

5 Aufbau und Wirkweise von Schutzmaßnahmen in ungeerdeten IT-Systemen

Die Anwendung von ungeerdeten Stromversorgungen (IT-Systemen) ist steigend. Diese Tendenz ist mit einer Reihe von Vorteilen dieser Netzform zu begründen, wobei insbesondere der Weiterbetrieb von angeschlossenen Betriebsmitteln im ersten Fehlerfall²⁾ für viele Anwendungsfälle eine wichtige, besonders wirtschaftliche Bedeutung erlangt hat. Auch die Möglichkeit der automatischen Isolationsfehlererkennung und der damit verbundenen hohen Wartungsfreundlichkeit steigert die Beliebtheit. Haupteinsatzgebiete sind sensible Stromversorgungsanlagen der Industrie, im Bergbau, in maritimen Anlagen und in medizinisch genutzten Bereichen.

Grundlagen für IT-Systeme sind in der DIN VDE 0100-410:2018-10, Abschnitt 411.6 beschrieben.

IT-Systeme, die nach DIN VDE 0100-410, Abschnitt 411.6.3.1 so geplant und eingesetzt werden, dass bei einem ersten Isolationsfehler keine Abschaltung erfolgt, müssen mit einer Isolationsüberwachungseinrichtung (IMD) ausgestattet sein, die im Fall des ersten Isolationsfehlers eine Meldung ausgibt und mit einer Einrichtung zur Isolationsfehlersuche (IFLS) kombiniert sein kann.

Auch die Anwendung von Differenzstromüberwachungseinrichtungen (RCMs) ist zulässig, unter der Voraussetzung, dass der Differenzstrom ausreichend groß ist, um erfasst zu werden.

Die Anmerkung der Norm in diesem Abschnitt weist auf die Grenzen dieser Technik hin, denn Differenzstromüberwachungseinrichtungen (RCMs) können keine symmetrischen Isolationsfehler erkennen.

Daher haben sich in der praktischen Anwendung Isolationsüberwachungsgeräte (IMDs) in IT-Systemen bewährt, die nach Norm in der Lage sind, die Summe aller Isolationsfehler gegen Erde zu detektieren. Im Gegensatz zur Vorgängernorm der DIN VDE 0100-410 aus dem Jahr 2007 wird erstaunlicherweise nicht auf die Gerätenorm DIN EN 61557-8 (**VDE 0413-8**):2015-12 für IMDs hingewiesen. Bei der Einrichtung zur Isolationsfehlersuche (IFLS) nach DIN EN 61557-9 (**VDE 0413-9**):2015-12 ist dies jedoch der Fall.

Isolationsüberwachungsgeräte (IMDs) erzeugen ein sichtbares oder hörbares Signal, solange ein Isolationsfehler vorliegt. Diese Meldung muss an einer geeigneten Stelle angeordnet werden, um von der zuständigen Person wahrgenommen werden zu können.

²⁾ Fehlerfall hier: Isolationsfehler oder Erdschluss

Die beiden genannten Überwachungseinrichtungen (IMDs und RCMs) sind bisher in den relevanten Normen nicht als Schutzeinrichtungen beschrieben.

5.1 Terminologie und Begriffe

5.1.1 Aus DIN VDE 0100-200:2006-06

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

5.1.2 Aus DIN VDE 0100-410:2018-10

- Schutzerdung (Abschnitt 411.3.1.1)
Körper müssen mit einem Schutzleiter verbunden werden, unter den vorgegebenen Bedingungen für **jedes** System nach Art der Erdverbindung. Gleichzeitig berührbare Körper müssen mit demselben Erdungssystem einzeln, in Gruppen oder gemeinsam geerdet werden.
- Schutzpotentialausgleich (Abschnitt 411.3.1.2)
In jedem Gebäude müssen die eingeführten Metallteile, die geeignet sind, eine gefährliche Potentialdifferenz zu verursachen, und die nicht Bestandteil der Elektroinstallation sind, mit der Haupterdungsschiene durch Schutzpotentialausgleichsleiter verbunden werden.
- Zusätzlicher Schutz: Zusätzlicher Schutzpotentialausgleich (Abschnitt 415.2)
Der zusätzliche Potentialausgleich muss alle gleichzeitig berührbaren Körper fest angebrachter und fremder leitfähiger Teile, einschließlich (soweit praktikabel) der metallenen Hauptbewehrung von Stahlbeton, einschließen. Die Schutzpotentialausgleichsanlage muss mit den Schutzleitern aller Betriebsmittel, einschließlich der Schutzleiter der Steckdosen, verbunden werden.

5.1.3 Aus DIN VDE 0100-540:2012-06

- Körper (eines elektrischen Betriebsmittels) (Abschnitt 541.3.1)
Leitfähiges Teil eines elektrischen Betriebsmittels, das berührt werden kann und üblicherweise nicht unter Spannung steht, aber unter Spannung geraten kann, wenn die Basisisolierung versagt.

- Fremdes leitfähiges Teil (Abschnitt 541.3.2)
Leitfähiges Teil, das nicht zur elektrischen Anlage gehört, das jedoch ein elektrisches Potential, im Allgemeinen das einer örtlichen Erde, einführen kann.
- Schutzleiter (Abschnitt 541.3.6)
Leiter zum Zwecke der Sicherheit, z. B. Schutz gegen elektrischen Schlag.
- Schutzpotentialausgleichsleiter (Abschnitt 541.3.7)
Schutzleiter zur Herstellung des Schutzpotentialausgleichs.
- Haupterdungsschiene (Abschnitt 542.4)
In jeder Anlage, in der ein Schutzpotentialausgleich ausgeführt ist, muss eine Haupterdungsschiene vorgesehen sein, mit der folgende Leiter verbunden sein müssen:
 - Schutzpotentialausgleichsleiter,
 - Erdungsleiter,
 - Schutzleiter.
- Mindestquerschnitte von Schutzleitern (Abschnitt 543.1)
Der Querschnitt jedes Schutzleiters muss die Bedingungen für die automatische Abschaltung der Stromversorgung erfüllen.
- Arten von Schutzleiter (Abschnitt 543.2)
- Schutzleiter (Abschnitt 543.2.1) dürfen sein:
 - Leiter in mehradrigen Kabel und Leitungen,
 - isolierte oder blanke Leiter in gemeinsamer Umhüllung mit aktiven Leitern,
 - fest verlegte oder blanke Leiter.
- Schutzpotentialausgleichsleiter für den zusätzlichen Schutzpotentialausgleich (Abschnitt 544.2.2)
Ein Schutzpotentialausgleichsleiter, der Körper elektrischer Betriebsmittel mit fremden leitfähigen Teilen verbindet, muss eine Leitfähigkeit aufweisen, die mindestens halb so groß ist, wie die des Querschnitts des entsprechenden Schutzleiters.

5.1.4 Sonstige Begriffe

- Natürliche Netzableitkapazität C_{n1} , C_{n2}
Der Anteil der Gesamtkapazität, der sich durch den natürlichen (geometrischen) Aufbau der Leitungsanlage des IT-Systems gegen 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 in den Berechnungsbeispielen
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 meist 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**).

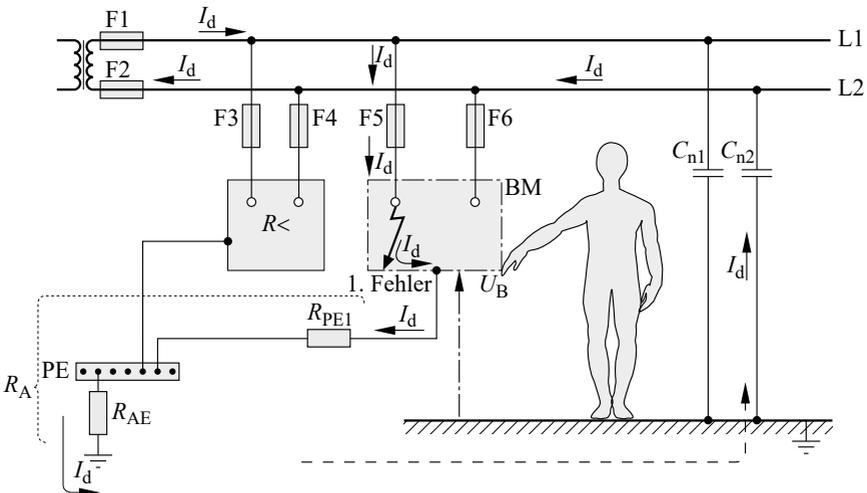


Bild 5.1 Fehlerstrom und Berührungsspannung beim ersten Isolationsfehler

Es müssen jedoch Vorkehrungen getroffen werden, um das Risiko gefährlicher pathophysiologischer Einwirkung auf eine Person, die in Verbindung mit gleichzeitig berührbaren Körpern steht, im Fall von zwei gleichzeitig auftretenden Fehlern zu vermeiden.

Anmerkung des Autors: Im letzten Satz ist das gleichzeitige Auftreten von zwei Isolationsfehlern an zwei unterschiedlichen aktiven Leitern zu verstehen.

5.2.1 Abschaltbedingungen in IT-Systemen

Auch wenn IT-Systeme üblicherweise so geplant und realisiert werden, dass ein erster Isolationsfehler nicht zur Abschaltung aber zur Meldung führt, sind weitere Anforderungen der Norm zu beachten.

IT-Systeme können unterschiedlich aufgebaut werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird in diesem Abschnitt nur auf eine besonders übliche Aufbauweise 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 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 Überstromschutzeinrichtungen 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 bei 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.

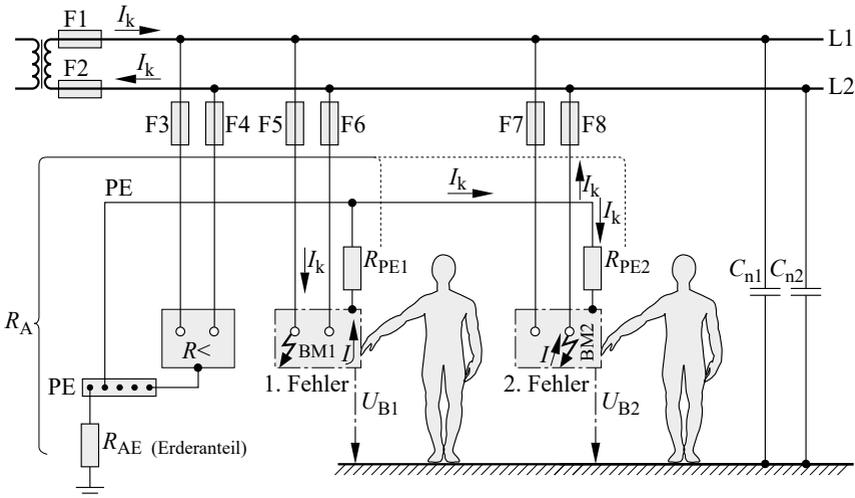


Bild 5.2 Fehlerstrom und Berührungsspannung mit erstem und zweitem Fehler

Der Kurzschlussstrom I_k wird bestimmt durch die Impedanz des Kurzschluss-Stromkreises, 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 querschnitts-
gleich sind und dieselbe Länge haben.

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

$$I_k = \frac{0,8 \cdot U}{R_{L1} + R_{PE1} + R_{PE2} + R_{L2}} \quad ^3) \quad (5.3)$$

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))

³⁾ Bei einem Kurzschluss wird angenommen, dass die Impedanzen auf der Speiseseite des betreffenden
Abgangs einen Fall der Phasenspannung in der Größenordnung von 20 % bewirken, woraus sich der
Faktor 0,8 ergibt. (Quelle: Cahier Technique Schneider Electric [5.1], S. 15)

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

$$= \frac{0,8 \cdot 230 \text{ V}}{0,0344 \Omega + 0,0344 \Omega + 0,0344 \Omega + 0,0344 \Omega} = \frac{0,184 \text{ V}}{0,1376 \Omega} = 1\,337,2 \text{ A}$$

$$U_B = 1\,337,2 \text{ A} \cdot 0,0344 \Omega = 46 \text{ V}$$

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.

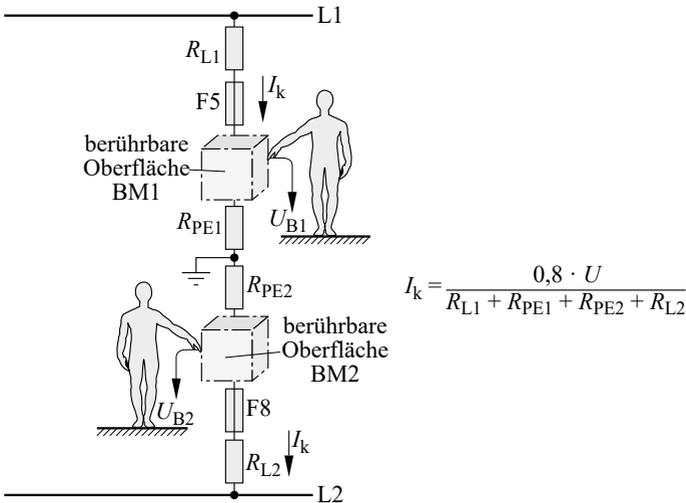


Bild 5.3 Fehlerstromkreis bei zwei impedanzlosen Fehlern

5.3 Der Potentialausgleich in IT-Systemen

In IT-Systemen hat der Potentialausgleich historische Bedeutung. Denn in den Vorgängernormen der Reihe DIN VDE 0100 wurde ein Stromversorgungssystem genannt, welches dem heutigen IT-System vergleichbar war. Dieses Stromversorgungssystem wurde im Jahr 1958 noch als „Schutzleitungssystem“ bezeichnet (siehe Kapitel 16.1, Bild 16.1 und Bild 16.2). Nach der Norm VDE 0100 § 11 b) war dieses System jedoch nur in begrenzten Anlagen zulässig, z. B. in Fabriken mit eigenem Stromerzeuger oder eigenem Transformator mit getrennten Sekundärwicklungen. Mit dem Schutzleitungssystem sollten zu hohe Berührungsspannungen verhindert werden. Dies wurde durch Verbinden aller Körper miteinander, mit den der Berührung zugänglichen leitenden Gebäudekonstruktionsteilen, Rohrleitungen und dergleichen sowie mit Erden, über einen Schutzleiter erreicht (siehe Bild 16.2).

In der aktuellen Norm DIN VDE 0100-410:2018-10 wird eine Begrenzung der Leistung und Ausdehnung des IT-Stromversorgungssystems nicht mehr betrachtet. Jedoch finden wir den Potentialausgleich in zwei unterschiedlichen Ausführungen wieder:

- Schutzpotentialausgleich: DIN VDE 0100-410:2018-10, Abschnitt 411.3.1.2,
- zusätzlicher Schutzpotentialausgleich: DIN VDE 0100-410, Abschnitt 415.2.

5.3.1 Der Schutzpotentialausgleich in IT-Systemen nach DIN VDE 0100-410:2018-10

Im Gegensatz zum historischen Schutzleitungssystem wird der Potentialausgleich in der aktuellen Norm in den Anforderungen für den Fehlerschutz für die drei Systeme TN, TT und IT beschrieben und als Schutzpotentialausgleich bezeichnet.

DIN VDE 0100-410:2018-10, Abschnitt 411.3.1.2 Schutzpotentialausgleich besagt:

In jedem Gebäude müssen die eingeführten Metallteile, die geeignet sind, eine gefährliche Potentialdifferenz zu verursachen, und die nicht Bestandteil der Elektroinstallation sind, mit der Haupterdungsschiene durch den Schutzpotentialausgleichsleiter verbunden werden. Beispiele für solche Metallteile sind:

- Rohrleitungen von Versorgungssystemen, die in Gebäude eingeführt sind, z. B. Gas-, Wasser-, Fernwärmesysteme,
- fremde leitfähige Teile der Gebäudestruktur,
- berührbare Bewehrungen von Gebäudekonstruktionen aus Beton.

5.3.1.1 Der Schutzpotentialausgleich über die Haupterdungsschiene nach DIN VDE 0100-410:2018-10

Der Schutzpotentialausgleich über die Haupterdungsschiene nach DIN VDE 0100-410, Abschnitt 411.3.1.2 ist eine Teilmaßnahme der Fehlerschutzvorkehrung. Er hat die Aufgabe, eine immer noch zu hohe Berührungsspannung bei einem Körperschluss zu verringern, damit in der Zeit, die die erste Teilmaßnahme (automatische Abschaltung im Fehlerfall) zur Abschaltung benötigt, keine gefährlichen Körperströme entstehen können.⁴⁾

Diese Annahmen treffen bei IT-Systemen ohne Abschaltung bei einem ersten Isolationsfehler oder Körperschluss nicht zu, da ohne das Auftreten eines zweiten Isolationsfehlers nicht mit einer hohen Berührungsspannung gerechnet werden muss.

5.3.1.2 Der zusätzliche Schutzpotentialausgleich in IT-Systemen

In DIN VDE 0100-410:2018-10, Abschnitt 415.2 wird der zusätzliche Schutzpotentialausgleich (ZPA) als ein zusätzlicher Schutz zum Fehlerschutz (Schutz bei indirektem Berühren) angesehen. Dies bestätigt sich durch den Hinweis von Prof. *Gottfried Biegelmeier* (†) [5.4], „*dass der zusätzliche Schutzpotentialausgleich keine Alternative zu den Maßnahmen des Fehlerschutzes*“ sein kann. Der ZPA ist aber eine wertvolle Ergänzung aller Schutzleiterschutzmaßnahmen mit Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung.

Der ZPA darf die gesamte Anlage, einen Teil der Anlage, ein Gerät oder einen Bereich einschließen. Für besondere Bereiche, z. B. medizinische Bereiche, können aber zusätzliche Anforderungen notwendig sein.

„Der zusätzliche Schutzpotentialausgleich muss alle gleichzeitig berührbaren Körper fest angebrachter Betriebsmittel und fremde leitfähige Teile, einschließlich, soweit praktikabel, der metallenen Hauptbewehrung von Stahlbeton, umfassen. Die Schutzpotentialausgleichsanlage muss mit den Schutzleitern aller Betriebsmittel, eingeschlossen die Schutzleiter der Steckdosen, verbunden werden.“ (DIN VDE 0100-410, Abschnitt 415.2.1)

Durch die Definitionen ist auch eine Einteilung hinsichtlich der Wirkungsbereiche möglich. Während der Schutzpotentialausgleich über die Haupterdungsschiene für das ganze Gebäude bestimmt ist, wird der zusätzliche (örtliche) Schutzpotentialausgleich für einen Raum oder einen Bereich des Gebäudes ausgeführt.

⁴⁾ *Schmolke, H.*: Schutzeinrichtungen. München · Heidelberg: Hüthig, 2019, S. 20