

Erdschlüsse bei Mittelspannungskabeln und die elektrische Beeinflussung im Bereich von Swimmingpools

Katrin FRIEDL , Benjamin JAUK , Lothar FICKERT, Robert SCHÜRHubER

Institut für Elektrische Anlagen und Netze, TU Graz, Inffeldgasse 18, 8010 Graz,
iean.tugraz.at

Kurzfassung:

In diesem Beitrag werden die Potentialunterschiede in unmittelbarer Umgebung einer Fehlerstelle von 20-kV- und 30-kV-Kabel in kompensierten Mittelspannungsnetzen hinsichtlich Personengefährdung mit dem Fokus auf eventuell nahegelegene private Swimmingpools analysiert. Für eine Anhebung des Potentials an der Erdoberfläche und somit für eine etwaige Gefährdung durch eine Berührungsspannung ist nur jener Strom verantwortlich, der von der Fehlerstelle über das umliegende Erdreich zur Quelle zurückfließt. Dieser Strom wird einerseits durch die Impedanz der Fehlerstelle und des Netzes begrenzt, bzw. durch die vorhandenen Kabelschirme reduziert. Die Potentialverschleppung über die Kabelbegleiter stellen bei Erdschlüssen ein zweites Gefährdungspotential dar.

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen ist bei inneren Fehlern von Mittelspannungskabeln (20 kV, 30 kV), die zu einem dauerhaften Erdschluss in kompensierten Netzen führen, KEINE Gefahr für Personen hinsichtlich unzulässiger Körperströme bzw. Potentialdifferenzen (Berührungsspannungen, Schrittspannungen) zu erwarten, unabhängig davon, ob ein privater Pool in der Nähe ist, oder nicht.

Ebenso ist in den typischen vorkommenden Netzen und Beeinflussungssituationen davon auszugehen, dass durch Potentialverschleppungen von Kabelbegleitern es zu keiner Gefährdung von Personen kommt, insbesondere dann, wenn die Erdungsspannung der angeschlossenen Erdungsanlage kleiner dem Vierfachen der zulässigen Berührungsspannung ist.

Keywords: Mittelspannungskabel; Erdungsanlagen, Erdschlüsse; Kabelfehler; Schutz vor elektrischem Schlag; Berührungsspannungen; Kabelschirme; Barfußbereich

1 Einleitung

Infrastruktur, wie z.B. Mittelspannungskabeltrassen und Wohnbereiche wachsen immer näher zusammen und gleichzeitig steigt die Beliebtheit von privaten Swimmingpools. Der Fokus dieser Arbeit bezieht sich auf ein mögliches Risiko einer Personengefährdung, wenn ein Fehler in einem Mittelspannungskabel auftritt und sich Personen in unmittelbarer Umgebung davon im Bereich eines Schwimmbades aufhalten.

In Österreich werden die Mittelspannungsnetze überwiegend mit Erdschlusskompensation betrieben. Dies bedeutet, dass im Falle eines einpoligen Erdschlusses, verursacht durch Isolationsschäden oder atmosphärischen Einflüssen, am Fehlerort nur ein – im Vergleich zur starren/niederohmigen Sternpunktterdung – geringer Fehlerstrom fließt. Gleichzeitig ist jedoch eine höhere Fehlerdauer zulässig.

Der Anteil des Fehlerstroms, welcher direkt übers Erdreich zurück zur Quelle fließt, verursacht eine Anhebung des Potentials an der Erdoberfläche, wodurch Personen im Nahbereich des Erdeintritts Schritt- und Berührungsspannungen abgreifen können. Diese führen in weiterer Folge zu Körperströmen, welche zu Herzkammerflimmern führen können. Es ist seitens Netzbetreiber sicherzustellen, dass das Risiko einer Gefährdung von Personen auf ein vertretbares Maß beschränkt wird. Nach der EN 50522[2] ist das Risiko der Gefährdung vertretbar, wenn die Spannungen die zulässige Berührungsspannung, abhängig von der Fehlerdauer nicht überschreiten.

Im Bereich von Swimmingpools ist davon auszugehen, dass sich Personen auch barfuß aufhalten. Im Vergleich zu Personen mit Schuhwerk tritt in Berührungsszenarien ein niedrigerer Übergangswiderstand auf. Dadurch sind auftretende Spannungsunterschiede potentiell gefährdender. Für die Bestimmung der auftretenden Risiken werden zwei mögliche Fehlerszenarien sowie die wesentlich beeinflussenden Größen analysiert:

- Erdschluss durch Kabelfehler im Bereich eines Swimmingpools
- Erdschluss im Bereich einer Ortsnetzstation oder Kabelaufführungsmast und Potentialverschleppung über einen Kabelbegleiterder

Die wesentlichen Einflussparameter werden hinsichtlich der Auswirkungen auf den Fehlerstrom sowie auf Schritt- und Berührungsspannungen untersucht.

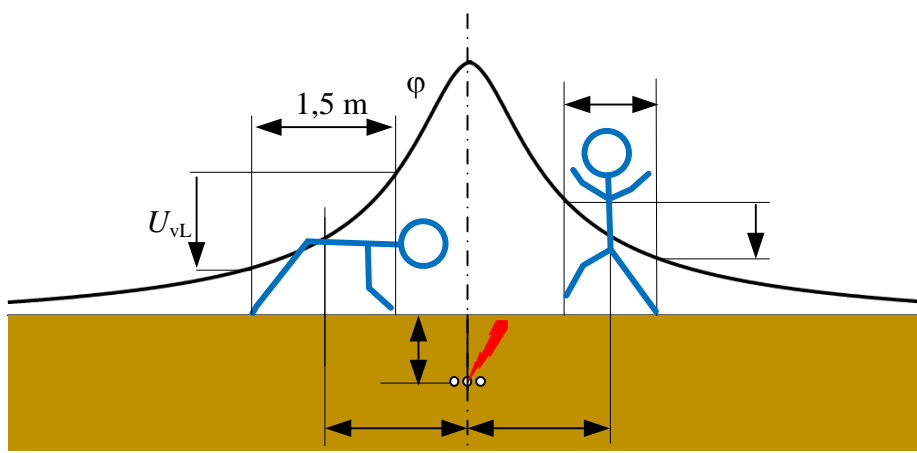


Abbildung 1: Auftretende Berührungsspannungen (Person in Liegestützposition U_{vL} , links) und Schrittspannungen (stehende Person U_{vS} , rechts) im Falle eines Inneren Fehlers eines Mittelspannungskabels

Für die Beurteilung des vertretbaren Risikos werden die zulässigen Grenzwerte für die Berührungsspannung U_{Tp} gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 [2] herangezogen. Diese ist abhängig von der Fehlerdauer t_f .

Die Berührungsszenarien im Bereich eines erdverlegten Kabels beschränken sich auf die in Abbildung 1 dargestellten Möglichkeiten, also auf Schrittspannungen (stehende Person) und auf eine Berührungsspannung abgegriffen in einer Liegestützposition. Eine direkte Berührung der Fehlerstelle wird ausgeschlossen, da Kabelbegleiter der bzw. das beschädigte Mittelspannungskabel mit Erdreich überdeckt ist.

Erdschlüsse werden nach erfolgreicher Fehlerortung sofort abgeschaltet, je nach Betriebsphilosophie der erdschlusskompensierten Netze ist es, aufgrund der im Vergleich zu starr geerdeten Netzen niedrigen Fehlerströme, jedoch auch möglich, diese Netze bei länger anstehendem Erdschluss weiter zu betreiben. Daher ist für die Fehlerdauer bei erdschlusskompensierten Netzen mehr als 10 s anzunehmen.

Für Fehlerdauern von größer als 10 s ist in [2] die zulässige Berührungsspannungen mit 80 V angegeben, welche sich allerdings aus dem Mittelwert für verschiedene Berührungsszenarien ergibt. Für das Berührungsszenario Liegestütz (= Berührung beide Hände und Füße) ergibt sich mit der in Anhang A von [2] angegebenen Methode eine zulässige Berührungsspannung von 58 V. Von dieser Berührungsspannung kann mit Hilfe der Ausbreitungswiderstände des Standorts, also dem Übergangswiderstand zwischen Hand bzw. Fuß, auf die zulässige Leerlaufberührungsspannung umgerechnet werden, also auf jene Spannung die auftreten darf, wenn noch keine Berührung stattfindet. Diese ist dann wieder vom spezifischen Bodenwiderstand des Standorts abhängig.

In weiterer Folge werden bei den zwei wesentlichen Szenarien (Kabelfehler, Potentialverschleppung) die auftretenden Leerlauf-Berührungsspannungen in den Fehlerszenarien berechnet und mit den zulässigen Werten für vertretbares Risiko verglichen.

Dabei wird jeweils ein Basisszenario festgelegt, von dem ausgehend einzelne Parameter variiert werden um so die maximal auftreten Berührungsspannungen zu ermitteln.

2 Kabelfehler

Mittelspannungskabel sind meist mit einem Kabelschirm ausgestattet. Tritt ein Isolationsfehler auf, so fließt der Fehlerstrom meist vom Innenleiter über den (zumindest auf einem Ende geerdeten) Kabelschirm zurück zur Quelle. Liegt die Fehlerstelle jedoch blank im Erdreich auf, was z.B. durch die thermische Wirkung den entstehenden Lichtbogen bei länger andauernden Fehlern entstehen kann, fließt ein Teil des Stromes, der Erdungsstrom I_E über diese blanke Stelle direkt in das Erdreich und verursacht an der Erdoberfläche Schritt- und Berührungsspannungen.

Der tatsächlich über das Erdreich fließende Strom ist damit abhängig von:

- Ausbreitungswiderstand der Fehlerstelle, welcher wiederum vom spezifischen Bodenwiderstand des umgebenen des Erdreichs sowie von der Größe der blanken Fehlerstelle abhängt.
- Erdungsverhältnissen der beiden Enden des Kabelschirms

- Lichtbogenwiderstand zwischen Innenleiter und Kabelschirm
- Maximalen Fehlerstrom

Der Verlauf des Potentials an der Erdoberfläche einer Fehlerstelle eines Kabels kann bei bekanntem Erdungsstrom I_E in einem homogenen Erdreich mit dem spezifischen Bodenwiderstand ρ_E in guter Näherung mit einem Kugelerder in einer Tiefe T modelliert werden.

Für das Potentials φ ergibt sich nach [5] somit an der Erdoberfläche im horizontalen Abstand a zur Fehlerstelle:

$$\varphi = \frac{I_E \rho_E}{2\pi \sqrt{a^2 + T^2}}$$

Die Leerlauf-Berührungsspannungen berechnen sich aus den Potentialen mit:

$$U_v(a) = \varphi\left(a - \frac{S}{2}\right) - \varphi\left(a + \frac{S}{2}\right) = \frac{I_E \rho_E}{2\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{\left(a - \frac{S}{2}\right)^2 + T^2}} - \frac{1}{\sqrt{\left(a + \frac{S}{2}\right)^2 + T^2}} \right)$$

S ist dabei der Abstand zwischen den beiden Berührungspunkten einer Person. Der Abstand a ist weiters gemäß Abbildung 2 der Abstand von der Fehlerstelle zum Mittelpunkt der Person, entweder bei einem Schritt (1 m), oder im Liegestütz (1,5 m).

In Abbildung 2 ist der Verlauf des Oberflächenpotentials φ und auch der Verlauf der sich daraus ergebenden Leerlauf-Liegestützspannungen und -Schrittspannungen angegeben. Dabei ist die Fehlerstelle des Kabels bei $a=0$ m. Die Kurven wurden für ein vorerst angenommenes Produkt $I_E \rho_E = 100$ Vm berechnet und sind für Verlegetiefen T des Kabels von 0,6 m bzw. 0,8 m, dargestellt.

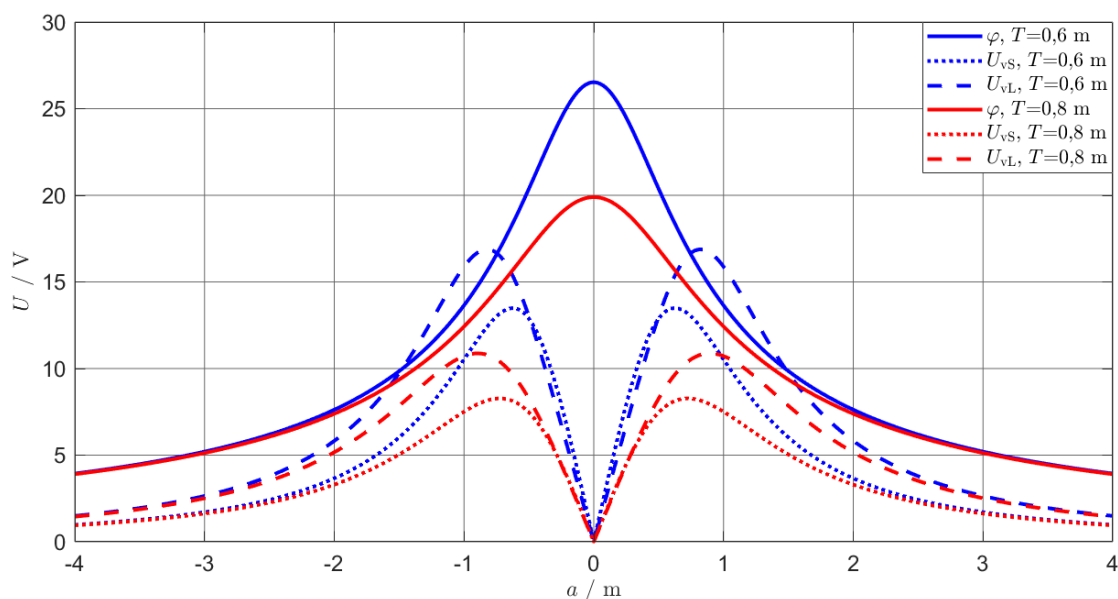


Abbildung 2: Verlauf des Oberflächenpotentials φ , der Leerlauf-Liegestützspannungen U_{vL} ($S=1.5$ m) sowie für die Leerlauf-Schrittspannung U_{vS} ($S=1$ m) für ein angenommenes Produkt $I_E \rho_E = 100$ Vm für 2 Tiefen T der Fehlerstelle (0,6 m und 0,8 m)

Tabelle 1 Maximale Werte des Oberflächenpotentials, der Leerlauf-Liegestützspannungen sowie der Leerlauf-Schrittspannungen für ein Produkt $I_E \rho_E = 100 \text{ Vm}$

	T=0,6 m	T=0,8 m
Oberflächenpotential φ	26,5 V	19,9 V
Max. Liegestützspannung U_{vL}	16,9 V	10,9 V
Maximale Schrittspannung U_{vS}	13,5 V	8,3 V

In Tabelle 1 sind die Maximalwerte der in Abbildung 2 dargestellten Verläufe zusammengefasst. Die wesentliche Erkenntnis: Für ein Produkt $I_E \rho_E = 100 \text{ V}$ werden die zulässigen Berührungsspannungen von 56 bzw. 80 V nicht überschritten.

In weiterer Folge ist jedoch die Frage, wie hoch das Produkt $I_E \rho_E$ in der Praxis ist. Unter der Annahme eines maximalen Restfehlerstroms bei einem 20-kV-Mittelspannungsnetz von 60 A und einem durchaus typischen spezifischen Bodenwiderstand von $100 \Omega\text{m}$ wäre die maximal auftretende Leer-Liegestützspannung bereits um dem Faktor 63 höher als in Abbildung 2 angegeben, und damit die zulässige Berührungsspannung von 56 V überschritten.

Der Erdungsstrom I_E ist jedoch aufgrund des Ausbreitungswiderstands der Fehlerstelle und der Nullimpedanz des Netzes abhängig vom spezifischen Bodenwiderstand ρ_E . Weiters hat der geerdete Kabelschirm eine reduzierende Wirkung auf den Erdungsstrom I_E . Diese reduzierende Wirkung wird jedoch durch einen Übergangswiderstand R_B zwischen Kabel und Schirm wie in [7] im Detail dargestellt, wesentlich beeinflusst.

In [7] ist weiters für das Basiszenario eines 30-kV-Netzes und einer verhältnismäßig großen blanken Fehlerstelle von 10 cm^2 und moderat geerdeten Kabelschirmen (Ausbreitungswiderstände der angrenzenden Erdungssysteme 2 bzw. 10Ω) die Abhängigkeit des Produktes $I_E \rho_E$ für verschiedene spezifische Bodenwiderstände und Übergangswiderstände R_B zwischen Kabel und Schirm in Analogie zu Abbildung 3 dargestellt.

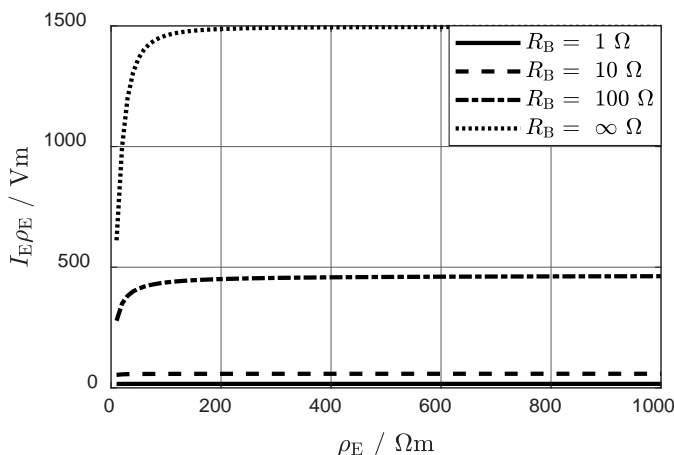


Abbildung 3 $I_E \rho_E$ in Abhängigkeit vom Übergangswiderstand R_B und vom spezifischen Bodenwiderstand ρ_E für das Basiszenario aus [7]

In Abbildung 3 ist ersichtlich, dass das Produkt $I_E \rho_E$ ab einem spezifischen Bodenwiderstand von ca. 100 Ωm weitestgehend unabhängig vom Bodenwiderstand ist und nur noch von dem Übergangswiderstand R_B abhängt.

Weiters haben Ergebnisse aus einer Orientierungs-Erdschluss-Messung ergeben, dass bei geerdeten Kabelschirmen quasi der gesamte Strom über den Schirm zurückfließt und der Übergangswiderstand R_B im Bereich kleiner 10 Ω liegt. Für eine belastbarere Aussage sind jedoch noch weitere Erdschlussmessungen notwendig.

In Abbildung 4 sind die maximal auftretenden Leerlauf-Liegestützspannungen in Abhängigkeit vom spezifischen Bodenwiderstand ρ_E sowie vom Übergangswiderstand R_B dargestellt. Weiters ist die zulässige Leerlauf-Liegestützspannung U_{vL} eingezeichnet, welche die vom spezifischen Bodenwiderstand abhängigen Ausbreitungswiderstände berücksichtigt. Es ist ersichtlich, dass für Übergangswiderstände kleiner als 100 Ω die auftretenden Leerlauf-Berührungsspannungen die zulässigen Werte nicht überschreiten.

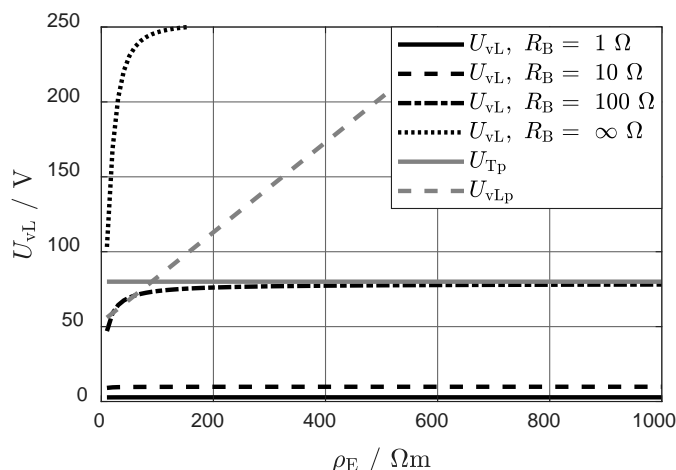


Abbildung 4: Maximale Leerlauf-Liegestützspannungen U_{vL} für das Basiszenario und Verlegetiefe $T = 0,6$ m in Abhängigkeit vom spezifischen Bodenwiderstand ρ_E und vom Übergangswiderstand R_B , U_{vLp} ... zulässige Leerlauf-Liegestützspannung [7]

In [7] ist ersichtlich, dass die anderen Parameter wie:

- Fehlerort,
- Erdungsimpedanzen der Kabelenden
- Spannungshöhe des Mittelspannungsnetzes (20 oder 30 kV)

einen untergeordneten Einfluss auf die Berührungsspannung haben, im Vergleich zum Übergangswiderstand. Selbst ein verhältnismäßig großer Übergangswiderstand von $R_B = 100$ Ω führt in der Praxis zu keinen unzulässigen Berührungsspannungen, selbst in der unüblichen Liegestützposition.

3 Potentialverschleppungen durch Begleiterder

Aufgrund der günstigen Eigenschaften auf den Gesamterdungswiderstand einer Anlage und auch als Schutz vor atmosphärischen oder mechanischen Einflüssen werden bei Mittelspannungskabel häufig Begleiterder mitgeführt. Diese Begleiterder sind normalerweise

an der Erdungsanlage der Endpunkte der Kabel, also beim Kabelaufführungsmast bzw. bei einer Ortsnetzstation, ebenso wie die Schirme, angeschlossen. Tritt bei der Anlage, an die dieser Begleiterder angeschlossen ist, ein Erdschluss auf, tritt ein Teil des Fehlerstroms durch diesen Begleiterder in das Erdreich ein, und verursacht nun auch in dessen Nahbereich eine Potentialanhebung.

In Österreich sind zwei typische Anordnungen von Begleiterder üblich. Meist wird entweder durchgehend ein Begleiterder verlegt, oder es wird nur ein Bund mit einer typischen Länge von 50 m mitverlegt, siehe Abbildung 5.

Die Gesamtimpedanz von der durchgehenden Variante ist bei sonst gleichen Bedingungen (wie z.B. Erdungsimpedanzen der angeschlossenen Erdungssysteme (ES), spezifischer Bodenwiderstand, Länge des Kabels) niedriger als die nicht durchgehend verlegte Variante. Kleinere Gesamtimpedanz bedeutet kleinere auftretende Potentiale und daher auch niedrigere auftretende Berührungsspannungen.

In dem für die Untersuchung erstellten Erdungsmodell in XGSLab [6] wird daher auch in Folge nur die nicht durchgehende Variante untersucht.

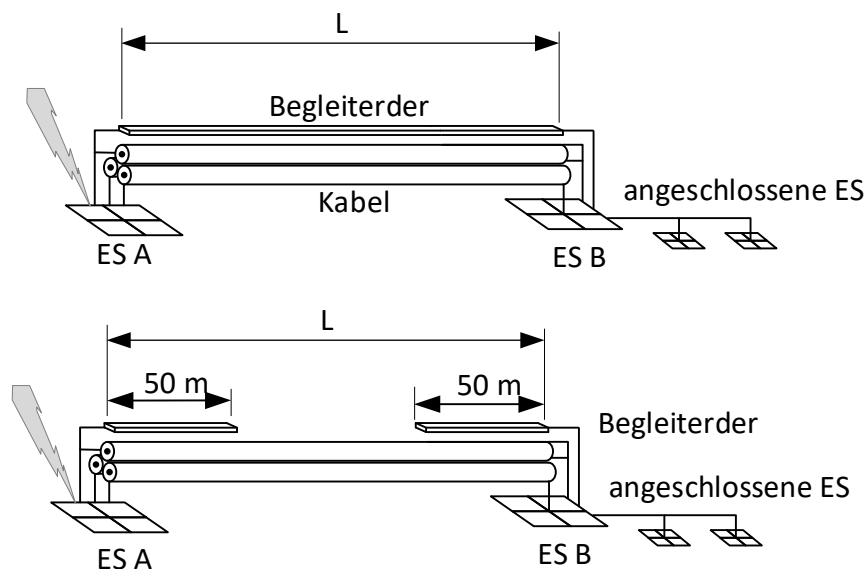


Abbildung 5: Verschleppung des Potentials durch Kabelbegleiterder.[7]

In [7] wurde das Oberflächenpotential für eine spezielle Erdungskonfiguration unter mehreren Variationen untersucht. Hier wird nun ein anderer Ansatz angewandt. Hier wird das Verhältnis des Oberflächenpotentials bzw. der auftretenden Leerlauf-Schritt- und Berührungsspannungen zur Erdungsspannung U_E untersucht. Damit kann bei bekanntem Erdungsimpedanz Z_E und Erdungsstrom I_E auf die Erdungsspannung $U_E = Z_E \cdot I_E$ einer Anlage und somit direkt auf die tatsächlich auftretenden Berührungsspannungen geschlossen werden.

In Abbildung 6 ist das auftretende Oberflächenpotential im Verhältnis zu dieser Erdungsspannung in % in Form von Isolinien dargestellt. Der Kabelbegleiterder verläuft bei $y=0$ m von $x=0$ m bis $x=50$ m. Es ist ersichtlich, dass die höchsten Potentiale an der Erdoberfläche im Bereich des Begleiterders auftreten. In Abbildung 7 ist nun gleichermaßen die auftretende Leerlauf-Schrittspannung und in Abbildung 8 die Leerlauf-Liegestützspannung

als Verhältnis zur Erdungsspannung in % angegeben. Hier ist bemerkenswert, dass direkt über dem Kabel keine Potentialunterschiede auftreten, aber gerade an den Enden (bei 0 m und 50 m) des Begleiterders die höchsten Spannungen auftreten.

Die Maximalwerte des Oberflächenpotentials sowie der Schritt- und Berührungsspannungen sind für verschiedene Längen L des Begleiterder sowie für zwei verschiedene spezifische Bodenwiderstände in Abbildung 8 zusammengefasst.

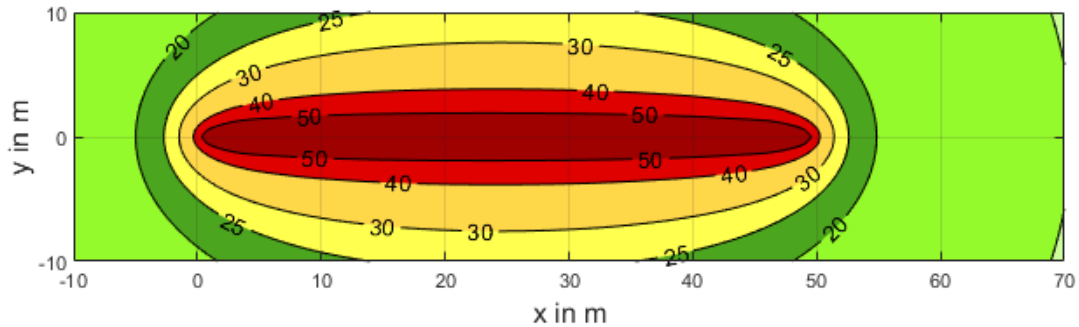


Abbildung 6: Potential an der Oberfläche in Bereich eines 50 m langen Begleiterders, Tiefe 0,6 m im Verhältnis zur Erdungsspannung in %, mit einem spezifischen Bodenwiderstand von $100 \Omega m$ $\max\left(\frac{\varphi}{U_E}\right) = 62,8 \%$

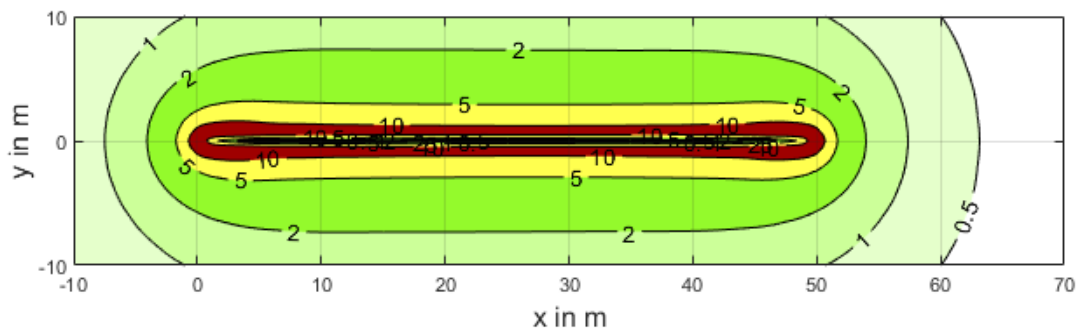


Abbildung 7: Schrittspannungen im Bereich eines 50 m langen Begleiterders, Tiefe 0,6 m im Verhältnis zur Erdungsspannung in %, mit einem spezifischen Bodenwiderstand von $100 \Omega m$, $\max\left(\frac{U_{vS}}{U_E}\right) = 13,9 \%$

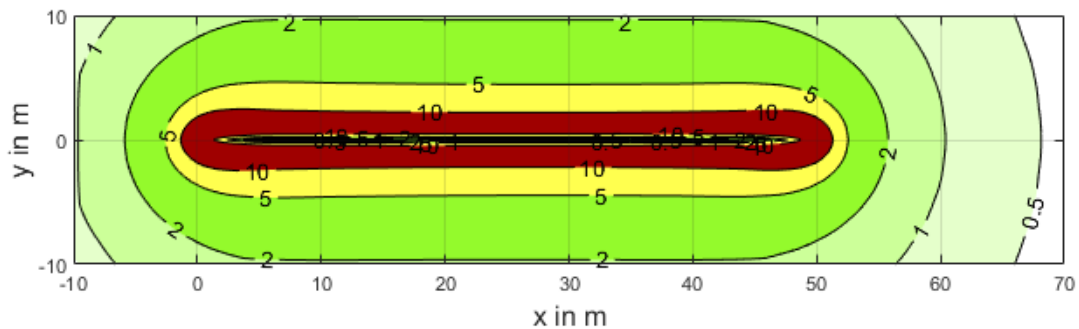


Abbildung 8: Liegestützspannungen im Bereich eines 50 m langen Begleiterders, Tiefe 0,6 m im Verhältnis zur Erdungsspannung in %, mit einem spezifischen Bodenwiderstand von $100 \Omega\text{m}$ $\max\left(\frac{U_{vL}}{U_E}\right) = 18,7\%$

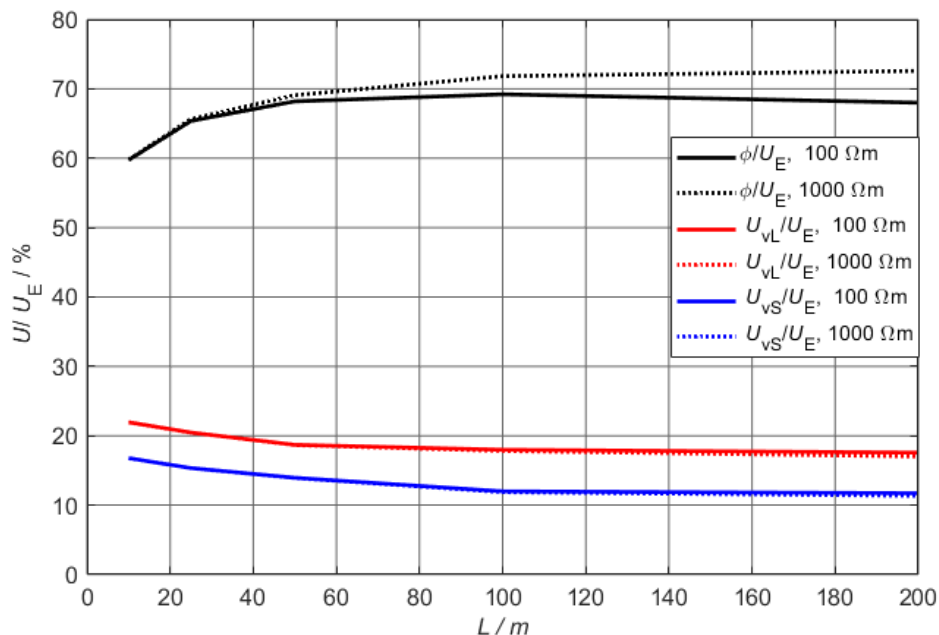


Abbildung 9: Maximal auftretende Potentiale an der Erdoberfläche und Berührungsspannungen im Nahbereich des Begleiterders im Verhältnis zur auftretenden Erdungsspannung in % für verschiedene Längen L von Begleiterdern bei 2 verschiedenen spezifischen Bodenwiderständen 100 und 1000 Ωm

Abbildung 8 kann für die Abschätzung der maximal auftretenden Liegestützspannungen bei Kenntnis der Erdungsspannung bzw. Erdungsimpedanz der Ortsnetzstation bzw. Kabelaufführungsmast herangezogen werden. Man erkennt, dass maximal 25 % der Erdungsspannung als Liegestütz- oder Schrittspannung auftreten kann. Umgekehrt bedeutet das, dass bei einer Anlage, welche eine Erdungsspannung $U_E < 4 \cdot U_{Tp}$ nicht überschreitet, keine gefährlichen Berührungsspannungen in dem Bereich der daran angeschlossene Kabelbegleiterder hervorrufen kann.

Gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 [2] ist eine Dimensionierungsgrenze der Erdungsanlage $U_E < 4 \cdot U_{Tp}$ festgelegt. Solange diese Grenze unterschritten wird, kann mit einfachen Ersatzmaßnahmen die Einhaltung von Berührungsspannungen im Bereich der Anlage nachgewiesen werden. Ist die Erdungsspannung größer als $4 \cdot U_{Tp}$ müssen als Erkenntnis dieser Untersuchung jedenfalls auch die Berührungsspannungen durch Potentialverschleppungen im Bereich der Kabelbegleiterder untersucht werden.

4 Ergebnisse

In den typischen vorkommenden kompensierten Mittelspannungsnetzen und Beeinflussungssituationen ist von keiner Gefährdung von Personen im unmittelbaren Bereich eines Kabelfehlers auszugehen. Einzig das Zusammentreffen von mehreren ungünstigen Faktoren, wie schlechte Erdungsverhältnisse mit einem hohen spezifischen Bodenwiderstand könnte zu einer Gefährdung von Personen in Liegestützposition führen. In solchen Fällen ist eine genauere Untersuchung notwendig. Diese Untersuchung könnte z.B. die Überprüfung

durch Messung der Gesamterdungsimpedanz bzw. Berechnung der Erdungsspannung sein. Kann nachgewiesen werden, dass die Erdungsspannung eines Kabelaufführungsmastes oder Ortsnetzstation den Wert $4 \cdot U_{Tp}$ nicht überschreitet, kann davon ausgegangen werden, dass im Bereich von daran angeschlossenen Begleiterdern keine Gefahr ausgeht.

5 Referenzen

- [1] ÖVE B 1:1976, Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV, Wien: OVE, 1976.
- [2] ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV, Wien: OVE.
- [3] IEC 60479-1:2018, Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects, 2018
- [4] ÖVE-EH 41:1987, Erdungen in Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV, Wien.
- [5] F. Ollendorff, Erdströme, Basel: Birkhäuser, 1969
- [6] S. Srl, XGSLab TM UserGuide (Release 9.6.1-02/21), Bassano del Grappa, Italy, 2021.
- [7] Friedl, Hirtler et al., Erdschlüsse bei Mittelspannungskabeln und die elektrische Beeinflussung im Bereich von Swimmingpools, e&i 01/2022, in press.