

5 Aufbau und Wirkweise von Schutzmaßnahmen in ungeerdeten IT-Systemen

Die Anwendung von ungeerdeten Stromversorgungen (IT-Systemen) ist steigend. Diese Tendenz ist durch eine Reihe von Vorteilen dieser Netzform ausgelöst, wobei der Weiterbetrieb von angeschlossenen Betriebsmitteln im ersten Fehlerfall für viele Anwendungsfälle eine wichtige, besonders wirtschaftliche Bedeutung erlangt hat. Auch die Möglichkeit der automatischen Isolationsfehlerort-Erkennung und der damit verbundenen hohen Wartungsfreundlichkeit steigert die Beliebtheit. Haupteinsatzgebiete sind sensible Stromversorgungsanlagen der Industrie, im Bergbau, in der Marine, in Photovoltaikanlagen, Elektromobilität und in medizinisch genutzten Bereichen.

IT-Systeme sind in der Norm DIN VDE 0100-410 (**VDE 0100-410**):2007-06 beschrieben. Im IT-System ist der Einbau von Isolationsüberwachungsgeräten grundsätzlich gefordert. Die Anforderungen an Isolationsüberwachungsgeräte sind in DIN EN 61557-8 (**VDE 0413-8**) zu finden.

Unbemerkt hat sich das IT-System mit zusätzlichem Schutzpotentialausgleich (ZPA) – jahrzehntelang Schutzleitungssystem genannt – zu einer neu zu betrachtenden Art der Stromversorgung gewandelt. Der zusätzliche Schutzpotentialausgleich ist nun nicht mehr grundsätzlich, die Isolationsüberwachung dagegen ausdrücklich, gefordert. Nur dann, wenn in IT-Systemen die Abschaltbedingungen bei Verwendung von Überstrom-Schutzeinrichtungen nicht erfüllt werden können, muss ein zusätzlicher Schutzpotentialausgleich installiert werden. Zusätzlich zum Isolationsüberwachungsgerät ist auch der Schutz durch eine Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD) für jedes Verbrauchsmittel möglich. In den zusätzlichen Schutzpotentialausgleich müssen alle gleichzeitig berührbaren Körper fest angebrachter Betriebsmittel und alle gleichzeitig berührbaren fremden leitfähigen Teile im Handbereich (siehe Kapitel 4.13) einbezogen werden.

5.1 Terminologie und Begriffe

5.1.1 Aus DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410)

- **Schutzpotentialausgleich über die Haupterdungsschiene**
(früher Hauptpotentialausgleich)

In jedem Gebäude müssen der Erdungsleiter und die folgenden leitfähigen Teile über die Haupterdungsschiene zum Schutzpotentialausgleich verbunden werden:

- metallene Rohrleitungen von Versorgungssystemen, die in Gebäude eingeführt sind, z. B. Gas, Wasser

- fremde leitfähige Teile der Gebäudekonstruktion, sofern im üblichen Gebrauchszustand zugänglich
- metallene Zentralheizungs- und Klimasysteme
- metallene Verstärkungen von Gebäudekonstruktionen aus bewehrtem Beton, wo die Verstärkungen berührbar und zuverlässig untereinander verbunden sind

Wo solche leitfähigen Teile ihren Ausgangspunkt außerhalb des Gebäudes haben, müssen sie so nahe wie möglich an ihrer Eintrittsstelle innerhalb des Gebäudes miteinander verbunden werden. Schutzpotentialausgleichsleiter müssen den Anforderungen nach DIN VDE 0100-540 (**VDE 0100-540**) entsprechen.

Metallmäntel von Fernmeldekabeln und -leitungen müssen mit dem Schutzpotentialausgleich verbunden werden, unter Berücksichtigung der Anforderungen der Eigner oder Betreiber dieser Kabel und Leitungen (411.3.1.2).

- **Zusätzlicher Schutzpotentialausgleich** (früher zusätzlicher Potentialausgleich)
Der zusätzliche Schutzpotentialausgleich muss alle gleichzeitig berührbaren Körper fest angebrachter Betriebsmittel und fremde leitfähige Teile einschließlic, soweit praktikabel, der metallenen Hauptbewehrung von Stahlbeton umfassen. Die Schutzpotentialausgleichsanlage muss mit den Schutzleitern aller Betriebsmittel, eingeschlossen den Schutzleitern der Steckdosen, verbunden werden (415.2.1).

5.1.2 Aus DIN VDE 0100-200 (VDE 0100-200):2006-06

- **Berührungsspannung**
Spannung, zwischen leitfähigen Teilen, wenn diese gleichzeitig von einem Menschen oder Tier berührt werden
[IEV 826-11-05]
- **Ableitstrom** (in einer Anlage)
Strom in einem unerwünschten Strompfad unter üblichen Betriebsbedingungen
[IEV 826-11-20]

5.1.3 Sonstige

Für dieses Kapitel werden zusätzlich die folgenden Begriffe verwendet:

- Gesamterdungswiderstand (en: total earthing resistance) R_A
Widerstand zwischen der Haupterdungsklemme oder -schiene und Erde
[EN 61557-1:2007, 3.18], [IEV 826-04-03]
- **Isolationsfehler**
Fehlerhafter Zustand in der Isolierung, der zum Absinken der Spannungsfestigkeit des fehlerbehafteten Leiters unter das zulässige Isolationsniveau führt
[IEV 604-02-02]

- **Körperschluss**
Eine durch einen Isolationsfehler entstandene leitfähige Verbindung zwischen einem aktiven Teil und einem Körper
- **Erdschluss**
Eine durch einen Isolationsfehler entstandene leitfähige Verbindung eines ungeerdeten, betriebsmäßig unter Spannung stehenden aktiven Leiters mit Erde oder geerdeten Teilen
- **Netzableitkapazität C_e**
Maximal zulässiger Wert der Gesamtkapazität des zu überwachenden Netzes, einschließlich aller angeschlossenen Betriebsmittel gegen Erde, bis zu dem das Isolationsüberwachungsgerät bestimmungsgemäß arbeiten kann
[DIN EN 61557-8 (VDE 0413-8)]
- **natürliche Netzableitkapazität C_{n1}, C_{n2}**
Der Anteil der Gesamtkapazität, der sich durch den natürlichen (geometrischen) Aufbau der Leitungsanlage des IT-Systems nach Erde ergibt
- **Erdungswiderstand R_A**
Summe der Widerstände in Ohm des Erders R_{AE} und des Schutzleiters R_{PE} zum jeweiligen Körper ($R_A = R_{AE} + R_{PE}$)
- **Teilerdungswiderstand R_{AE}**
Summe der Widerstände in Ohm des Erders
- **Schutzleiterwiderstand R_{PE}**
Summe der Widerstände in Ohm des Schutzleiters R_{PE} zum jeweiligen Körper des Betriebsmittels
- **Berührungsspannung U_B**
Spannung, die sich einstellt, wenn ein Mensch ($1\text{ k}\Omega$) auf dem Boden stehend ein defektes (erdschlussbehaftetes) Betriebsmittel der Schutzklasse I (SK I) leitend berührt

5.2 Grundsätzlicher Aufbau von IT-Systemen

In IT-Stromversorgungssystemen müssen die aktiven Teile entweder gegen Erde isoliert (in Deutschland üblich) oder über eine ausreichend hohe Impedanz geerdet werden. In IT-Systemen ist der Fehlerstrom beim Auftreten eines ersten Körper- oder Erdschlusses niedrig, und damit ist eine Abschaltung nicht erforderlich. Das Isolationsüberwachungsgerät erkennt und meldet den ersten Isolationsfehler, aber es erfolgt keine Abschaltung, sodass ein Weiterbetrieb möglich ist (**Bild 5.1**). Es müssen jedoch Maßnahmen getroffen werden, um beim Auftreten eines zweiten Fehlers an einem anderen Leiter das Risiko der gefährlichen physiologischen Einwirkung auf Personen durch Berührungsspannungen, die in Verbindung mit gleichzeitig berührbaren Teilen stehen, zu vermeiden.

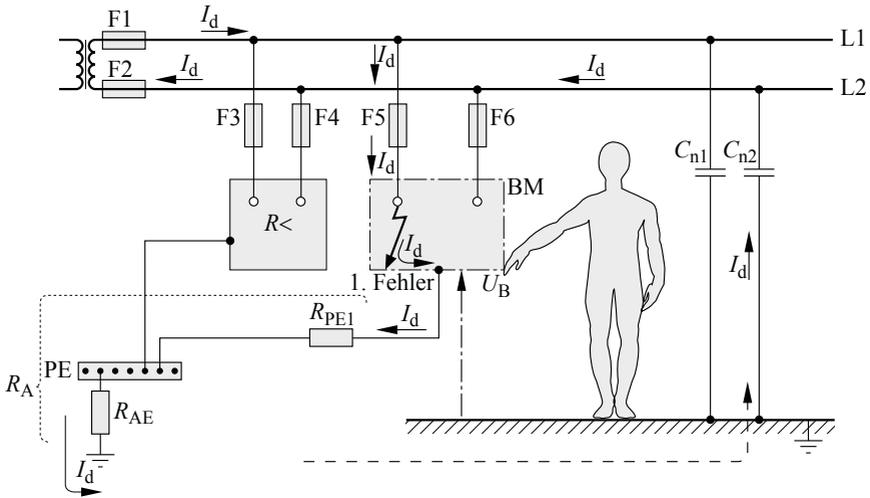


Bild 5.1 Fehlerstrom und Berührungsspannung beim ersten Isolationsfehler

5.2.1 Abschaltbedingungen in IT-Systemen

IT-Systeme können unterschiedlich aufgebaut werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird in diesem Abschnitt nur auf eine besonders übliche Bauweise eingegangen, die wie folgt gekennzeichnet ist:

- Einphasen-Wechselstrom-IT-System 230 V
- die Körper der angeschlossenen Betriebsmittel sind in ihrer Gesamtheit geerdet
- eine Isolationsüberwachung muss vorgesehen werden
- der zusätzliche Schutzpotentialausgleich (ZPA) ist nicht installiert

Im Beispiel nach Bild 5.1 müssen die Bedingungen für die Abschaltung der Stromversorgung im Fall von zwei Fehlern mit vernachlässigbarer Impedanz an jeweils unterschiedlichen aktiven Leitern erfüllt werden. Dafür gilt die Gl. (5.1):

$$Z_s \leq \frac{U}{2 \cdot I_a} \quad (5.1)$$

Dabei ist:

U Nennwechselspannung

Z_s Impedanz der Fehlerschleife

I_a Strom für die Abschaltzeit $\leq 0,2$ s bei 230 V

5.2.2 Auftreten eines ersten Fehlers in IT-Systemen

Nach Auftreten eines ersten Fehlers (Bild 5.1) wird keine Abschaltung der elektrischen Anlage gefordert, da keine gefährliche Berührungsspannung auftreten kann, sofern die folgende Bedingung erfüllt ist:

$$R_A \cdot I_d \leq 50 \text{ V} \quad (5.2)$$

Dabei ist:

R_A die Summe der Widerstände des Erders R_{AE} und des Schutzleiters der Körper R_{PE}

I_d der Fehlerstrom beim ersten Fehler mit vernachlässigbarer Impedanz zwischen einem Außenleiter und einem Körper; der Wert von I_d berücksichtigt die Ableitströme und die Gesamtimpedanz der elektrischen Anlage gegen Erde

In diesem Beispiel entspricht der Fehlerstrom I_d dem Strom I_n (Fehlerstrom über die natürlichen Ableitkapazitäten C_n), da Kabel-, Leitungs- und Entstörkapazitäten nicht dargestellt sind.

In der Anmerkung 411.6.3.1 der Norm DIN VDE 0100-410 (**VDE 0100-410**) wird empfohlen, den ersten Fehler so schnell wie praktisch möglich zu beseitigen. Diese Empfehlung dient, da der zweite Fehler zur Abschaltung führen muss, in erster Linie der Betriebssicherheit und nicht dem Schutz gegen elektrischen Schlag. Für die Abschaltung des o. g. IT-Systems gelten im Fall eines zweiten Fehlers die Bedingungen des TN-Systems.

5.2.3 Auftreten eines zweiten Fehlers in IT-Systemen

Im Gegensatz zu den TN- und TT-Systemen, bei denen ein zweiter Fehler im Normenwerk nicht berücksichtigt wird, da bereits der erste Fehler zur Abschaltung führt, ist dies in IT-Systemen doch der Fall. Da aus dem IT-System durch den ersten Fehler ein den TN- oder TT-Systemen vergleichbares Netz wird, werden die Überstrom-Schutzeinrichtungen dazu eingesetzt, um bei einem Auftreten eines zweiten Fehlers die Abschaltung zu bewirken.

Da die Impedanz der Fehlerschleife aufgrund von Fehlern in zwei Stromkreisen doppelt so groß sein kann, berücksichtigt man dies in der Abschaltbedingung dadurch, dass man vereinfacht einen Stromkreis betrachtet und dann den Schleifenwiderstand verdoppelt, daher die „2“ in Gl. (5.1).

5.2.4 Berechnungsbeispiel für ein einphasiges IT-System und zwei Fehlern

Zur Vereinfachung wird in dem folgenden Beispiel ein Einphasen-IT-System mit gemeinsamer Erdung der Betriebsmittel angenommen (**Bild 5.2**). Die dargestellten beiden Fehler sind direkte Körperschlüsse mit vernachlässigbarer Impedanz.

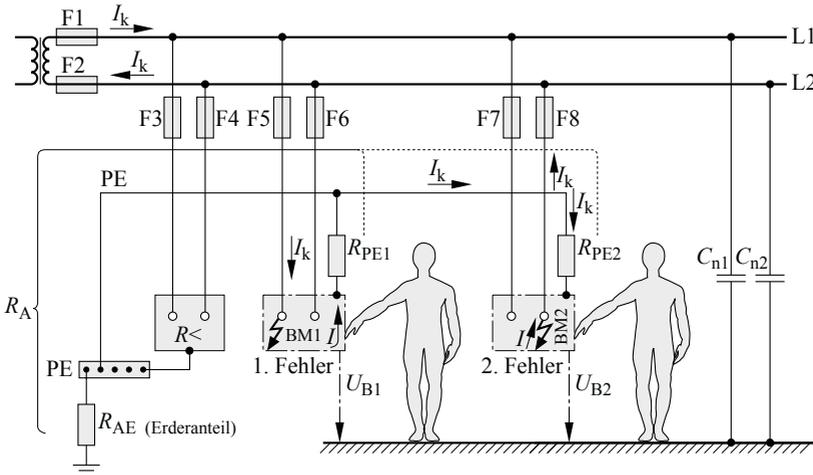


Bild 5.2 Fehlerstrom und Berührungsspannung mit erstem und zweitem Fehler

Der Kurzschlussstrom I_k wird bestimmt durch die Impedanz des Kurzschlussstromkreises, also durch die Impedanz der aktiven Leiter und der Schutzleiter (PE). In diesem Beispiel ist die Impedanz der Stromquelle durch die folgende Vereinfachung berücksichtigt. Dazu wird eine Berechnung zur Ermittlung der möglichen Berührungsspannung im Fall von zwei Fehlern in einem IT-System angesetzt. Annahme für die Berechnung ist, dass in dem beschriebenen Fehlerfall die Spannung an der Einspeisung auf 80 % der Nennspannung absinkt [5.1]. Diese Annahme setzt 20 % der Gesamtimpedanz für den Strompfad ab Einspeisung bis zur letzten Verteilung an und 80 % der Gesamtimpedanz für die Abgänge zum Betriebsmittel.

Daraus ergibt sich:

- U Nennspannung des Netzes
- $R_L = \rho \cdot \frac{l}{A_L}$ Widerstand der aktiven Leiter, an denen die Fehler auftreten
- $R_{PE} = \rho \cdot \frac{l}{A_{PE}}$ Widerstand des Schutzleiters
- A_L Querschnitt der aktiven Leiter
- A_{PE} Querschnitt der Schutzleiter
- l Länge des Fehlerstromkreises
- ρ spezifischer elektrischer Widerstand in $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

Annahme für die Berechnung ist, dass aktive Leiter und die Schutzleiter querschnittsgleich sind und dieselbe Länge haben.

Die Induktivität der Leiterschleifen wird vernachlässigt. Der Strom berechnet sich nach Gl. (5.3):

$$I_k = \frac{0,8 \cdot U}{R_{L1} + R_{PE1} + R_{PE2} + R_{L2}} \quad (5.3)$$

Die Berührungsspannung U_B ergibt sich als Spannungsfall am Schutzleiterwiderstand R_{PE1} bzw. R_{PE2} der Betriebsmittel BM1 bzw. BM2:

$$U_{BM1} = R_{PE1} \cdot I_k \quad (5.4)$$

$$U_{BM2} = R_{PE2} \cdot I_k$$

5.2.4.1 Beispielrechnung

U	230 V	Nennspannung des IT-Systems
A_L	2,5 mm ²	Querschnitt der aktiven Leiter (L1, L2)
A_{PE}	2,5 mm ²	Querschnitt des Schutzleiters R_{PE}
l	5 m	Länge der Leitungen

$$\rho = 0,01724 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$R_{PE/L} = \frac{0,01724 \Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{5 \text{ m}}{2,5 \text{ mm}^2} = 0,0344 \Omega$$

(Leiterwiderstand des Schutzleiters (R_{PE1} , R_{PE2}) bzw. des Außenleiters (R_{L1} , R_{L2}) nach Gl. (5.4))

$$\begin{aligned} I_k &= \frac{0,8 \cdot U}{R_{L1} + R_{PE1} + R_{PE2} + R_{L2}} \\ &= \frac{0,8 \cdot 230 \text{ V}}{0,0344 \Omega + 0,0344 \Omega + 0,0344 \Omega + 0,0344 \Omega} = \frac{0,184 \text{ V}}{0,1376 \Omega} = 1337,2 \text{ A} \end{aligned}$$

$$U_B = 1337,2 \text{ A} \cdot 0,0344 \Omega = 46 \text{ V}$$

¹⁾ Bei einem Kurzschluss wird angenommen, dass die Impedanzen auf der Speiseseite des betreffenden Abganges einen Abfall der Phasenspannung in der Größenordnung von 20 % bewirken, woraus sich der Faktor 0,8 ergibt. (Quelle: Cahier Technique Schneider Electric [5.1], S. 15)

Für das zuvor beschriebene IT-System und mit der Annahme, dass ein zweiter Fehler auftritt, ohne dass der erste Fehler beseitigt werden konnte, ergibt sich nach Gl. (5.4) die Berührungsspannung unter der Voraussetzung, dass alle Leitungswiderstände (R_{PE1} , R_{PE2} , R_{L1} , R_{L2}) gleich sind, wie folgt:

$$U_B = 0,2 \cdot U = 46 \text{ V}$$

Bei anderen Nennspannungen und von diesem Beispiel abweichenden Impedanzverhältnissen können auch höhere Berührungsspannungen auftreten.

Bild 5.3 zeigt den Fehlerstromkreis bei zwei impedanzlosen Fehlern aus Bild 5.2 in vereinfachter Darstellung.

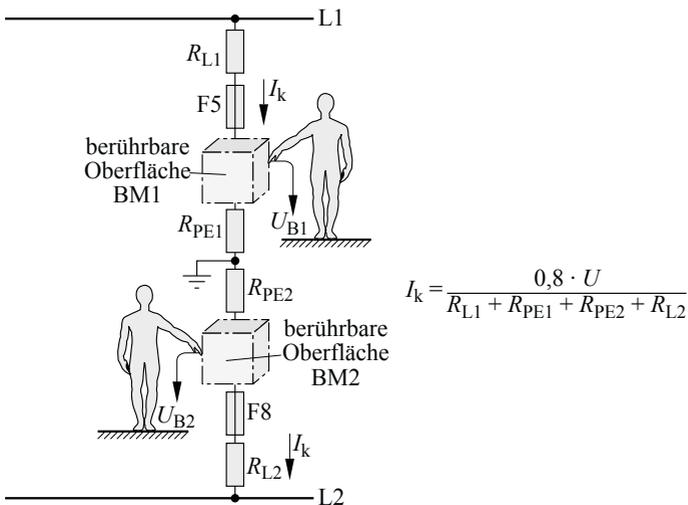


Bild 5.3 Fehlerstromkreis bei zwei impedanzlosen Fehlern

5.3 Bedeutung des zusätzlichen Schutzpotentialausgleichs (ZPA) in IT-Systemen

In IT-Systemen hat der zusätzliche Schutzpotentialausgleich (nachfolgend vereinfacht als ZPA bezeichnet) eine besondere Bedeutung [5.2]. Dies gilt insbesondere für die Anwendungen in Deutschland, da in den Vorgängernormen das „Schutzleitungssystem“ die leitende Verbindung aller Körper miteinander und mit den der Berührung zugänglichen leitenden Gebäudekonstruktionsteilen, Rohrleitungen und dergleichen

sowie mit Erdern grundsätzlich forderte. Dies änderte sich mit der Veröffentlichung von DIN VDE 0100-410 (**VDE 0100-410**) im Jahr 1983.

Die Bedeutung und Wirkung des ZPA in IT-Systemen ist in Fachkreisen unumstritten. Die Anwendung des ZPA ist gefordert, wenn die Bedingungen für das automatische Abschalten bei Verwendung von Überstrom-Schutzeinrichtungen nicht erfüllt werden können. DIN VDE 0100-410 (**VDE 0100-410**):2007, Abschnitt 411.3.2.6 besagt: „*Wenn automatische Abschaltung in der geforderten und jeweils zutreffenden Zeit nicht erreicht werden kann, muss ein zusätzlicher Schutzpotentialausgleich vorgesehen werden.*“ Selten erwähnt und doch äußerst positiv ist seine Wirkung bei Schutzleiterunterbrechungen.

5.3.1 Bedeutung des zusätzlichen Schutzpotentialausgleichs (ZPA)

Die Anwendung, der Einsatz und das Betreiben von IT-Systemen sind in einer Reihe von DIN-VDE-Normen geregelt. Darüber hinaus gibt es firmenspezifische Richtlinien und Regelungen, die die Anwendung von ungeerdeten Systemen zwingend vorschreiben.

In der gültigen Norm DIN VDE 0100-410 (**VDE 0100-410**): 2007-06 „Schutzmaßnahmen zum Schutz gegen elektrischen Schlag“ sind IT-Systeme beschrieben. Das Betreiben eines jeden IT-Systems mit einer Isolationsüberwachungseinrichtung ist im Abschnitt 411.6.3.1 ebenfalls geregelt:

„Eine Isolationsüberwachungseinrichtung muss vorgesehen werden, um das Auftreten eines ersten Fehlers zwischen einem aktiven Teil und einem Körper oder gegen Erde zu melden. Diese Einrichtung muss ein hörbares und/oder sichtbares Signal erzeugen, das so lange andauern muss, wie der Fehler besteht. Wenn sowohl hörbare als auch sichtbare Signale vorhanden sind, ist es zulässig, das hörbare Signal abzuschalten, das sichtbare Signal muss jedoch bestehen bleiben, solange der Fehler besteht.“

Die Einrichtungen/Geräte zur Isolationsüberwachung sind in der Produktnorm DIN EN 61557-8 (**VDE 0413-8**) normativ erfasst. Weitere Hauptanwendungsgebiete für IT-Systeme sind u. a. in den Normenreihen DIN VDE 0100-710 (**VDE 0100-710**), DIN VDE 0115 (**VDE 0115**) und DIN VDE 0118 (**VDE 0118**) genannt und beschrieben.

Für den Schutzpotentialausgleich über die Haupterdungsschiene, früher „Hauptpotentialausgleich“ genannt, und dem „zusätzlichen Schutzpotentialausgleich“, früher „örtlicher Potentialausgleich“ genannt, sind in der vorgenannten Norm DIN VDE 0100-410 (**VDE 0100-410**) die Anforderungen beschrieben. Hier sind auch die wesentlichen Forderungen hinsichtlich Notwendigkeit und Ausführung zu finden. In IT-Systemen kommt dem Schutzpotentialausgleich eine besondere Bedeutung zu; und dies erfordert deshalb auch besondere Aufmerksamkeit.