punkt E, der als unveränderlich angesehen werden kann. Die Lage des Sternpunkts im Spannungsdreieck ist durch die Einspeisung (Transformator, Generator) vorgegeben (Bild 5.13 b). Die Spannungen der Außenleiter gegen den PEN-Leiter bzw. Neutralleiter bleiben also gleich, während sich die Spannungen L1, L2 und L3 gegen Erde (Punkt E) verändern und von  $U_0$  abweichen. Der Sternpunkt S, d. h. der PEN-Leiter bzw. der Neutralleiter, nimmt gegen Erde (Punkt E) die Spannung  $U_V$  an, die dem Abstand der Punkte von S zu E entspricht. Im TN-System darf diese Spannung den Grenzwert der zulässigen Berührungsspannung  $U_L$  nicht überschreiten. Die Abweichung des Sternpunkts S vom Erdpotential hängt dabei vom Verhältnis der Impedanzen des Betriebserders  $R_B$  bzw. aller als Betriebserder zusammenwirkenden Erder und der Impedanz des Erdschlusses  $R_E$  ab.



**Bild 5.14** Erdschluss in einem Drehstromnetz 400/230 V

Bei einem geerdeten System muss also in Kauf genommen werden, dass bei einem Erdschluss eines Außenleiters zwischen dem PEN-Leiter bzw. Neutralleiter und der Erde eine Spannung auftritt und die Spannungen der Außenleiter gegen Erde nicht mehr der Spannung  $U_0$  entsprechen. Damit die Spannung zwischen den Außenleitern und Erde in zulässigen Grenzen bleibt (250 V), soll im TN-System der Gesamterdungswiderstand  $R_B$  möglichst niedrig sein. Die Praxis hat hier gezeigt, dass ein  $R_B \leq 2 \Omega$  ausreichend klein ist.

Wenn schlechte Bodenverhältnisse vorliegen (hoher spezifischer Widerstand des Erdbodens), ist durch Anwendung der „Spannungswaage“ ein bestimmtes, fest vorgegebenes Verhältnis zwischen Gesamterdungswiderstand und Einzelerdungswiderstand einzuhalten. Dabei gilt die Beziehung:

$$\frac{R_B}{R_E} \leq \frac{U_L}{U_0 - U_L} \quad (5.6)$$

Gl. (5.6) ist die allgemeine Form der Gl. (5.5) aus dem vorherigen Kapitel 5.2.5 mit:

$R_B$  Gesamterdungswiderstand aller Betriebserder

$R_E$  angenommener kleinster Erdungswiderstand der nicht mit einem Schutzleiter verbundenen leitfähigen Teile, über die ein Erdschluss entstehen kann

$U_0$  Nennspannung gegen geerdete Leiter

$U_L$  vereinbarte Grenze der dauernd zulässigen Berührungsspannung

(Die Bezeichnung  $U_L$  ist heute nicht mehr üblich, wird aber hier wegen der technisch korrekten Darstellung noch verwendet.)

Bei der Anwendung der Spannungswaage wird davon ausgegangen, dass das Verhältnis zwischen Gesamterdungswiderstand und kleinstem Einzelwiderstand einen bestimmten Wert nicht überschreiten darf. Nach Gl. (5.6) gilt, mit  $U_L = 50 \text{ V}$  und wenn  $U_0 = 230 \text{ V}$  gesetzt wird:

$$\frac{R_B}{R_E} \leq \frac{U_L}{U_0 - U_L} \leq \frac{50 \text{ V}}{230 \text{ V} - 50 \text{ V}} \leq \frac{1}{3,6}$$

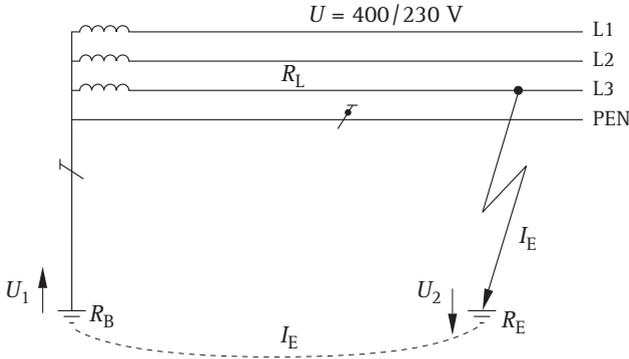
Hieraus folgt:

$$R_E \geq 3,6 R_B \quad (5.7)$$

Das heißt, es darf bei einem Gesamterdungswiderstand von  $2 \Omega$  kein kleinerer Einzelerder als  $3,6 \cdot 2 \Omega = 7,2 \Omega$  im Netz vorhanden sein, der nicht mit dem PEN-Leiter (TN-System) verbunden ist. Bei der sich so einstellenden Spannungsaufteilung wird der überwiegende Teil der Spannung  $U_2$  an der Fehlerstelle  $R_E$  abfallen, und an  $R_B$  werden nur Werte auftreten, die nicht über der dauernd zulässigen Berührungsspannung  $U_L$  liegen ( $U_L \leq U_1$ ). Die Verhältnisse sollen durch Bild 5.15 verdeutlicht werden. Damit wird auch die Forderung für das TN-System begründet, wonach alle guten Erder an den PEN-Leiter anzuschließen sind.

Der Widerstand des fehlerhaften Außenleiters  $L_3$  wird mit  $R_L = 0,3 \Omega$  angenommen. Bei  $R_B = 2 \Omega$  und  $R_E = 7,2 \Omega$  ergibt sich ein Erdschlussstrom von:

$$I_E = \frac{U_0}{R_{\text{ges}}} = \frac{U_0}{R_B + R_E + R_L} = \frac{230 \text{ V}}{2 \Omega + 7,2 \Omega + 0,3 \Omega} = 24,21 \text{ A}$$



**Bild 5.15** Verhältnis von  $R_B/R_E$

Die Spannung, die sich an den beiden Erdern  $R_B$  und  $R_E$  aufbaut, ist damit:

$$U_1 = R_B \cdot I_E \quad \text{und} \quad U_2 = R_E \cdot I_E$$

oder über die Gleichung der Spannungsaufteilung berechnet:

$$U_1 = U_0 \frac{R_B}{R_{\text{ges}}} = 230 \text{ V} \frac{2 \Omega}{9,5 \Omega} = 48,4 \text{ V}$$

$$U_2 = U_0 \frac{R_E}{R_{\text{ges}}} = 230 \text{ V} \frac{7,2 \Omega}{9,5 \Omega} = 174,3 \text{ V}$$

Die Spannung an der Fehlerstelle ist natürlich sehr hoch, aber am Betriebserder, der mit dem PEN-Leiter verbunden ist, liegt die Spannung unter 50 V.

Bei schlechten Erdungsverhältnissen, also z. B. bei  $R_B = 10 \Omega$ , und einem  $R_E = 3,6 \cdot 10 \Omega = 36 \Omega$ , ergeben sich bei  $R_L = 0,3 \Omega$ :

$$I_E = 4,97 \text{ A}; \quad U_1 = 49,7 \text{ V}; \quad U_2 = 178,8 \text{ V}$$

Die Spannungsaufteilung in  $U_1$  und  $U_2$  soll an einem konstanten Betriebserdungswiderstand  $R_B = 2 \Omega$  und einem variablen Erdungswiderstand der Fehlerstelle  $R_E = 0 \Omega$  bis  $16 \Omega$  untersucht werden. Um zu zeigen, dass der Leitungswiderstand bis zur Fehlerstelle nur unwesentlich auf die Spannungsverteilung Einfluss hat, wurde für  $R_L$  mit  $0 \Omega$  (theoretischer Wert);  $0,3 \Omega$ ;  $0,6 \Omega$  und  $1,0 \Omega$  gerechnet. Das Ergebnis zeigt Bild 5.16, wobei zu erkennen ist, dass bei  $R_E \geq 7,2 \Omega$  die Spannung  $U_1$  immer unter 50 V liegt.

Die Betrachtung der Verhältnisse im Spannungsdreieck zeigt, dass die Sternpunktverlagerung nur in geringerem Maße zulässig ist, wenn die Spannung Außenleiter gegen Erde nicht über 250 V ansteigen soll. Bild 5.17 zeigt, dass die zulässige Spannung des Sternpunkts gegen Erde nach folgender Beziehung ermittelt werden kann:

$$U_V = \sqrt{U_m^2 - \left(\frac{U}{2}\right)^2} - \sqrt{U_0^2 - \left(\frac{U}{2}\right)^2} \tag{5.8}$$

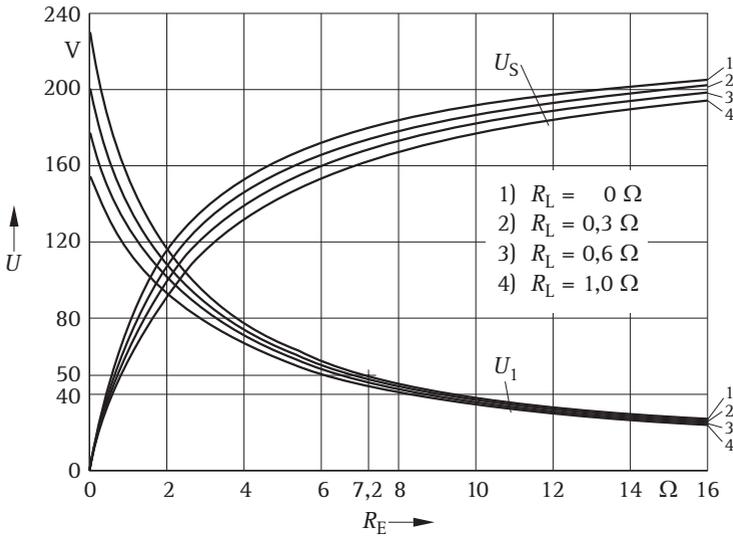
Es bedeuten:

$U_V$  Spannung des Sternpunkts gegen Erde

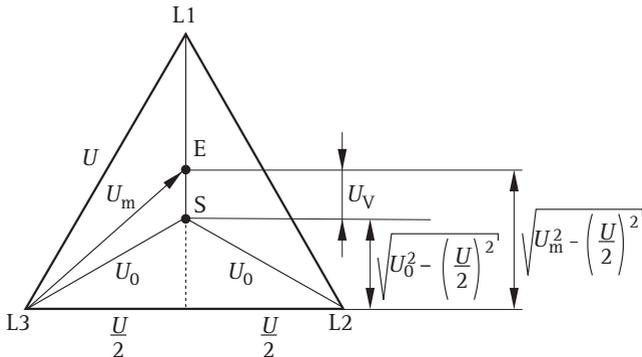
$U$  Außenleiterspannung

$U_0$  Spannung Außenleiter gegen Erde

$U_m$  höchste Spannung, die mit Rücksicht auf die Isolation noch zulässig ist



**Bild 5.16** Spannungsverteilung an  $R_B$  und  $R_E$



**Bild 5.17** Spannung des Sternpunkts gegen Erde bei Erdschluss des Außenleiters L1

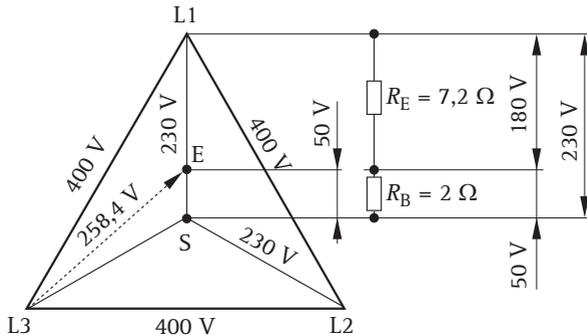
Für ein 230/400-V-Netz und  $U_m = 250$  V ergibt sich eine zulässige Spannung des Sternpunkts gegen Erde von:

5

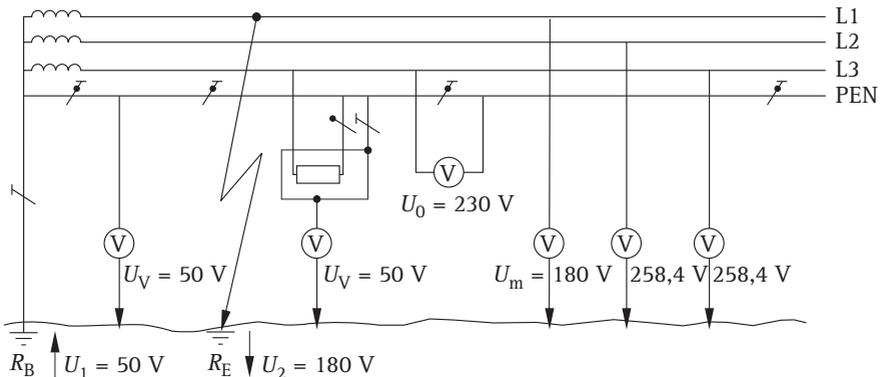
$$U_V = \sqrt{(250 \text{ V})^2 - (200 \text{ V})^2} = \sqrt{(230 \text{ V})^2 - (200 \text{ V})^2} = 36,4 \text{ V}$$

Verursacht also der Fehlerstrom, der über die Betriebserdung fließt, einen Spannungsfall, der größer ist als  $U_V = 36,4$  V, dann wird die Spannung, mit der die Isolation der Betriebsmittel gegen Erde beansprucht wird, größer werden als 250 V. Bei  $U_V = U_L = 50$  V, was zulässig ist, wird  $U_m = 258,4$  V, eine Überbeanspruchung, die noch vertretbar ist. Auch früher wurde bei einer zulässigen Berührungsspannung von 65 V und einer Netzspannung von 220/380 V mit  $U_m = 258,9$  V ein Wert in gleicher Größenordnung toleriert.

Mit den gezeigten Verhältnissen der Spannungswaage mit  $R_E \geq 3,6 R_B$  und einer Spannung des Sternpunkts gegen Erde von  $U_V = U_L \leq 50$  V wurden praxisgerechte Festlegungen getroffen. Bild 5.18 zeigt die Zusammenhänge im Spannungsdreieck, Bild 5.19 die Zusammenhänge der Spannungen im System.



**Bild 5.18** Spannung des Sternpunkts gegen Erde bei Erdschluss des Außenleiters L1



**Bild 5.19** Spannungen im System bei Erdschluss von Außenleiter L1

Diese Überlegungen gelten – wie schon erwähnt – nur für TN- und TT-Systeme. Nach VDE 0100-410 ist die Anwendung der Spannungswaage allerdings nur im TN-System zu finden, ohne dass dort der Begriff „Spannungswaage“ im Text erwähnt wird (siehe VDE 0100-410, Abschnitt 411.4). An dieser Stelle muss betont werden, dass die Einhaltung der Gl. (5.6) sowie von Gl. (5.7) nicht in die Verantwortung des Errichters fällt, da dieser kaum Möglichkeiten hat, den Betriebserder zu beeinflussen. In der Norm VDE 0100-410, Abschnitt 411.4.1 wird deshalb ausdrücklich Folgendes festgelegt:

*„Wo die Erdung durch ein öffentliches oder anderes Versorgungssystem vorgesehen wird, liegen die notwendigen Bedingungen außerhalb der elektrischen Anlage in der Verantwortlichkeit des Verteilnetzbetreibers.“*

In IT-Systemen mit oder ohne Neutralleiter nimmt im Erdschlussfall der erdschlussbehafte Außenleiter das Erdpotential an. Deshalb ist in ungeerdeten Netzen die Isolierung Außenleiter gegen Erde nach der Außenleiterspannung zu bemessen.

## 5.3 Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung im TT-System (DIN VDE 0100-410, Abschnitt 411.5)

### 5.3.1 Allgemeine Anforderungen

Für das TT-System sind als Schutzeinrichtungen zugelassen:

- Überstrom-Schutzeinrichtungen
- RCDs

Voraussetzung in einem TT-System ist die Erdung des Sternpunkts des Transformators oder Generators. Ist kein Sternpunkt vorhanden, dann kann auch ein Außenleiter geerdet werden. Die Körper aller zu schützenden Betriebsmittel sind entweder direkt zu erden (z. B. natürlicher Erder) oder über Schutzleiter mit einem Erder zu verbinden. Dabei ist noch zu beachten, dass:

- alle Körper, die durch dieselbe Schutzeinrichtung geschützt werden, an einen gemeinsamen Erder angeschlossen werden
- alle gleichzeitig berührbaren Körper an denselben Erder angeschlossen werden müssen

Für die Bemessung des Erders, mit dem die Körper zu verbinden sind, gilt bei der Verwendung von Überstrom-Schutzeinrichtungen für den Fehlerschutz (Schutz bei indirektem Berühren):

$$Z_S \cdot I_a \leq U_0 \quad (5.9)$$

Beim Einsatz von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCDs) für den Fehlerschutz (Schutz bei indirektem Berühren) gilt die Beziehung:

$$R_A \cdot I_a \leq 50 \text{ V} \quad (5.10)$$

In den Gln. (5.9) und (5.10) sind:

$Z_S$  die Impedanz der Fehlerschleife in  $\Omega$ , bestehend aus den Impedanzen:

- der Stromquelle
- dem Außenleiter bis zum Fehlerort
- dem Schutzleiter der Körper
- dem Erdungsleiter
- dem Anlagenerder
- dem Erder der Stromquelle

$I_a$  Strom in A, der das automatische Abschalten mit Überstrom-Schutzeinrichtungen bewirkt, wobei für Endstromkreise mit fest angeschlossenen Verbrauchsmitteln mit Nennstrom bis einschließlich 32 A und alle anderen Endstromkreise mit maximal 63 A Nennstrom folgende maximalen Abschaltzeiten bei Wechselspannung einzuhalten sind:

- 0,3 s bei  $50 \text{ V} < U_0 \leq \text{AC } 120 \text{ V}$
- 0,2 s bei  $120 \text{ V} < U_0 \leq \text{AC } 230 \text{ V}$
- 0,07 s bei  $230 \text{ V} < U_0 \leq \text{AC } 400 \text{ V}$
- 0,04 s bei  $U_0 > \text{AC } 400 \text{ V}$

Bei Gleichspannung sind folgende Abschaltzeiten einzuhalten:

- 0,4 s bei  $120 \text{ V} < U_0 \leq \text{DC } 230 \text{ V}$
- 0,2 s bei  $230 \text{ V} < U_0 \leq \text{DC } 400 \text{ V}$
- 0,1 s bei  $U_0 > \text{DC } 400 \text{ V}$

Für Verteilerstromkreise und Endstromkreise mit höheren Nennströmen als die o. g. ist eine maximale Abschaltzeit von 1 s zulässig.

Der Fehlerstrom ist höher als der zum Auslösen notwendige Bemessungsdifferenzstrom von  $2 I_{\Delta n}$ , und damit wird die geforderte Abschaltzeit sowohl bei normalen als auch bei selektiven (zeitverzögerten) RCDs eingehalten. Bei Leistungsschaltern mit Fehlerstromschutz (CBRs und MRCDs) ist darauf zu achten, dass die eingestellte Auslösezeit der geforderten Abschaltzeit entspricht.

$R_A$  Summe der Widerstände in  $\Omega$  des Erders und des Schutzleiters der Körper  
Anmerkung: Wenn  $R_A$  nicht bekannt ist, darf er durch  $Z_S$  ersetzt werden.

$U_0$  Nennspannung in V der Außenleiter gegen Erde

Aus Bild 3.8 in diesem Buch geht klar hervor, dass im Fall eines Körperschlusses der Anlagenerder  $R_A$  und der Betriebserder  $R_B$  innerhalb des Fehlerstromkreises in Reihe liegen. Da der Betriebserder üblicherweise sehr viel niederohmiger ist als der Anlagenerder, bedeutet dies, dass im Fehlerfall über den Anlagenerder der

Hauptteil der Netzspannung abfällt (siehe Kapitel 5.1.2.1 in diesem Buch). Aus diesem Grund sind die geforderten Zeiten für die automatische Abschaltung nach VDE 0100-410, Tabelle 41.1 im TT-System auch deutlich kürzer als im TN-System.

Wenn in einem TT-System die Abschaltung allerdings durch eine Überstrom-Schutzeinrichtung erfolgt und zudem alle fremden leitfähigen Teile des Gebäudes über die Haupterdungsschiene in den Schutzpotentialausgleich einbezogen wurden, dürfen die Abschaltzeiten, die für ein TN-System vorgesehen sind (siehe Kapitel 5.2.1 dieses Buchs), verwendet werden.

Sofern eine Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD) als Abschalteneinrichtung vorgesehen wurde, muss bei der automatischen Abschaltung Gl. (5.10) beachtet werden. Die Grenze von  $U_L = 50\text{ V}$  wurde hier eingeführt, um bei der Berechnung des notwendigen Anlagenerders  $R_A$  nicht zu extrem hohen Werten zu kommen. Aber auch mit dieser Verschärfung ist davon auszugehen, dass bei einem tatsächlichen Fehler mit der Spannung  $U_0 = 230\text{ V}$  ein Fehlerstrom fließt, der deutlich höher ist als  $5 \cdot I_{\Delta n}$ , sodass die Einhaltung der geforderten Abschaltzeit in jedem Fall sichergestellt ist. Selbst bei Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCDs) mit Bemessungsdifferenzströmen von  $1000\text{ mA}$  wäre die Einhaltung der Abschaltbedingungen nach VDE 0100-410 gewährleistet, und dies gilt auch für zeitverzögerte Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCD Typ S), da bei ihnen bereits bei einem Fehlerstrom von  $2 \cdot I_{\Delta n}$  die Abschaltung rechtzeitig erfolgen würde.

Bezüglich des Gesamterdungswiderstands eines Netzes ist in VDE 0100-410 keine Aussage getroffen.

### 5.3.2 TT-System mit Überstrom-Schutzeinrichtungen

Die Abschaltzeiten im TT-System bei Anwendung von Überstrom-Schutzeinrichtungen sind in Kapitel 5.3.1 beschrieben. Ein TT-System mit Überstrom-Schutzeinrichtungen zeigt Bild 5.20.

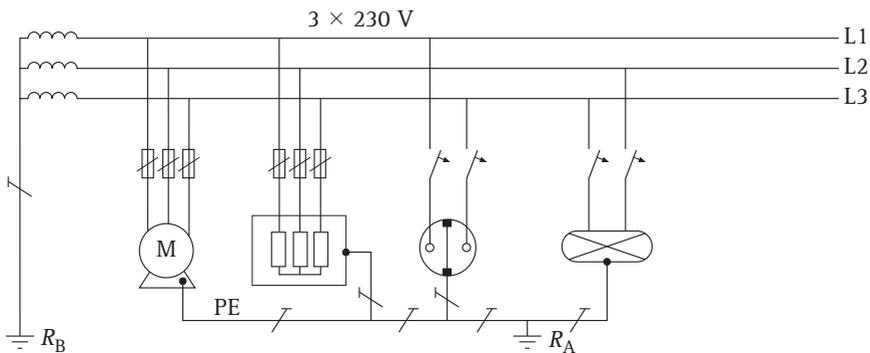
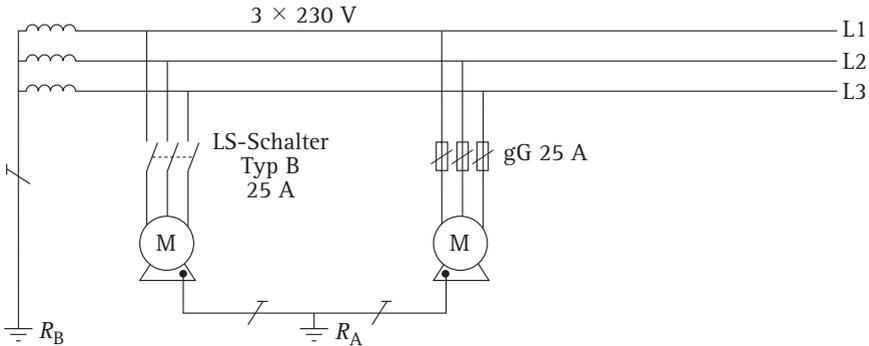


Bild 5.20 TT-System mit Überstrom-Schutzeinrichtungen

## Beispiel

Wie in Bild 5.21 dargestellt, sollen zwei Geräte im TT-System mit Überstrom-Schutzeinrichtungen geschützt werden. Wie ist der gemeinsame Schutzerder zu bemessen?



**Bild 5.21** Beispiel für Abschaltung im TT-System

Aus den Angaben in Bild 5.8 und Bild 5.9 können die für die Abschaltzeiten der Überstrom-Schutzeinrichtung erforderlichen Auslöseströme ( $I_a$ ) ermittelt werden. Für beide Schutzeinrichtungen gilt nach DIN VDE 0100-410, Tabelle 41.1 die maximale Abschaltzeit von 0,2 s. Danach ergibt sich:

- LS-Schalter, 25 A, Typ B – 125 A ( $5 \cdot I_n$ )
- Schmelzsicherung, gG –  $\approx 270$  A

Der Maximalwert des Schleifenwiderstands  $Z_S$  kann wie folgt berechnet werden:

$$Z_S = \frac{U_0}{I_a}$$

$$\Rightarrow \text{für den LS-Schalter: } \frac{230 \text{ V}}{125 \text{ A}} = 1,84 \Omega$$

$$\Rightarrow \text{für die Schmelzsicherung: } \frac{230 \text{ V}}{270 \text{ A}} = 0,85 \Omega$$

In diesem Maximalwert für  $Z_S$  ist der Anlagenerder der größte Faktor. Selbst wenn man den Betriebserder  $R_B$  (der im TT-System immer Teil des Schleifenwiderstands ist) einschließlich der Widerstände für die beteiligten Kupferleitungen mit nur 1  $\Omega$  veranschlagen würde, bliebe beim LS-Schalter für den Anlagenerder nur 0,84  $\Omega$ , und für die Schmelzsicherung wäre der Wert erst gar nicht erfüllbar. Deshalb wird im TT-System so gut wie immer ein RCD für den Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung notwendig.