



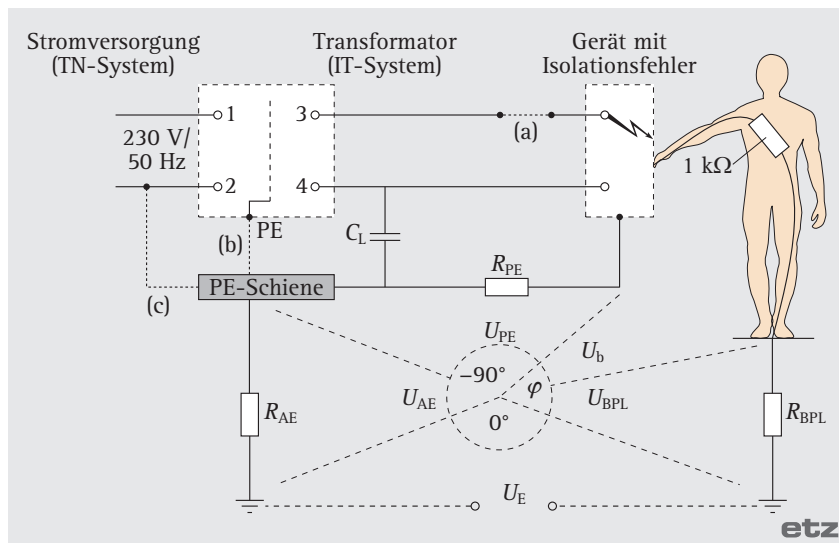
# Berührungsspannungen in ungeerdeten IT-Stromversorgungssystemen

**Die Berührungsspannung bei indirektem Berühren eines isolationsfehlerbehafteten Betriebsmittels hat große Bedeutung bei der Beurteilung des Risikos eines elektrischen Schlags in einem Stromversorgungssystem. Im Beitrag soll die Berührungsspannung bei indirektem Berühren in Gegenwart eines Isolationsfehlers im ungeerdeten IT-System modelliert werden. Auf Basis der gewonnenen Modellierung wird eine Beurteilung des Risikos vorgenommen.**

Die Berührungsspannung kann grundsätzlich leicht gemessen werden. Nicht so leicht möglich ist hingegen die Abschätzung der Berührungsspannung in Fällen, in denen eine Messung nicht gewünscht oder möglich ist. Mithilfe des hier entwickelten

an einem Simulationsrechner interaktiv nachvollzogen werden.

Das Modell fasst die Berührungsspannung als eine Teilspannung in einer Leiterschleife auf. Durch die sukzessive Betrachtung aller anderen einzelnen Teilspannungen in der Lei-



**Bild 1.** IT-Stromversorgungssystem mit fehlerhaftem Betriebsmittel und TN-Stromversorgung mit separater Erdung (c offen) und ohne angeschlossenen Trenntransformator-schutzleiter (b offen). In der gekennzeichneten Leiterschleife vorhandene Teilspannungsamplituden (Effektivwerte) und deren Phasen sowie weitere Schaltelemente werden im Text detailliert erläutert. Man beachte, dass die beiden Erdungssymbole entgegen der Konvention durch eine Spannungsquelle verbunden sind

Modells wird es möglich, auch für diese Situationen die Berührungsspannung abzuschätzen. Nebeneffekt solcher Abschätzungen ist gleichzeitig die Identifikation wichtiger Einflussparameter und Abgrenzung sicherer Parameterbereiche. An einer Beispielrechnung wird dieser Sachverhalt verdeutlicht. Die Berechnungen können

terschleife kommt man so zu einer Modellierung der Berührungsspannung, die eine Vielzahl von relevanten Einflüssen nachvollziehbar abbildet.

Einige Teilspannungen wurden bereits in [1] modelliert. Diese Teilspannungen spiegeln relevante Eigenschaften des beteiligten IT-Stromversorgungssystems wieder. In diesem

Wolfgang Hofheinz

Beitrag geht es um weitere Einflüsse auf die Berührungsspannung. Das hier entwickelte Modell wird anhand von Messungen validiert.

## Systembeschreibung und Definitionen

In Bild 1 ist ein speziell präpariertes IT-Stromversorgungssystem dargestellt, um hieraus wesentliche Eigenschaften eines typischen IT-Stromversorgungssystems herzuleiten. Die diesem Beitrag zugrunde liegenden Messungen wurden an einem solchen IT-Stromversorgungssystem durchgeführt. Die Besonderheiten sind im Einzelnen:

- Im IT-Stromversorgungssystem befindet sich ein Betriebsmittel mit Isolationsfehler (Blitz).
- Das System verfügt über eine eigene Erdung mit Erdungswiderstand  $R_{AE}$ . Der Schutzleiter des IT-Stromversorgungssystems kann bei Bedarf mit dem Schutzleiter des TN-Systems verbunden werden (c). Der Schutzleiteranschluss des Trenntransformators kann bei Bedarf mit dem IT-Schutzleiter verbunden werden (b). Beide Verbindungen sind zunächst jedoch offen. Die fehlerbehaftete Leitung des IT-Stromversorgungssystems kann an der Stelle (a) vom Betriebsmittel getrennt werden.
- Die Leitungslänge des IT-Stromversorgungssystems beträgt nur wenige Meter. Bei Bedarf kann zwischen der nicht fehlerbehafteten Leitung und dem IT-Schutzlei-



Dipl.-Ing. Wolfgang Hofheinz ist Geschäftsführer der Dipl.-Ing. W. Bender GmbH & Co. KG in Grünberg und Präsident der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik.

E-Mail: info@bender-de.com

ter eine Testkapazität  $C_L$  geschaltet werden.

Man erkennt, dass die Berührungsspannung  $U_b$  Teil einer typischerweise niederohmigen ( $< 10 \text{ k}\Omega$ ) Leiterschleife ist. Im Folgenden werden die beteiligten Teilspannungsamplituden (Effektivwerte) und deren Phasen detailliert betrachtet.

$U_b$  ist der Effektivwert der Wechselspannung zwischen dem Gehäuse des defekten Betriebsmittels und einer Bodenplatte (siehe  $U_{BPL}$ ). Diese Spannung wird als Berührungsspannung bezeichnet. Die Spannung wird mithilfe eines digitalen Spannungsmessgeräts und eines Ableitstrommessadapters (Gossen-Metrawatt Z3450) mit Innenwiderstand von  $1 \text{ k}\Omega$  gemessen. Die Phase dieser Spannung ist zunächst unbekannt und wird mit  $\varphi$  bezeichnet. Die Phase ist jedoch mit der von  $U_{BPL}$  identisch.

$U_{BPL}$  ist der Effektivwert der Wechselspannung, die an der Bodenplatte (Edelstahl,  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ) abfällt. Der Widerstand  $R_{BPL}$  der Bodenplatte liegt typischerweise im Bereich von  $< 1 \text{ k}\Omega$ . Die hier durchgeführten Mo-

dellierungen bleiben für sehr große und kleine Werte von  $R_{BPL}$  gültig. Die Phase dieser Spannung ist zunächst unbekannt und wird wie bei  $U_b$  mit  $\varphi$  bezeichnet.

$U_{PE}$  ist die Spannung (Effektivwert), die am Schutzleiter des IT-Stromversorgungssystems abfällt. Der Leitungswiderstand des Schutzleiters wird durch  $R_{PE}$  repräsentiert. Diese Spannung wird durch einen Fehlerstrom im Schutzleiter hervorgerufen. In der bereits genannten Publikation [1] wurden dieser Fehlerstrom und diese Spannung detailliert modelliert. Da dieser Fehlerstrom ausschließlich durch kapazitive Kopplungen hervorgerufen wird, bekommt diese Spannung willkürlich die Phase  $-90^\circ$  zugeordnet. Der Betrag hängt von den Eigenschaften des IT-Stromversorgungssystems ab. Die hier durchgeführten Modellierungen gelten nur für  $R_{PE} \ll 1 \text{ k}\Omega$  und  $R_{PE} \ll R_{BPL}$ , was aber normalerweise erfüllt ist.

$U_{AE}$  ist analog die Spannung (Effektivwert), die am Erdungswiderstand  $R_{AE}$  des IT-Stromversorgungssystems abfällt. Diese Spannung wird durch Fehlerströme in der Erdung hervorgerufen. Dieser Fehlerstrom und diese Spannung wurden bereits in [1] detailliert modelliert. Da auch dieser Fehlerstrom ausschließlich durch kapazitive Kopplungen hervorgerufen wird, bekommt diese Spannung, wie bei  $U_{PE}$ , willkürlich die Phase  $-90^\circ$  zugeordnet. Auch diese Spannung hängt von Eigenschaften des IT-Stromversorgungssystems und der Erdung ab. Die hier durchgeführten Modellierungen gelten nur für  $R_{AE} \ll 1 \text{ k}\Omega$  und  $R_{AE} \ll R_{BPL}$ . Auch diese Bedingungen sind normalerweise erfüllt.

$U_E$  ist eine Spannung zwischen der Erdung des IT-Stromversorgungssystems und der Bodenplatte. Die Begründung für die unkonventionelle Wahl dieser Spannungsquelle (Hypothese A) wird später mithilfe der Messwerte geliefert. Da ideale Spannungsquellen keinen Innenwiderstand aufweisen, bleiben trotz der hypothetischen Spannungsquelle  $U_E$  die beiden Erdungspunkte leitend miteinander verbunden. Im Gegensatz zu den Spannungen  $U_{PE}$  und  $U_{AE}$ , die durch kapazitive Kopplungen hervorgerufen werden, wird die Phase von  $U_E$  willkürlich auf  $0^\circ$  festgelegt. Auch diese

Annahme (Hypothese B) wird später mithilfe von Messwerten geprüft.

## Modellierung der Berührungsspannung

Aus den getroffenen Annahmen lassen sich zahlreiche Schlussfolgerungen ziehen. Zunächst ist gemäß der Kirchhoff'schen Maschenregel die Summe der komplexen Teilspannungen in der Leiterschleife null. Bei der Betrachtung der bereits eingeführten Spannungseffektivwerte muss man die Phasen berücksichtigen. Gemäß den getroffenen Annahmen gilt dann wegen der  $90^\circ$  Phasendifferenz zwischen  $U_E$  und  $U_{PE} + U_{AE}$ :

$$U_b + U_{BPL} = \sqrt{(U_{PE} + U_{AE})^2 + U_E^2}. \quad (1)$$

$U_{BPL}$  ist im Allgemeinen unbekannt. Hinzu kommt, dass  $R_{BPL}$  nur aufwendig zu bestimmen bzw. stark abhängig von der Situation ist. Andererseits ist es für Risikoabschätzungen ausreichend, einen Maximalwert von  $U_b$  anzugeben, der bei allen denkbaren Werten von  $R_{BPL}$  unterschritten wird. Fasst man nun den  $1\text{-k}\Omega$ -Widerstand des Ableitstrommessadapters und den Übergangswiderstand der Bodenplatte  $R_{BPL}$  als Spannungsteiler auf, so kann man schreiben

$$U_b = \sqrt{\alpha^2 \cdot (U_{PE} + U_{AE})^2 + (\alpha \cdot U_E)^2}, \quad (2)$$

$$\text{mit } 1 \geq \alpha = \frac{1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + R_{BPL}}.$$

Man erkennt, dass man bei unbekanntem  $R_{BPL}$  einfach  $\alpha = 1$  setzen kann und so zu einer oberen Schranke für  $U_b$  gelangt, die nicht überschritten wird.

## Einführung der natürlichen Berührungsspannung

Die Spannung  $U_E$  zwischen den verschiedenen Erdungen kann praktisch nicht direkt gemessen werden. Im Folgenden tritt sie überwiegend wie in Gl. (2) mit Vorfaktor  $\alpha$  auf. Aus diesem Grund wird die natürliche Berührungsspannung eingeführt:

$$U_n = \alpha \cdot U_E, \quad (3)$$

$$\text{mit } 1 \geq \alpha = \frac{1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + R_{BPL}}.$$

Die Wechselspannung  $U_n$  wird mit einem digitalen Spannungsmessgerät



über einen Ableitstrommessadapter zwischen Bodenplatte und Schutzleiter gemessen. Bei der Messung ist kein Betriebsmittel mit Isolationsfehler vorhanden. Man beachte, dass die Messwerte insbesondere durch die Erdschleife mit Störungen überlagert sein können.

### Modellvalidierung – Hypothese A

Zunächst soll die Existenz einer Spannungsquelle  $U_E$  im Experiment überprüft werden (Hypothese A). Dazu wird  $U_b$  in einem Messaufbau gemäß Bild 1 gemessen. Die Verbindungen (b) und (c) sind offen. Es wird keine Testkapazität verwendet ( $C_L = 0$  nF). Bei Abwesenheit einer Testkapazität ist es unerheblich, ob das fehlerbehaftete Betriebsmittel mit dem IT-Stromversorgungssystem verbunden ist oder nicht – Verbindung (a) kann also offen oder geschlossen sein. Messungen ergeben in diesen Fällen  $U_b = 5 \pm 0,2$  mV. Das bedeutet, dass zwischen verschiedenen Erdungen Spannungsdifferenzen im Millivoltbereich auftreten. Hypothese A ist somit

im Experiment bestätigt. Um diese Spannungen im Modell zu berücksichtigen, wird die Spannungsquelle  $U_E$  eingeführt.

Der Messaufbau soll nun mithilfe von Gl. (2) und Gl. (3) nachvollzogen werden. Da  $R_{PE} \ll 1$  k $\Omega$  und  $R_{AE} \ll 1$  k $\Omega$  gelten, ergibt sich  $U_{PE} \approx U_{AE} \approx 0$  mV. Damit ergibt sich aus Gl. (2) und Gl. (3) der Zusammenhang  $U_n = U_b = 5$  mV. Durch den beschriebenen Messaufbau lässt sich  $U_n$  also direkt messen.

### Modellvalidierung – Hypothese B

Bei der Herleitung wurde eine Phasendifferenz von  $90^\circ$  zwischen  $U_E$  und  $U_{PE} + U_{AE}$  angenommen (Hypothese B). Mithilfe dieser Annahme ergibt sich der einfache Wurzelausdruck in Gl. (1). Die Gültigkeit dieser Gleichung wird nun überprüft. Der Spezialfall  $U_{PE} + U_{AE} = 0$  mV wurde bereits im vorherigen Abschnitt untersucht.

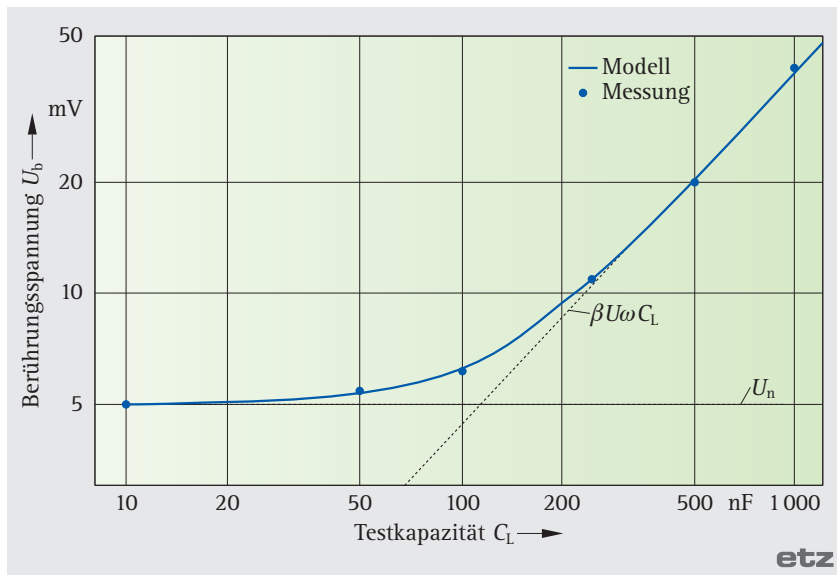
Bei Variation von  $C_L$  fließt ein kapazitiver Fehlerstrom  $I_d$  durch  $U_{PE}$ . Unter der Bedingung  $R_{PE}\omega C_L \ll 1$  gilt für den Fehlerstrom  $I_d = U\omega C_L$  und damit für die Spannung  $U_{PE} = R_{PE} \cdot I_d =$

$R_{PE} \cdot U\omega C_L$ . Wegen  $R_{AE} \ll 1$  k $\Omega$  und  $R_{AE} \ll R_{BPL}$  gilt außerdem  $U_{AE} = 0$  mV. Da die Leitungslängen sehr kurz sind, wird die natürliche Ableitkapazität [2] vernachlässigt. Aus dem vorherigen Abschnitt ist bekannt, dass  $U_n = 5$  mV gilt. Es ergibt sich aus Gl. (2) und Gl. (3):

$$U_b = \sqrt{(\beta U \omega C_L)^2 + U_n^2}, \quad (4)$$

Dabei bündelt  $\beta$  die unbekanntenen Größen  $R_{PE}$  und  $R_{BPL}$  bzw.  $\alpha$  zu einem für den konkreten Versuchsaufbau konstanten Wert. Gl. (4) stellt also einen Zusammenhang zwischen der Testkapazität  $C_L$  und der Berührungsspannung  $U_b$  her. Dieser Zusammenhang soll im Folgenden im Experiment überprüft werden.

In Bild 2 sind die unter den eben beschriebenen Bedingungen gemessenen Berührungsspannungen  $U_b$  in Abhängigkeit der Testkapazität  $C_L$  als Punkte aufgetragen. Gleichzeitig ist eine nicht lineare Regression von Gl. (4) dargestellt. Setzt man  $U = 230$  V,  $\omega = 314$  s $^{-1}$  und  $U_n = 5$  mV,



**Bild 2.** Messung und Modell der Berührungsspannung bei Variation der Testkapazität  $C_L$ . Man beachte die logarithmische Skalierung. Der Einfluss der beiden Summanden in Gl. (4) ist durch graue gestrichelte Linien symbolisiert

so ergibt sich für den unbekannt Parameter  $\beta = 0,55 \Omega$ . Man erkennt, dass Messung und Modell mit hoher Genauigkeit übereinstimmen. Die Hypothese B kann also auf Basis der vorliegenden Messwerte bestätigt werden.

Es soll betont werden, dass auf Basis der vorliegenden Messwerte nicht ausgeschlossen werden kann, dass eine andere Phase zwischen  $U_{PE} + U_{AE}$  und  $U_n$  vorliegt – es wird nur nachgewiesen, dass die Annahme einer Phase von  $90^\circ$  nicht im Widerspruch zu den vorliegenden Messungen steht. Eine Phase von zum Beispiel  $0^\circ$  steht im Widerspruch zu den Daten.

Die unbekannt Größen  $R_{PE}$  und  $R_{BPL}$  werden durch  $\beta$  zumindest eingeschränkt. Es gilt

$$R_{PE} = \beta/\alpha = \beta(1 \text{ k}\Omega + R_{BPL})/1 \text{ k}\Omega.$$

Mit  $\beta = 0,55 \Omega$  und zum Beispiel  $R_{BPL} = 1 \text{ k}\Omega$  erhält man einen plausiblen Wert von  $R_{PE} = 1 \Omega$ .

## Praktischer Ablauf von Messung und Simulation

Nach Validierung des vorgestellten Modells gemäß Gl. (2) und Gl. (3) folgt nun ein Leitfaden für die Praxis, mit dem die Simulation der Berührungsspannung  $U_b$  und die dazu erforderliche Messungen vorgenommen werden können. Die Schritte lauten im Einzelnen:

1. Bestimmung von  $U_n$ : Die natürliche Berührungsspannung  $U_n$  wird

durch Messung bestimmt. Die Messung wird unter der Zwischenüberschrift „Einführung der natürlichen Berührungsspannung“ in diesem Beitrag beschrieben.

2. Bestimmung von  $U_{PE}$  und  $U_{AE}$ : Die Bestimmung der Spannungen  $U_{PE}$  und  $U_{AE}$  ist detailliert in [1] beschrieben. Im nächsten Abschnitt wird beispielhaft gezeigt, wie die Spannungen  $U_{PE}$  und  $U_{AE}$  abgeschätzt werden können. Auf eine detaillierte Herleitung und Begründung muss hier aus Platzgründen verzichtet werden.

3. Berechnung von  $U_b$ : Ist  $R_{BPL}$  bekannt oder durch Messung ermittelbar, so kann  $\alpha$  gemäß Gl. (2) bestimmt werden. Die Berührungsspannung  $U_b$  ist dann mit Gl. (2) berechenbar. Ist  $R_{BPL}$  unbekannt, so kann man näherungsweise  $\alpha = 1$  setzen und Gl. (2) ersetzen durch die Ungleichung

$$U_b < \sqrt{(U_{PE} + U_{AE})^2 + U_n^2}.$$

## Abschätzung der Spannungen $U_{PE}$ und $U_{AE}$

Es wird nun – aus Platzgründen verkürzt – der Darstellung in [1] gefolgt. Zunächst gilt:

$$U_{PE} = R_{PE} \cdot I_d \text{ und } U_{AE} = R_{AE} \cdot I_n. \quad (5)$$

Der Erdungswiderstand  $R_{AE}$  und der Schutzleiterwiderstand  $R_{PE}$  können durch Messung bestimmt werden.

Sind die Werte unbekannt, so kann man näherungsweise  $R_{PE} = R_{AE} = 1 \Omega$  setzen. Für ein typisches, ungeerdetes IT-Stromversorgungssystem gilt weiter

$$\begin{aligned} I_d &= I_1 + I_2, \\ I_n &= I_2 \pm I_3 \leq I_2 + I_3, \end{aligned} \quad (6)$$

mit  $I_1 = U\omega C_L$ ,  $I_2 = U\omega C_n$  und  $I_3 = U\omega C_K$ .

Dabei ist  $C_L$  die Kabelkapazität des IT-Stromversorgungssystems. Es gilt  $C_L = \kappa \cdot l$  mit der spezifischen Kabelkapazität  $\kappa$  des verwendeten Kabels und der Kabellänge  $l$ . Typische Werte für  $\kappa$  liegen im Bereich von  $8 \text{ nF}/100 \text{ m}$ . In [1] ist beschrieben, wie man  $\kappa$  durch Messung der Fehlerströme im IT-Stromversorgungssystem bestimmen kann.

$C_n$  ist die natürliche Ableitkapazität des IT-Stromversorgungssystems.  $C_n$  kann rechnerisch kaum ermittelt werden. In [1] ist beschrieben, wie man  $C_n$  durch Messung bestimmen kann. Ist  $C_n$  unbekannt, so kann man sich mit der sehr groben Abschätzung  $C_n = 0,5 \cdot C_L$  behelfen.

$C_K$  ist die Koppelkapazität des Trenntransformators. Das Vorzeichen des zugehörigen Fehlerstroms  $I_3$  hängt von dem fehlerbehafteten aktiven Leiter im IT-Stromversorgungssystem ab. Typischerweise hat  $C_K$  Werte im Nanofaradbereich.

Setzt man nun  $U = 230 \text{ V}$ ,  $\omega = 314 \text{ s}^{-1}$  und  $C_K = 1 \text{ nF}$ , so erhält man  $I_3 = 0,07 \text{ mA}$ . Mit einer Kabellänge von  $l = 300 \text{ m}$  erhält man  $C_L = 24 \text{ nF}$  und damit  $I_1 = 1,7 \text{ mA}$ . Als Schätzung ergibt sich dann  $I_2 = 0,85 \text{ mA}$ . Damit ergibt sich  $I_d = 2,55 \text{ mA}$  und  $I_n = 0,9 \text{ mA}$  und folglich  $U_{PE} + U_{AE} = 3,45 \text{ mV}$ . Mit  $U_n = 5 \text{ mV}$  und  $\alpha = 1$  ergibt sich dann abschließend  $U_b < 6 \text{ mV}$ .

## Variation der fehlerbehafteten Leitung und der Erdung

Durch die Koppelkapazität des Trenntransformators  $C_K$  wird der Fehlerstrom  $I_3$  hervorgerufen. Das Vorzeichen dieses Fehlerstroms hängt gemäß Gl. (6) (Vorzeichenwechsel) von der Leitung im IT-Stromversorgungssystem ab, die von einem Isolationsfehler betroffen ist. Der Nachweis dieses Sachverhalts wird in [1] ausführlich geführt. Damit hängen auch  $U_{AE}$ ,  $U_{PE}$  und folglich  $U_b$  von dem Ort des Isolationsfehlers ab. Mit den plausiblen Werten aus dem obigen Beispiel

würde sich beim Wechsel der fehlerbehafteten Leitung die resultierende Berührungsspannung  $U_b$  um weniger als 5 % ändern. Diese Änderung geht in den Messschwankungen von  $U_b$  weitgehend unter. Aus diesem Grund wurde bei den in diesem Beitrag dargestellten Messungen der Ort des Isolationsfehlers nicht berücksichtigt.

Bei den Messungen der Ströme in [1] waren zum einen die Messschwankungen deutlich kleiner und zum anderen die Auswirkungen auf die Berührungsspannung größer. Daher konnte dort die Änderung durch den Vorzeichenwechsel von  $I_3$  sicher nachgewiesen werden. Die Zunahme der Störungen bei den hier durchgeführten Messungen von  $U_b$  sind sicherlich auf die Erdungsschleife zurückzuführen.

Bei den hier durchgeführten Messungen wurde die Bodenplatte und damit  $R_{BPL}$  nicht verändert. Bei einem Wechsel der Erdung ändert sich – wie zu erwarten – auch  $U_n$ . Bei weiteren Testmessungen wurden zwei verschiedene Erdungen verwendet. Bei der gleichzeitigen Verwendung der Erdungen ergibt sich ein Wert von  $U_n$ , der zwischen den Messungen mit den einzelnen Erdungen liegt. Die Änderungen von  $U_n$  bei verschiedenen Erdungen zeigt eine gewisse Regelmäßigkeit, die jedoch bei Abschluss dieser Untersuchung noch nicht verstanden wurde.

## Ausblick

Mit der hier entwickelten Modellierung gewinnt man einen Überblick über die relevanten Einflussfaktoren auf die Berührungsspannung  $U_b$ :

- Der *Übergangswiderstand*  $R_{BPL}$  der Bodenplatte hat erheblichen Einfluss auf die Berührungsspannung. So fällt ein großer Teil der Spannung an diesem Übergangswiderstand ab und vermindert so die Berührungsspannung  $U_b$ . Der Einfluss von  $R_{BPL}$  ist im Modell durch den Parameter  $\alpha$  in Gl. (2) quantifizierbar. Bei der Beurteilung des Risikos sollte man diesen Einfluss jedoch nicht überbewerten, weil der Übergangswiderstand stark schwanken kann und in der Regel kaum kontrollierbar ist (z. B. nasse Umgebungen). In diesen Fällen erhält man mit  $\alpha = 1$  eine feste obere Schranke für  $U_b$ , die bei beliebigen Übergangswiderständen nicht

überschritten wird. Man beachte, dass der Übergangswiderstand  $R_{BPL}$  nicht durch die Auslegung oder Dimensionierung des IT-Stromversorgungssystems beeinflusst werden kann.

- Die *natürliche Berührungsspannung*  $U_n$  beeinflusst gemäß Gl. (2) die Berührungsspannung  $U_b$ . Wie der Übergangswiderstand, ist  $U_n$  unabhängig von Art und Größe des IT-Stromversorgungssystems.  $U_n$  kann mangels analytischer Kenntnis bis jetzt nicht modelliert werden – ist aber durch Messung leicht bestimmbar.
- Schließlich wird die Berührungsspannung  $U_b$  gemäß Gl. (2) durch *weitere Spannungen* beeinflusst, die im Schutzleiter ( $U_{PE}$ ) und am Erdungswiderstand ( $U_{AE}$ ) abfallen. Diese Spannungen sind im Wesentlichen durch die Art und Größe des IT-Stromversorgungssystems beeinflusst. In [1] werden diese Einflüsse detailliert beschrieben und begründet. In diesem Beitrag konnte nur ein Beispiel kurz vorgestellt werden. Hiernach tragen zu einer Erhöhung von  $U_b$  Erhöhungen folgender Werte bei:
  - Schutzleiterwiderstand  $R_{PE}$ ,
  - Erdungswiderstand  $R_{AE}$ ,
  - Kabelkapazität  $C_L$  (proportional zur Kabellänge),
  - natürliche Ableitkapazität  $C_n$ ,
  - Trenntransformator-koppelkapazität  $C_K$ .

Werden an die Berührungsspannung eines ungeerdeten IT-Stromversorgungssystems bestimmte Anforderungen in Form von Höchstgrenzen gestellt (z. B. Norm), so muss man zur Auslegung des IT-Stromversorgungssystems zunächst die nicht vom IT-Stromversorgungssystem abhängenden Beiträge und Parameter ( $U_n$  und  $\alpha$  bzw.  $R_{BPL}$ ) messen oder geeignet festlegen. Dann können max. Fehlerströme ( $I_d$  und  $I_n$ ) berechnet werden, aus denen dann Obergrenzen für wichtige Parameter des IT-Stromversorgungssystems berechnet werden können.

## Literatur

- [1] Hofheinz, W.: Fehlerströme in ungeerdeten IT-Stromversorgungssystemen. etz Elektrotech. + Autom. 132 (2011) H. 12, S. 50–53
- [2] Hofheinz, W.: Der Erdungswiderstand und die Netzableitkapazitäten in IT-Systemen. etz Elektrotech. + Autom. 127 (2006) H. 5, S. 42–46