

Die Rolle von Globalen Erdungssystemen zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit elektrischer Netze

Thomas Mallits, Ernst Schmutzner, Lothar Fickert, Thomas Höhn, Redzo Muratovic, Joachim Gether

Institut für Elektrische Anlagen - TU Graz, 8010 Graz, Inffeldgasse 18/I,
+43 (316) 873-8064, thomas.mallits@tugraz.at, www.ifea.tugraz.at

Kurzfassung: Für den zuverlässigen und sicheren Betrieb von Verteilernetzen ist die koordinierte Ausführung von Hoch- und Niederspannungserdungsanlagen von zentraler Bedeutung. Die Altersstruktur vieler Kabelverteilnetze und die damit verbundene verminderte Isolationsfestigkeit erfordert immer häufiger die Umsetzung alternativer Schutzkonzepte (KNOPE, KNOSPE). Diese führen aber zu erhöhten Anforderungen an die Erdungsanlagen hinsichtlich Personensicherheit und Sachgüterschutz. Anhand eines realen Beispiels sowie weitergehenden simulationstechnischen Analysen werden primäre und sekundäre Auswirkungen von einpoligen Erdschlüssen auf das Erdoberflächenpotential bei Stations- und Kabelfehlern innerhalb Globaler Erdungssysteme untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass in Globalen Erdungssystemen bei Stationsfehlern, auch unter der Einwirkung von Strömen im kA-Bereich, die normativ zulässigen Grenzen hinsichtlich Schritt- bzw. Berührungsspannung meist eingehalten werden, jedoch neue Gefahrenstellen z.B. durch induzierte Spannungen aufgrund der hohen Fehlerströme und somit Gefährdungen von Personen und Beschädigungen von empfindlichen elektronischen Betriebsmitteln entstehen können. Weiters wird gezeigt, dass es abhängig vom Fehlerort auch innerhalb Globaler Erdungssysteme, z.B.: bei Kabelfehlern, zu unzulässigen Schritt- bzw. Berührungsspannungen im Fehlerfall kommen kann.

Keywords: Globales Erdungssystem, Zuverlässigkeit, Personensicherheit, Netzausbau, Sternpunktsbehandlung

1 Einleitung

Die Statistik zeigt, dass in den letzten Jahren ein Anstieg der kundenbezogenen Nichtverfügbarkeit SAIDI zu beobachten (siehe Abbildung 1 links) ist.

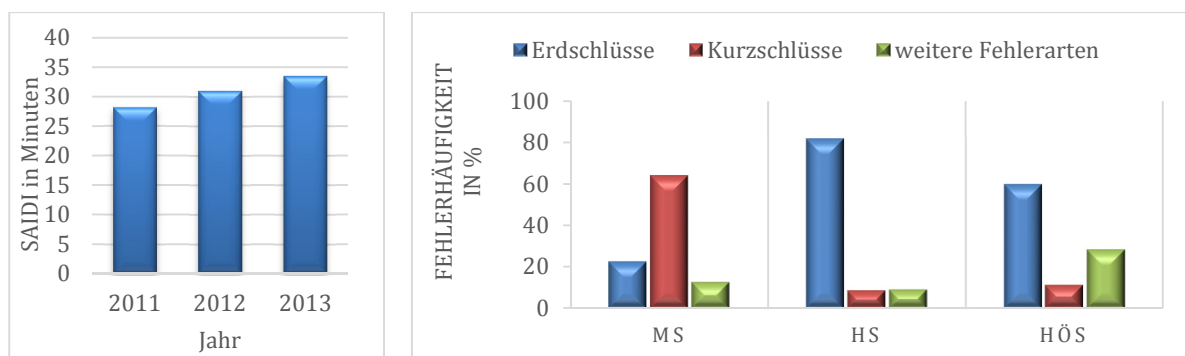


Abbildung 1: SAIDI Österreich (links) Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Verteilung der Fehlerhäufigkeit je Spannungsebene (rechts) [2]

Im Bereich der Übertragungsnetze ist dies auf die ständige Zunahme des Energieverbrauches, der steigenden Einspeisung erneuerbarer, volatiler Energieerzeuger, der steigenden Nord-Süd-Stromtransporte und dem Stagnieren des Übertragungsnetzausbaus rückzuführen. Dies spiegelt sich auch im europaweiten Awareness System der Netzbetreiber wieder, immer häufiger müssen die Netzbetreiber den - aufgrund von Netzengpässen, n-1-Verletzungen - zum Beispiel den Intraday-Handel stoppen.

Im Bereich der Niederspannung galten Kabelnetze in der Vergangenheit aufgrund ihrer geschützten Lage im Erdreich als zuverlässig (Kabelmuffen ausgenommen). Durch die Alterung vieler Kabelnetze und die damit verbundene Verringerung der Isolationsfähigkeit resultieren jedoch aus einpoligen Kabelerdschlüssen immer öfters Doppelfehler aufgrund der Spannungsanhebung im Fehlerfall. Auch wenn die Anzahl von Kabelfehlern, wie die Abbildung 2 zeigt, im Vergleich zu Freileitungsfehlern gering ist, so ergeben sich jedoch aufgrund des hohen Aufwandes (Ortung, Tiefbau, Reparatur) bei der Fehlerbehebung von Kabelfehlern deutlich längere Ausfallzeiten.

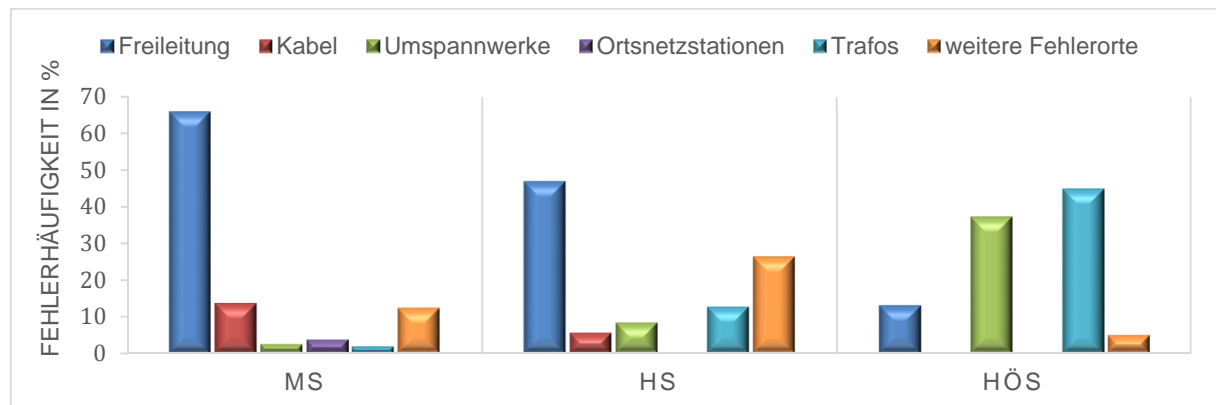


Abbildung 2: Fehlerhäufigkeit nach Fehlerart und Spannungsebene [2]

Da der Austausch bzw. die Reparatur von Kabeln mit hohen Kosten verbunden ist, suchen Netzbetreiber nach Möglichkeiten, um den Investitionszeitpunkt unter Berücksichtigung der Zinseszinsrechnung möglichst lang hinauszuzögern, riskieren damit aber eine Verschlechterung der bislang im internationalen Vergleich noch sehr guten Netzkennzahlen. Aus technischer Sicht ist dies, im Bereich von Mittelspannungskabeln, nur mittels schutztechnischer Maßnahmen wie z.B. der KNOPE (kurzzeitige niederohmige Phasenerdung) oder NOSPE (niederohmige) möglich. Derartige Verfahren führen aufgrund ihres hohen Fehlerstromes jedoch zu erhöhten Anforderungen an die Erdungsanlagen hinsichtlich der Personensicherheit im Fehlerfall. Im Folgenden wird mittels Messung sowie weiterführenden simulationstechnischen Untersuchungen gezeigt, dass es auch in Globalen Erdungssystemen Fehlersituationen gibt, in denen gefährliche Schritt- und Berührungsspannungen auftreten können.

2 Messungen

Im Rahmen mehrerer 1-poliger Erdschlussversuche in MS/NS-Trafostationen zeigten Messungen der Fehlerstromaufteilung (auf die einzelnen Komponenten der Erdungssysteme) immer wieder, dass der Fehlerstromanteil, welcher über die lokale Stationserdungsanlage abfließt, unter 10% liegt. Voraussetzung dabei ist, dass sich die Station im Globalen

der in Abbildung 3 dargestellten Stromaufteilung ein Gesamtfehlerstrom (Strom über die Fehlerstelle) von

$$I_{F\text{ Ges}} = I_{F\text{ Erde Station Max}} \cdot \frac{100\%}{2,3\%} = 1300\text{ A}$$

„dauernd“ anstehen dürfte. Derartiger Fehlerströme werden aber in der Praxis in Schnellzeit abgeschaltet. Gemäß ÖVE/ÖNORM E8383 [3] liegt die zulässige Berührungsspannung für eine Fehlerdauer von 200 ms bei ca. 500 V bzw. die maximal zulässige Erdungsspannung bei 1000 V.

In der Praxis verfügt zumindest ein Teil der MS/NS-Stationen über eine signaltechnische Anbindung in Form von Steuerleitungen. Bei dem in Abbildung 3 dargestellten Beispiel wurde zwischen dem fehlerbehafteten 20-kV-Kabel und dem Signalkabel messtechnisch eine Koppelimpedanz von $Z_k=0,063\text{ }\Omega/\text{km}$ bestimmt. Bei einer angenommenen Parallelführung von 5 km und einem Fehlerstrom von 1,5 kA ergibt dies eine in die Adern induzierte Spannung von

$$U_{\text{Sig. ind.}} = l \cdot Z_k \cdot I_F = 6\text{ km} \cdot 0,063 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 1300\text{ A} = 491\text{ V}$$

Diese, wenn auch nur kurze, Spannungsanhebung in der Signalleitung kann zu einer Reduktion der Datenübertragungsgeschwindigkeit, zum Verlust bzw. bis zur Zerstörung des Kommunikationsweges führen und stellt zudem je nach Stromflussdauer ein Personengefährdungsrisiko dar. Neben den aus induktiver Kopplung beschriebenen resultierenden Störungs- und Gefahrenpotentialen werden im folgenden Kapitel weitere potentielle Gefahren durch simulationstechnische Analysen anhand einer Modellsiedlung aufgezeigt.

3 Simulation

3.1 Theoretische Grundlagen für die Berechnung des Erdoberflächenpotentials

Die Berechnung des Potentialtrichters von Einzelerdern, die durch das Strömungsfeld im Erdreich gekoppelt sind, erfolgt im gezeigten Beispiel (siehe Kap.3.3) nach der Methode der Potentialkoeffizienten [2],[4]. Zentraler Punkt hierbei ist die Bestimmung des Potentials, verursacht durch das eigene Strömungsfeld des Erders und durch alle weiteren Erder im Beeinflussungsbereich.

Das Eigenpotential eines (Band-)Erders (Nachbildung als Ellipsoid) wird bestimmt durch dessen Oberfläche, sowie dem in das Erdreich abgeleiteten Strom.

$$\varphi(r, z) = \frac{I \cdot \rho}{4 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left| \frac{z + e + \sqrt{r^2 * (z + e)^2}}{z - e + \sqrt{r^2 * (z - e)^2}} \right|$$

$\varphi(r, z)...$	Potential (elliptisches Koordinatensystem)
$R_{Sum}(x)...$	Summe der Ausbreitungswiderstand
$\rho...$	spezifischer Erdwiderstand
$l...$	Seitenlänge des Bänderquerschnitts
$z, r...$	elliptische Koordinaten
$e...$	Exzentrizität

Das Fremdpotential eines weiteren Erders, wird durch das hervorgerufene Potential des anderen Erders im Mittelpunkt des ursprünglichen Erders bestimmt.

Durch die Vorgabe des Erderstroms und der Teilerderströme können die Koppelfaktoren zwischen den einzelnen Teilerdern berechnet werden.

$$k_{ij} = \frac{\varphi_i}{I_j}$$

$k_{ij}...$	Koppelfaktor in Ω
$\varphi_i...$	Teilerderpotential in V
$I_j...$	Teilerderstrom in A

Das Gesamtpotential und damit der Erdausbreitungswiderstand der gesamten Erdungsanlage können dann mithilfe einer Superposition berechnet werden.

$$U_E = \sum k_{ij} \cdot I_j$$

$U_E...$	Gesamtpotential in V
$k_{ij}...$	Koppelfaktor in Ω
$I_j...$	Teilerderstrom in A

Bei dieser Berechnungsmethode werden die Längsspannungsabfälle entlang der Erder vernachlässigt (d.h. der Erder hat über die gesamte Länge das gleiche Potential).

3.2 Modellbeschreibung

Die Abbildung 4 zeigt eine Übersicht der verwendeten Modellsiedlung. Diese besteht aus Wohngebäuden in Form von Einfamilienhäusern sowie Mehrparteienhäusern. Zentral gelegen befindet sich eine MS/NS-Trafostation, welche über ein Kabel abgespeist wird. Das Niederspannungsnetz ist als TN-C-S-System ausgeführt, jedes Gebäude verfügt auch über einen eigenen Fundamentträger.

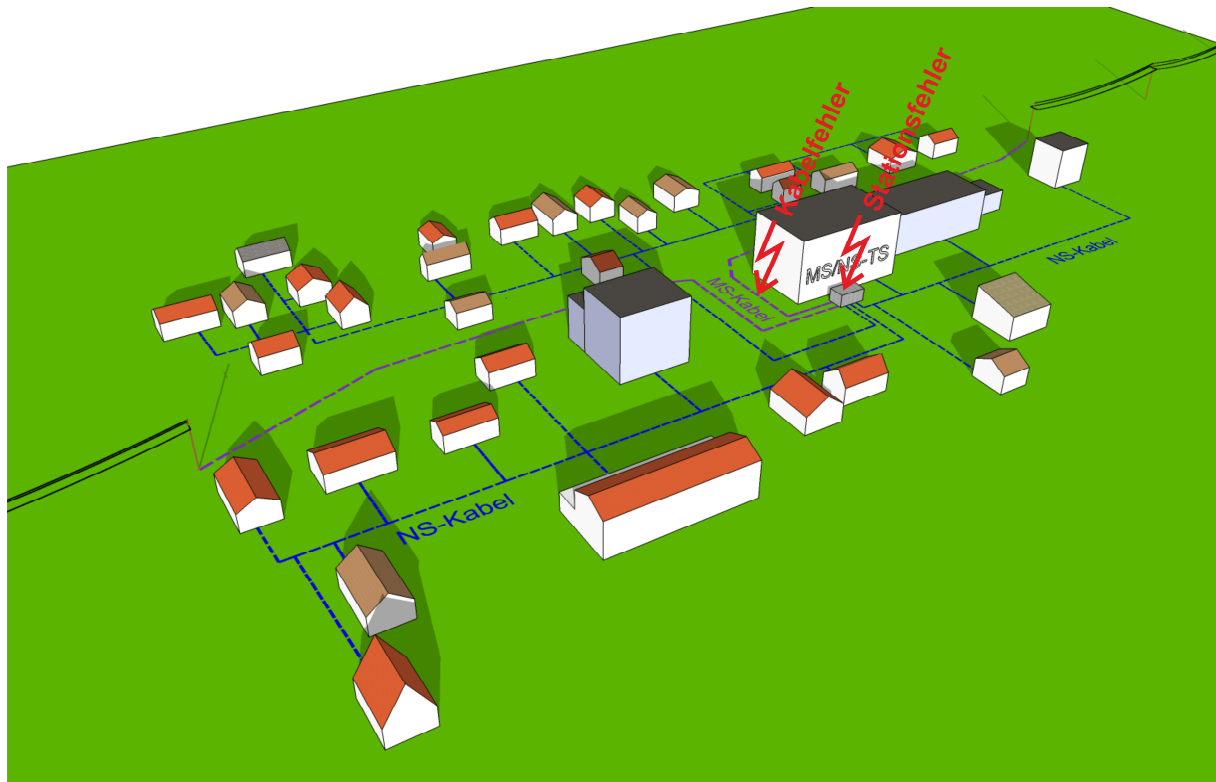


Abbildung 4: Übersicht über die Modellsiedlung

Im Rahmen der Analyse werden folgende Fehlerszenarien behandelt:

- 1.) Einpoliger Erdschluss in der MS/NS-Trafostation
- 2.) Einpoliger Kabelerdschluss
 - Kabelschirm übernimmt einen großen Teil des Fehlerstromes
 - Kabelschirm nicht wirksam (z.B.: Kabelenden nicht beidseitig geerdet)

3.3 Simulationsergebnisse

Die Abbildung 5 zeigt die berechneten Erdoberflächenpotentiale im Falle eines einpoligen Erdschlusses in der MS/NS-Trafostation, bei einem Kabelfehler mit beidseitig geerdetem Kabelschirm, sowie bei einem Kabelfehler ohne wirksame Schirmerdung. Angenommen wird ein Gesamtfehlerstrom von 60 A sowie ein spezifischer Erdwiderstand von 100 Ω m.

Stationsfehler (Abbildung 5, oben):

Aus dem berechneten Erdoberflächenpotential ist die Wirkung eines globalen Erdungssystems deutlich zu erkennen. Bedingt durch die Netztopologie (TN-C-S) der Modellsiedlung verteilt sich der Fehlerstrom über die Erdungsanlagen der Niederspannung (Längsspannungsabfälle sind in der Modellierung nicht berücksichtigt). Durch den geringen resultierenden Erdausbreitungswiderstand von ca. $R_A = 37 \Omega$ ergibt sich ein Erdoberflächenpotential, dessen Maximum unter 23 V liegt.

Kabelfehler bei beidseitig geerdetem Kabelschirm (Abbildung 5, Mitte):

Aus dem berechneten Erdoberflächenpotential ist die Wirkung des Kabelschirms für den Fall dargestellt, dass 98% des Fehlerstromes über den Kabelschirm der NS-Erdungsanlagen

zurückfließt und nur 2% direkt an der Fehlerstelle ins Erdreich eintreten. Das an der Fehlerstelle maximal auftretende Erdoberflächenpotential ist hierbei somit maßgeblich von den wirksamen Impedanzen zwischen Phasenleiter und dem Kabelschirm (z.B. Lichtbogen) sowie zwischen Phasenleiter und Erdreich abhängig. In der Praxis wird sich die Fehlerstromaufteilung (zwischen Erdreich und Schirm) aufgrund der thermischen Wirkung (durch Abschmelzen des Kabelschirmgeflechtes durch die Lichtbogeneinwirkung) mutmaßlich zum Negativen (bezüglich Schritt- bzw. Berührungsspannung) verändern.

Kabelfehler bei Kabel mit nicht beidseitig aufgelegtem Kabelschirm bzw. Kabel ohne Schirm (Abbildung 5, unten):

Dieses Fehlerszenario stellt den Worst-Case-Fall dar. Wie aus dem Verlauf des Erdoberflächenpotentials zu entnehmen ist, gibt es ein lokales Maximum im Erdoberflächenpotential über der Fehlerstelle von ca. 800 V. Die fehlernahen Erdungsanlagen des Globalen Erdungssystems nehmen hierbei nur einen geringen Anteil des Fehlerstromes auf und verteilen diesen über die Erdungsanlage, den PEN-Leiter und andere mit dem Erdungssystem verbundenen Leiter, wodurch es zur Potentialanhebung aller verbunden Anlagenteile kommt (Längsspannungsabfälle vernachlässigt). Der Effekt ist maßgeblich von der Geometrie des Gesamtsystems abhängig, allgemein zeigt sich jedoch, dass das Globale Erdungssystem nur einen sehr geringen reduzierenden Effekt auf das Erdoberflächenpotential und somit auf diese lokal auftretenden Schritt- bzw. Berührungsspannungen hat.

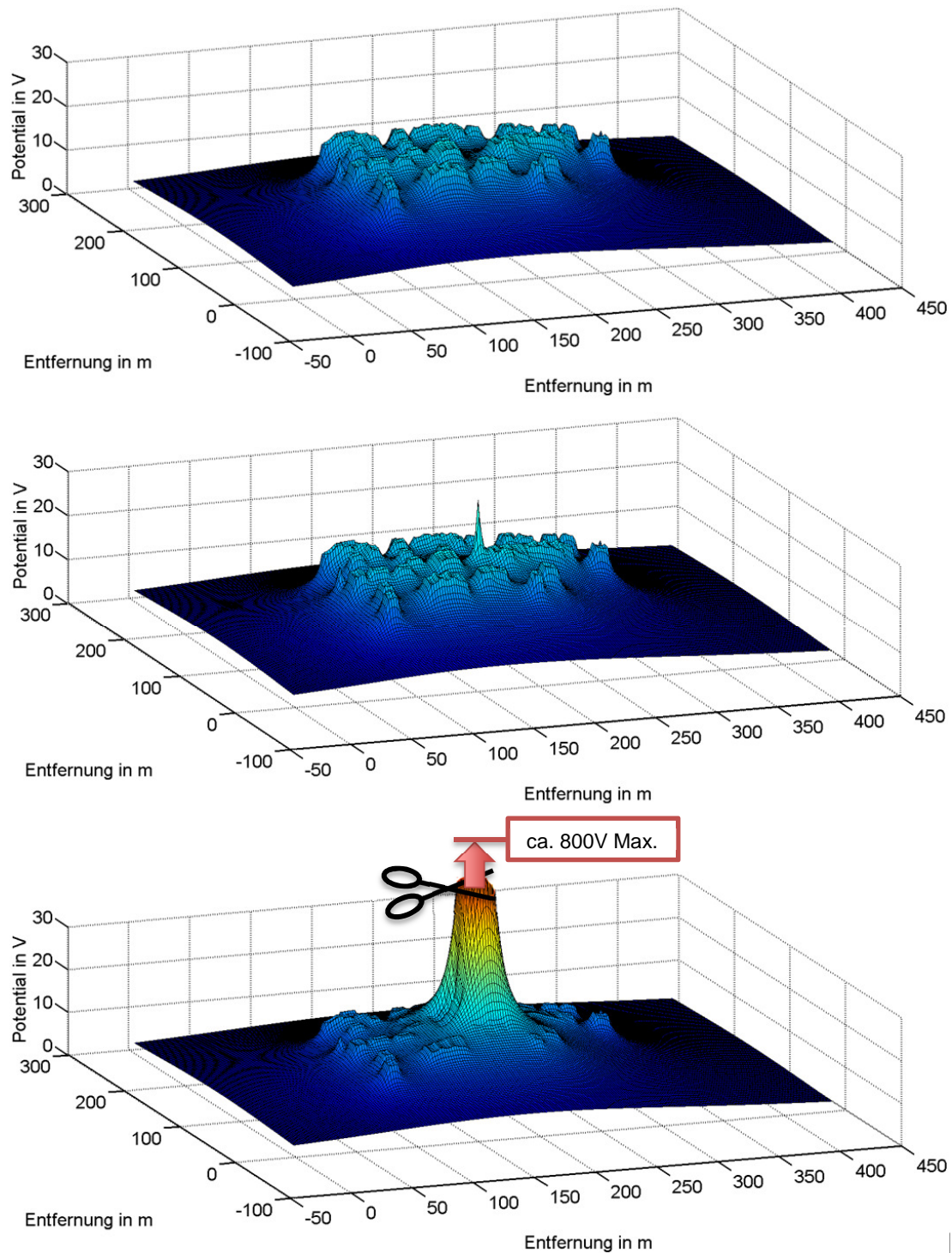


Abbildung 5: Erdoberflächenpotentiale für Stationsfehler (oben), Kabelfehler mit wirksamen Schirm (Mitte), Kabelfehler ohne Schirm (unten), bei einem Fehlerstrom von 60A und einem spezifischen Erdwiderstand von $100 \Omega m$

4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass in Globalen Erdungssystemen im städtischen Raum bei Stationsfehlern, auch unter der Einwirkung von Strömen im kA-Bereich die normativ zulässigen Grenzen hinsichtlich Schritt- bzw. Berührungsspannung meist eingehalten werden können, wenn die Stationen, wie heute meist üblich, mit Kabelschirmen oder Begleiterdern verbunden sind und der Fehlerstromkreis im Wesentlichen über diese Leitungen geschlossen ist. Somit kann in vielen Fällen durch Einsatz von alternativen Fehlerortungsverfahren (Sternpunktbehandlung) die Netzzuverlässigkeit erhöht und die Zeit der Versorgungsunterbrechung reduziert werden. Und dabei entfällt die Notwendigkeit bestehende Erdungsanlagen, welche im Globalen Erdungssystem liegen, größeren Adaptierungsarbeiten zu unterziehen (vorhandene Stromtragfähigkeit des Erdungssystems vorausgesetzt). Bei Kabelfehlern, wo im Worst-Case-Fall der gesamte Fehlerstrom in das Erdreich fließt (kein Kabelschirm zur Fehlerstromrückleitung vorhanden oder der Kabelschirm infolge eines stehenbleibenden Fehlers ausgebrannt), ist jedoch auch in Globalen Erdungssystemen mit hohen Schritt- und Berührungsspannungen zu rechnen, obwohl kleinere Erderspannungen im Vergleich zu nicht Globalen Erdungssystemen auftreten. Somit wird im Beitrag gezeigt, dass bei Kabelfehlern das Globale Erdungssystem, abhängig von der Geometrie des Erdungssystems sowie der Fehlerstromaufteilung, eine nur sehr geringe Potentialausgleichwirkung haben kann.

Durch die hohen Fehler- bzw. Fehlerortungsströme kann es jedoch durch induktive Kopplung zu unzulässig hohen Spannungsinduktionen z.B. in IKT-Leitungen kommen. Dies kann einerseits zur Reduktion der Datenübertragungsgeschwindigkeit, bis hin zur Störungen von Kommunikationswegen und andererseits zur Personengefährdung führen.

5 Ausblick

Im Rahmen weiterer Untersuchungen gilt es noch folgende Punkte zu behandeln:

1. Auswirkungen von Längsspannungsabfällen innerhalb des Erdungssystems auf das Erdoberflächenpotential und die Schritt- bzw. Berührungsspannungen
2. Analyse der tatsächlichen Fehlerstromaufteilung bei Kabelfehlern durch Modellierung der Fehlerstelle (inkl. deren zeitlichen Verhaltens) sowie Verifikationsmessungen

6 Literatur

- [1] Ausfall- und Störungsstatistik für Österreich 2013, <http://www.e-control.at/documents/20903/-/-/fbf0a5e3-73d4-4b23-86cb-98631c108806>, Zugriff: 10.01.2016
- [2] VDE Störungs- und Verfügbarkeitsstatistik 2007, http://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/versorgungsqualitaet/Documents/FNN_SVS_broschuere_2007.pdf, Zugriff: 10.01.2016
- [3] ÖVE/ÖNORM E 8383, Ausgabe 2000-03-01, Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV
- [4] R. Iskra, E. Schmutzner, Programm OBEIN2S, Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, 1994
- [5] M. Lindinger, „Nachweis globaler Erdungssysteme durch Messung und Berechnung von verteilten Erdungsanlagen“, Dissertation, Technische Universität Graz, 2012
- [6] T. Mallits, Einflussfaktoren auf die Stromaufteilung, Berühr- und Schrittspannung im Erdschlussfall, ETG-Fachtagung Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV, Nürnberg 2014