

Die Bestimmung induzierter Spannungen und Ströme verursacht durch parallel geführte Leitungssysteme

Christian Raunig, Ernst Schmutzner, Lothar Fickert, Wolfgang Emmer

Institut für Elektrische Anlagen / TU Graz, Inffeldgasse 18/I A-8010 Graz,
+43(0)316/873-7552, christian.raunig@TUGraz.at, www.ifea.tugraz.at

Kurzfassung: Die vermehrte Konzentration von Leitungssystemen zur Energieübertragung auf einer gemeinsamen oder mehreren eng benachbarten Trasse(n) führt zu Wechselwirkungen zwischen den betroffenen Übertragungssystemen und benachbarten elektrisch leitfähigen Strukturen wie z.B. Telekommunikationseinrichtungen oder Niederspannungsinstallationen. Speziell in urbanen Gebieten, werden vermehrt Energiekorridore gefordert, da oft räumliche Einschränkungen bestehen und der Druck der Öffentlichkeit gegen Leitungsprojekte steigt. Vielerorts kommt es auch zu einer Bündelung von Anlagen zur Übertragung von elektrischer Energie der allgemeinen Stromversorgung und elektrischer Bahnen mit Öl- und Gas-Pipelines sowie Signal- und Sicherheitseinrichtungen, welche nicht gestört werden dürfen, um sicher und zuverlässig zu arbeiten.

In diesem Beitrag zeigen die Autoren einen Überblick über den aktuellen Stand der Berechnungsmöglichkeiten der induktiven Beeinflussung, im Speziellen von induzierten Spannungen und Strömen, die sich bei praxisnahen Konfigurationen ergeben und schlagen grundsätzliche Kompensationsmaßnahmen zur Reduktion der induktiv eingekoppelten Spannungen und Ströme vor.

Die Berechnung der Beeinflussungswirkung im vorliegenden Beitrag erfolgt über das institutseigene neu programmierte Programm IBEL-GUI (Induktive Beeinflussung Elektrischer Leitungen-Graphical User Interface). Dieses verwendet für die Bestimmung der Selbst- und Gegenimpedanzen für Leiter mit Erdrückleitung (Freileitungen, Kabel und passive beidseitig geerdete Kompensationsleiter) das bekannte Modell von Carson und Pollaczek. Durch die Hybridisierung der Impedanzmatrix der untersuchten Leitungskonfiguration nach beeinflussenden und beeinflussten (aktiven und geerdeten) Leitern werden die Auswirkungen von unterschiedlichen Konfigurationen von aktiven Leitern, sowie des Einsatzes von Reduktionsleitern gezeigt und typische praxisrelevante Fälle, wie z.B. induzierte Spannungen in Steuerleitungen und der Einfluss von Reduktionsleitern und Reduktionsleitersystemen (z.B. ausgedehnte Erdungsanlagen oder globalen Erdungssystemen), grundsätzlich demonstriert.

Keywords: Induktive Beeinflussung, Reduktionswirkung, induzierte Spannungen und Ströme

1 Einleitung

Durch die vermehrte parallele Führung von Energie-, Telekommunikations- und Steuerleitungen in gemeinsamen oder engbenachbarten Trassen, treten durch die niederfrequente elektromagnetische Wechselwirkung ohmsche, kapazitive und induktive Kopplungen auf [7]. Ein steigender Energiebedarf, z.B. für die Elektromobilität, führt zu höheren Transportkapazitäten und Netzausbauten, was in weiterer Folge zu höheren beeinflussenden Strömen (die Beeinflussungsquelle) führt.

Die induktive Beeinflussung führt zu induzierten Spannungen und Strömen in benachbarten leitfähigen Strukturen, weshalb z.B. zur Sicherstellung des reibungslosen Betriebes von Signal- und Steuerleitungen die induzierten (Differenz-)Spannungs- und Strompegel bestimmt und gegebenenfalls Reduktionsmaßnahmen getroffen werden müssen. Auf eine entsprechende Dimensionierung von Reduktionsleitern und Kabelschirmen muss ebenfalls geachtet werden, da hier durch die Kopplung im Normalbetrieb sowie im Fehlerfall von Hochspannungsanlagen hohe Ströme induziert werden. Weiter ist die Bestimmung der induzierten Leiter-Erde-Spannungen speziell für die Abschätzung und Beurteilung der Personengefährdung (Schritt- und Berührungsspannungen) in Bereichen induktiv beeinflusster Arbeitsbereiche nötig.

2 Methodik

Das institutseigene Programm IBEL-GUI [8] basiert auf der Berechnung der Selbst- und Gegenimpedanzen für Leiter mit Erdrückleitung nach dem grundlegenden Ansatz von Carson [1], Pollaczek [2] und Dubanton [3] und bietet die Möglichkeit auf weitere Formelsysteme, wie sie z.B. bei größeren Beeinflussungsabständen von Nöten sind, auszuweichen. Mit Hilfe einer grafischen Oberfläche können verschiedene Leiterkonfigurationen (wie z.B. Drehstrom-, Bahnstrom-, Einfach-, Reduktionsleiter, etc.) für Freileitungs- und Kabelbeeinflussungen modelliert werden und dadurch die induzierten Spannungen und Ströme in der Leiterkonfiguration bestimmt werden. Die verwendeten Beziehungen für die Selbst- und Koppelimpedanzen zum Aufbau der Impedanzmatrix werden nachfolgend angegeben:

2.1 Selbstimpedanz einer Leiter-Erde-Schleife mit Erdrückleitung

Die Selbstimpedanz einer Leiter-Erde-Schleife mit Erdrückleitung über Erde kann mit der folgenden Beziehung (1) bestimmt werden:

$$\underline{Z}_{ii} = (r_e - \Delta_{ii} + R) + j \cdot (x_{ii} + \Delta_{ii} + x_{(i \bullet)j}) \quad (1)$$

Da bei Leitern, die im Boden liegen, $h = 0$ gesetzt werden kann, fehlt im Gegensatz zur Formel (1) die Höhenkorrektur:

$$\underline{Z}_{ii} = (r_e + R) + j \cdot (x_{ii} + x_{(i \bullet)j}) \quad (2)$$

Für die Selbstreaktanz X_{ii} und die innere Reaktanz $X_{(i \bullet)j}$ eines Rund- bzw. Verbundleiters gelten die folgenden Beziehungen (3):

$$X_{ii} = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{D_e}{r_i} \quad X_{(i\bullet)j} = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\mu_r}{4} \quad (3)$$

Bei Kabelschirmen, müssen aufgrund der Hohlleiterausführung für die Selbstreaktanz X_{ii} und für die innere Reaktanz $X_{(i\bullet)j}$ die folgenden Beziehungen (4) herangezogen werden:

$$X_{ii} = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{D_e}{r_a \cdot e^{\frac{4}{3} \left(\frac{r_i(r_a-r_i)}{(2r_i+r_a-r_i)^2} \right)}} \right) \quad X_{(i\bullet)j} = \frac{\omega\mu_0\mu_r}{8\pi} \cdot \left[1 - \frac{2r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} + \left(\frac{2r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \right)^2 \cdot \ln \frac{r_a}{r_i} \right] \quad (4)$$

$D_e = \frac{\sqrt{2e}}{\gamma} \delta_E$	äquivalenter Abstand zum Erdrückleiter in m
f	Frequenz in Hz
h	Höhe des Leiters über dem Erdboden in m
$r_e = \frac{\omega\mu_0}{8}$	Erdwiderstand je Längeneinheit in Ω/m
R	ohmscher Widerstand des Leiters je Längeneinheit in Ω/m
r_a	Außenradius eines Hohlleiters in m
r_i	Innenradius des (Hohl-) Leiters in m
X_{ii}	Selbstreaktanz der Leiter-Erde-Schleife je Längeneinheit in Ω/m
$X_{(i\bullet)j}$	innere Reaktanz des Leiters i je Längeneinheit in Ω/m
$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho}}$	in $1/m$
$\gamma = 1,7811$	Bessel-Konstante
$\Delta_{ii} = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{4h}{3\delta_e}$	Höhenkorrektur in Ω/m
$\delta_E = \frac{1,8514}{\alpha}$	Erdstromtiefe bei unendlich langem Leiter in m
$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$	Induktionskonstante in Vs/Am
μ_r	relative Permeabilität
ρ	spezifischer Bodenwiderstand in Ωm
$\omega = 2\pi f$	Kreisfrequenz in $1/s$

2.2 Gegenimpedanz einer Leiter-Erde-Schleife mit Erdrückleitung

Für induktive Kopplungen zwischen Freileitungen, Kabeln, Kabelschirmen, Erdseilen, Reduktionsleitern und isolierten Leitern wird die Näherung (5) von Dubanton [3], [4] verwendet:

$$\underline{Z}_{ik} = j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{(h_i + h_k + 2\underline{p})^2 + x_{ik}^2}}{d_{ik}} \right) \quad \text{mit } \underline{p} = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0/\rho}} \quad (5)$$

$d_{ik} = \sqrt{x_{ik}^2 + (h_i - h_k)^2}$	Distanz zwischen den gekoppelten Leitern in m
h_i	Höhe des induzierenden Leiters in m
h_k	Höhe des induzierten Leiters in m
\underline{p}	komplexe Erdstromtiefe in m
x_{ik}	horizontale Distanz zwischen den gekoppelten Leitern in m

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden zur Veranschaulichung der induzierten Spannungspegel sowie der Auswirkung von globalen Erdungssystemen, Reduktionsleitern etc. zwei Demonstrationsbeispiele angeführt. Dabei wird unter einer Drehstromfreileitung und einer -kabelleitung unterschieden. Für die beiden Beispiele gelten allgemein $f_N = 50 \text{ Hz}$, $U_N = 110 \text{ kV}$, $I_N = 1000 \text{ A}$ (um jeweils 120° phasenverschoben) und $\rho = 300 \Omega\text{m}$.

3.1 Beispiel „Drehstromfreileitung“

Im Folgenden wird ein Beispiel mit vier verschiedenen Varianten zur Veranschaulichung der induzierten Spannungen, hervorgerufen durch eine 2-systemige 110-kV-Drehstromfreileitung (siehe Leitungsanordnungen), angeführt. Es werden die induzierten Spannungen in einem in unterschiedlichen Höhen (1 m, 3 m und 5 m) angenommenen Telekommunikationsleiter (TK) gezeigt.

Für die Drehstromfreileitung werden die folgenden Kenndaten gewählt:

	Systemzustand	Temperatur in °C	Durchhang in m	Anzahl der Bündelleiter	Abstand der Bündelleiter	Ohmscher Widerstand in Ω/km	Spezifische innere Reaktanz in Ω/km	Leiterradius in mm
Freileitungssystem	aktiv	20	11,97	2	0,4	0,0526	0,0157	16,2
Erdseil	beidseitig geerdet	20	11,97	1	–	0,1400	0,0105	11,7

Tabelle 1: Freileitungs- und Erdseildaten für das erste Beispiel

	Systemzustand	Temperatur in °C	Querschnitt in mm^2	Spezifischer Widerstand in $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Relative Permeabilität Vs/Am	α in K^{-1}	Material
TK	einseitig geerdet	20	10	0,0168	0,9999936	0,0039	Kupfer
Reduktionsleiter	beidseitig geerdet	20	95	0,0168	0,9999936	0,0039	Kupfer

Tabelle 2: Daten des Telekommunikationsleiters und Reduktionsleiters für das erste Beispiel

Die Grundkonfiguration der Drehstromfreileitung, mit der die anderen drei Varianten verglichen werden, ist nach einem Tonnenmastprofil (Abbildung 1) angeordnet. Sie besteht aus zwei dreiphasigen Systemen und einem Erdseil. Die Telekommunikationsleitung wird auf den vorher erwähnten spezifizierten Höhen horizontal von -60 m bis 60 m bezogen auf die Mastachse verschoben und die positionsabhängigen Werte in einer Diagrammkurve dargestellt.

Im ersten Vergleich wird die Reduktionswirkung eines Reduktionsleiters betrachtet. Der Grundkonfiguration wird ein Reduktionsleiter hinzugefügt (siehe Abbildung 1), der in 10 cm Abstand über der Telekommunikationsleitung mitgeführt wird, d.h., dass der Reduktionsleiter relativ zur Telekommunikationsleitung die Position beibehält.

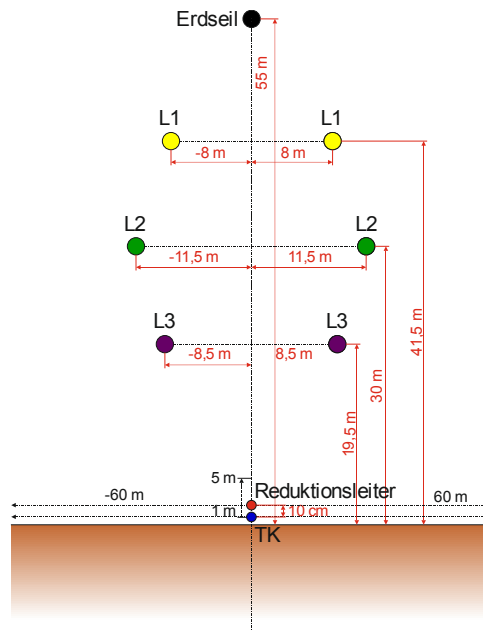


Abbildung 1: Beispiel zur Demonstration der Reduktionswirkung durch die Mitführung eines Reduktionsleiters in 10 cm Abstand zum beeinflussten TK-Leiter

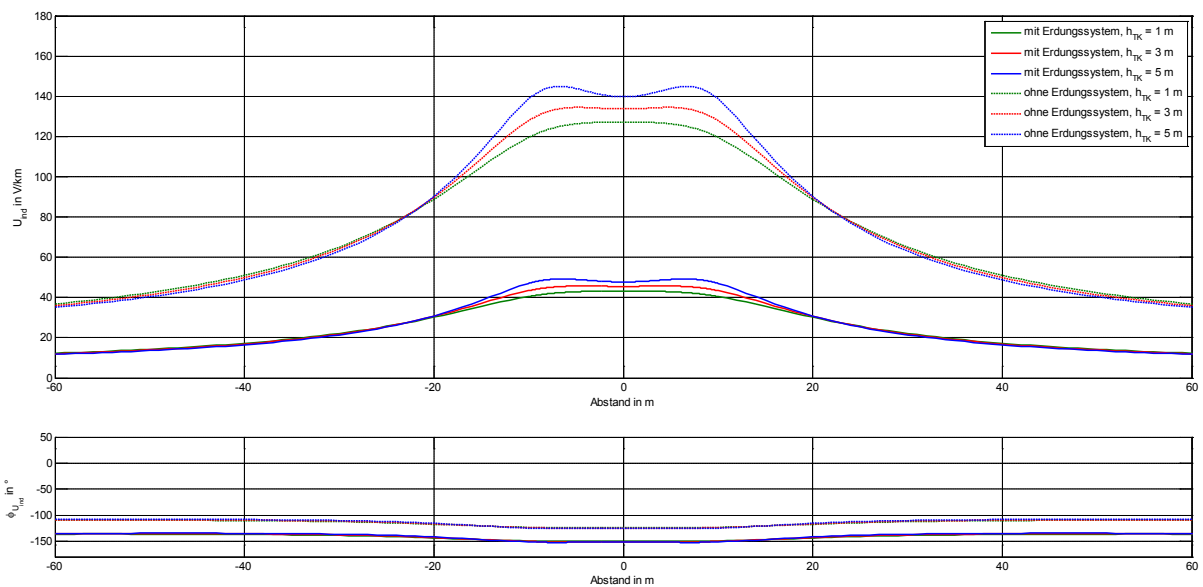


Abbildung 2: Betrag und Winkel der induzierten Spannung in einem TK-Leiter entlang einer Trasse unter Berücksichtigung eines mitgeführten Reduktionsleiters in 10 cm Abstand zum beeinflussten Leiter

In Abbildung 2 ist der reduzierende Einfluss eines mit dem beeinflussten Leiter mitgeführten Reduktionsleiters, der in der Praxis oft ein Begleiterder oder ein Parallelerdungsleiter zur Entlastung des Schirmes ist, ersichtlich. In diesem Fall ergibt sich ein Reduktionsfaktor r von 0,34 in der Mastachse. Weiters erkennt man, dass die Reduktionswirkung mit zunehmendem Abstand des beeinflussten Systems von der Mastachse abnimmt.

Der zweite Vergleich stellt die Grundkonfiguration einer um ein zweites Erdseil erweiterten Konfiguration gegenüber (Abbildung 3). Damit wird das Erdseil in der Grundkonfiguration durch zwei Erdseile auf der ursprünglichen Höhe des einzelnen Erdseils ersetzt und diese horizontal auf -5 m bzw. 5 m angenommen.

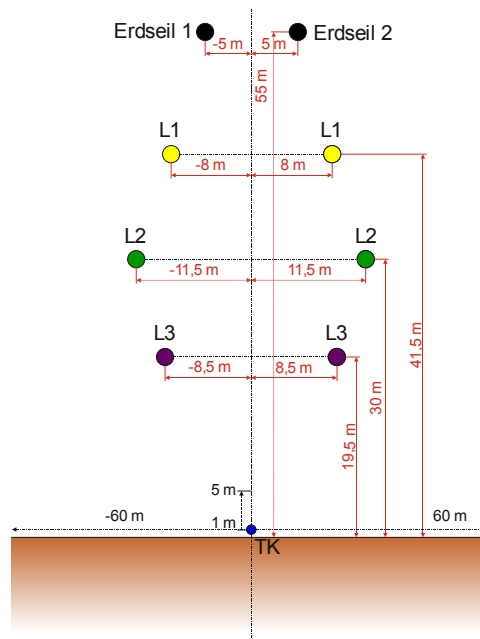


Abbildung 3: Beispiel zur Demonstration der Reduktionswirkung durch den Einsatz von einem bzw. zwei Erdseilen

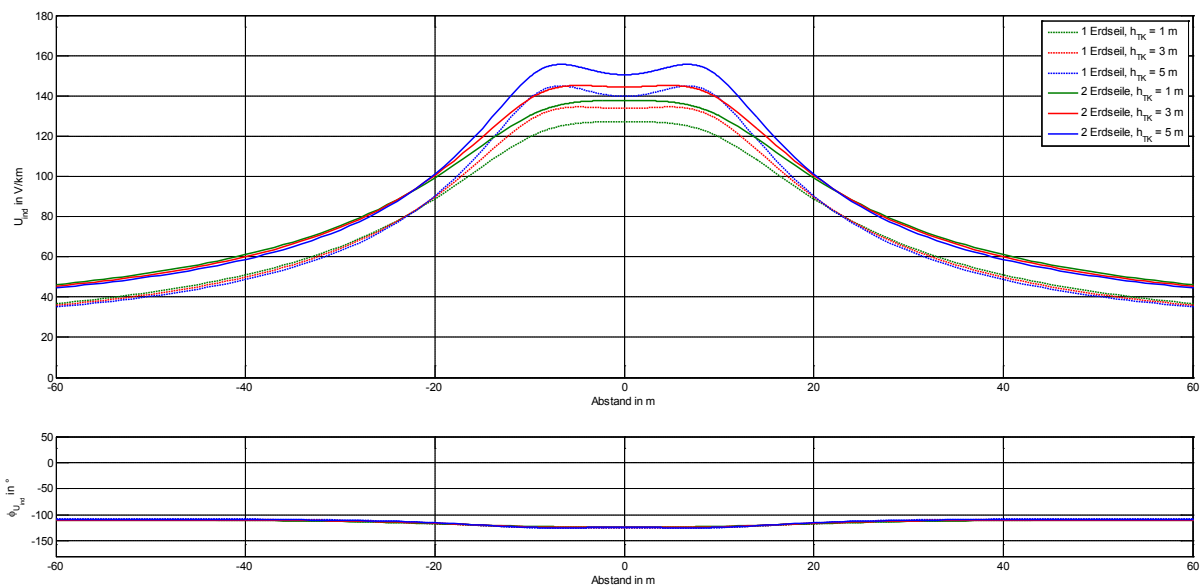


Abbildung 4: Betrag und Winkel der induzierten Spannung in einem TK-Leiter entlang einer Trasse bei Einsatz von einem und zwei Erdseilen

In Abbildung 4 ist erkennbar, dass der Einsatz eines zweiten Erdseils in dieser Konfiguration zu keinem weiteren reduzierenden Einfluss führt. In diesem Fall führt der weitere stromführende Leiter (zweites Erdseil) zu einer zusätzlichen Induktionswirkung, obwohl eine Reduktion zu erwarten war. Es zeigt sich, dass die Reduktionswirkung eines Reduktionsleiters direkt in der Nähe des beeinflussten Leiters im Vergleich zur vorgegebenen Situation besser ist.

In der dritten Variante (Abbildung 5), befindet sich der 2-systemige Tonnenmast aus der Grundkonfiguration in der Nähe eines globalen Erdungssystems. Dieses Erdungssystem ist im linken Bereich der Hochspannungsleitung in einem Bereich von 20 m ... 38 m Entfernung angeordnet und wird in erster Näherung durch mehrere parallele geerdete Leiter nachgebildet. In 29 m Entfernung rechts von der Mastachse ist ein einzelner Reduktionsleiter in 1 m Tiefe angenommen. Es soll nun in einem Diagramm die Reduktionswirkung des Erdungssystems bzw. des einzelnen Reduktionsleiters dargestellt werden.

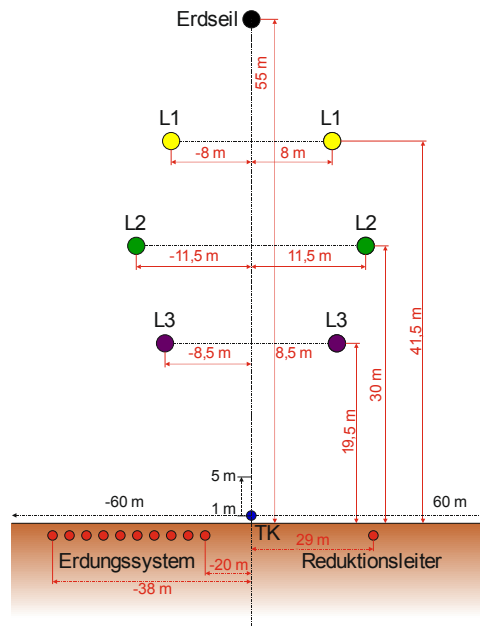


Abbildung 5: Beispiel zur Demonstration der Reduktionswirkung von Erdungssystemen und einzelnen Reduktionsleitern auf die induzierte Spannung in einem TK-Leiter

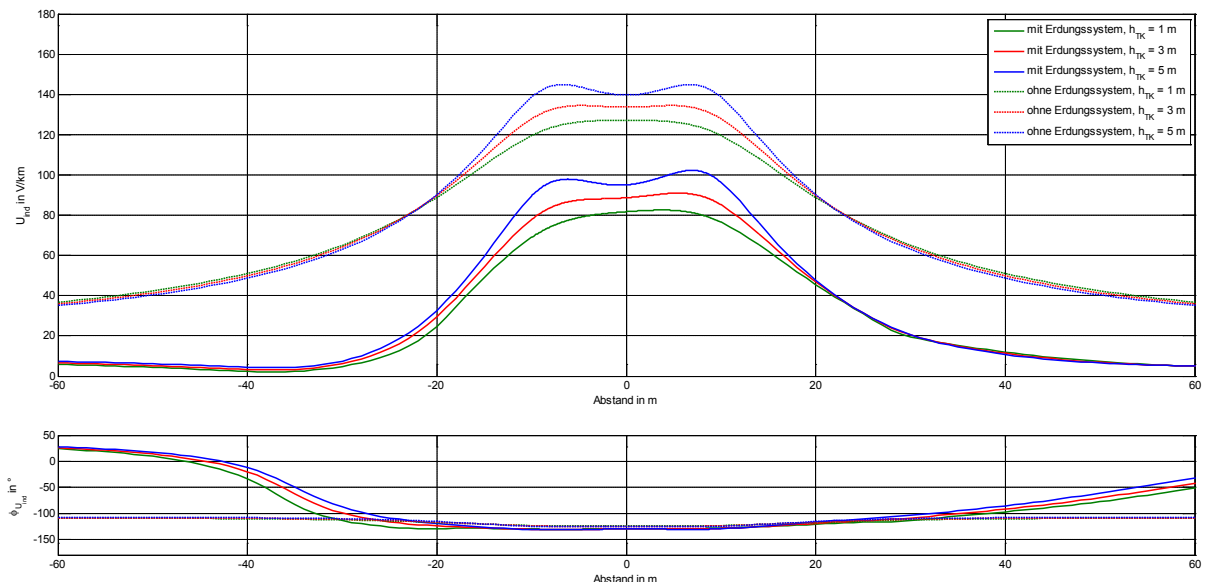


Abbildung 6: Betrag und Winkel der induzierten Spannung in einem TK-Leiter entlang einer Trasse zur Veranschaulichung der Reduktionswirkung von Erdungssystemen und einzelnen Reduktionsleitern

	I_i in A/km	
	Betrag	Phase
1. Erdungsleiter (-38 m)	4,36	33,9
2. Erdungsleiter (-36 m)	4,90	12,6
3. Erdungsleiter (-34 m)	6,23	-0,4
4. Erdungsleiter (-32 m)	8,16	-8,6
5. Erdungsleiter (-30 m)	10,78	-14,0
6. Erdungsleiter (-28 m)	14,28	-17,7
7. Erdungsleiter (-26 m)	19,05	-20,1
8. Erdungsleiter (-24 m)	25,76	-21,4
9. Erdungsleiter (-22 m)	35,77	-21,2
10. Erdungsleiter (-20 m)	52,94	-18,2
Reduktionsleiter (29 m)	50,26	-3,5

Tabelle 3: Reduktionsleiterströme

In Abbildung 6 ist die reduzierende Wirkung eines ausgedehnten bzw. eines globalen Erdungssystems das sich im Bereich von 20-38 m links von der Mastachse befindet ersichtlich. Es ist deutlich erkennbar, dass im Vergleich zur rechten Seite, wo in 29 m Entfernung von der Mastachse nur ein Reduktionsleiter liegt, eine deutliche Verbesserung der Reduktionswirkung durch den Einfluss des globalen Erdungssystems sowohl gegenüber der Grundkonfiguration ohne Reduktionsleiter als auch gegenüber der Reduktionswirkung des einzelnen Reduktionsleiters auftritt. Wie in der Tabelle 3 zu entnehmen ist, können in den Reduktionsleiter im gegenständlichen Fall bis zu 5 % des Laststromes (1000 A) auftreten.

3.2 Beispiel „Drehstromkabelleitung“

Zur Veranschaulichung der induzierten Spannungen, hervorgerufen durch eine 2-systemige 110-kV-Drehstromkabelleitung, wird die Berechnung einer Grundkonfiguration mit zwei Variationen dieser angeführt. Es werden die induzierten Spannungen in einem Telekommunikationsleiter (TK) mit aufgelegten und nicht aufgelegten Schirmen, sowie der Einfluss von mitgeführten Reduktionsleitern gezeigt. Wie bei der Drehstromfreileitung wird der Telekommunikationsleiter in unterschiedlichen Höhen (1 m, 3 m und 5 m) angenommen und horizontal von -60 m bis 60 m verschoben.

In den folgenden Abbildungen ist die für das Beispiel gewählte Topologie angeführt. Für die Drehstromkabelleitung werden die folgenden Kenndaten gewählt:

	System-zustand	Temperatur in °C	Querschnitt in mm ²	Spezifischer Widerstand in $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Relative Permeabilität Vs/Am	α in K^{-1}	Material	Innenradius in m	Außenradius in m
Kabelleiter	aktiv	20	1000	0,0265	1,000257	0,0039	Alu	–	–
Kabelschirm	beidseitig geerdet	20	150	0,0168	0,9999936	0,0039	Kupfer	0,0340	0,0415

Tabelle 4: Kabelsystemdaten für die Beispiele

	System-zustand	Temperatur in °C	Querschnitt in mm ²	Spezifischer Widerstand in $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Relative Permeabilität Vs/Am	α in K^{-1}	Material
TK	einseitig geerdet	20	10	0,0168	0,9999936	0,0039	Kupfer
Reduktionsleiter	beidseitig geerdet	20	95	0,0168	0,9999936	0,0039	Kupfer

Tabelle 5: Daten des Telekommunikationsleiters und Reduktionsleiters für die Beispiele

In der ersten Gegenüberstellung wird die Reduktionswirkung von drei gemäß Abbildung 7 angeordneten Reduktionsleitern analysiert. Die Reduktionsleiter befinden sich 0,5 m unter der Erdoberfläche jeweils 2,5 m voneinander entfernt.

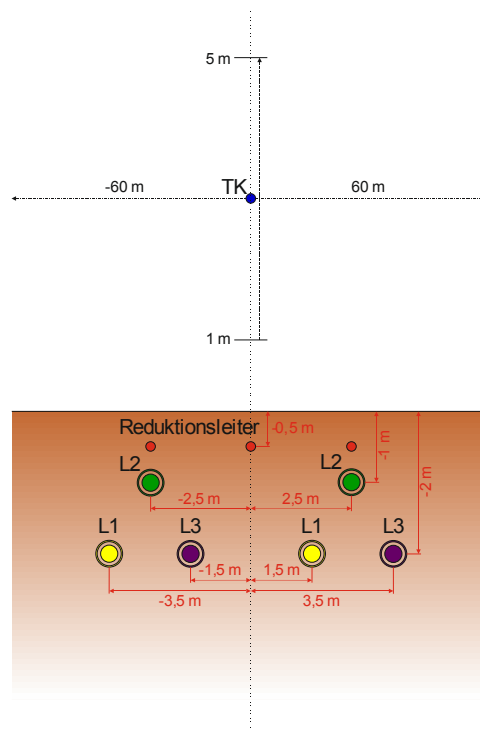


Abbildung 7: Leitungsanordnung des Beispiels Drehstromkabelleitung, mit drei Reduktionsleitern (rot gekennzeichnet)

Im Folgenden werden die induzierten Spannungen und Ströme des gewählten Beispiels (Abbildung 7) angeführt.

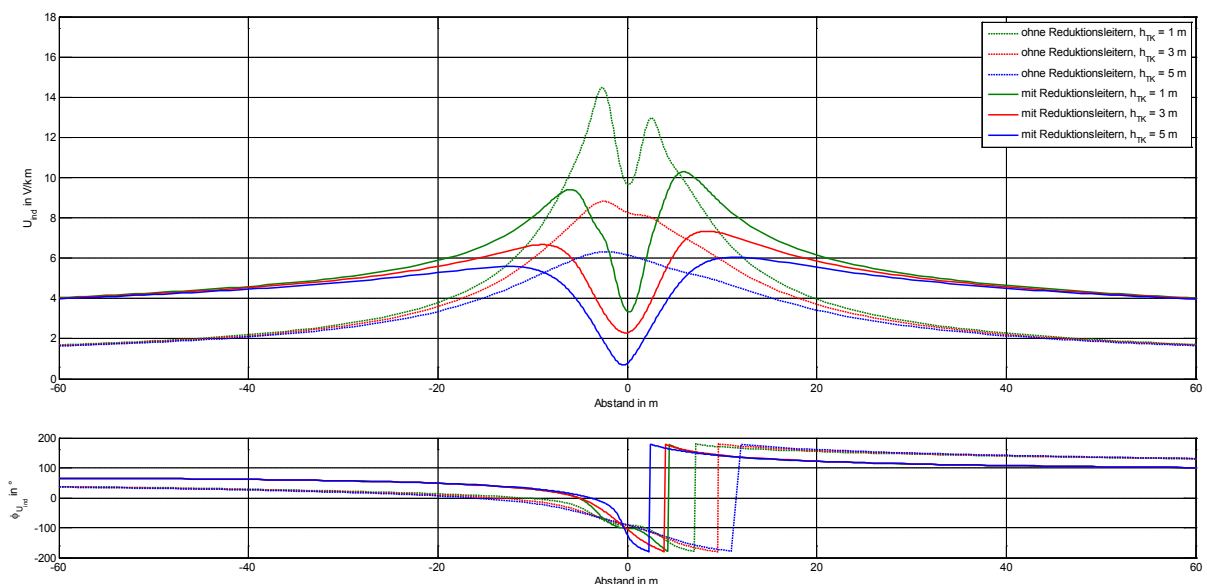


Abbildung 8: Betrag und Winkel der induzierten Spannung in einem TK-Leiter entlang einer Trasse des Beispiels Drehstromkabelleitung zur Veranschaulichung der Wirkung von Reduktionsleitern entlang der Trasse, beidseitig aufgelegte Kabelschirme

	I_i in A/km	
	Betrag	Phase
1. Reduktionsleiter (-2,5 m)	82,26	33,3
2. Reduktionsleiter (0 m)	3,71	-148,0
3. Reduktionsleiter (2,5 m)	75,59	22,4

Tabelle 6: Ströme in den Reduktionsleitern

In der Abbildung 8 ist die reduzierende Wirkung der drei über den Drehstromkabelsystemen angenommenen Reduktionsleitern ersichtlich. Die sichtbare Unsymmetrie ergibt sich aufgrund der gewählten Phasenbelegung des Doppelkabelsystems. In diesem Fall ergibt sich ein Reduktionsfaktor r von 0,35 bei $h_{TK} = 1$ m, 0,3 bei $h_{TK} = 3$ m und 0,1 bei $h_{TK} = 5$ m in der Kabelsystemachse. Es ist wieder erkennbar, dass der Reduktionsfaktor r ortsabhängig ist und mit zunehmendem Abstand von der Systemachse abnimmt.

Die Ströme in den Reduktionsleitern (Tabelle 6) können bis zu 8 % des Lastflusstoms eines Systems betragen.

Bei der zweiten Variante werden die Einflüsse von geerdeten und nichtgeerdeten Kabelschirmen dargestellt.

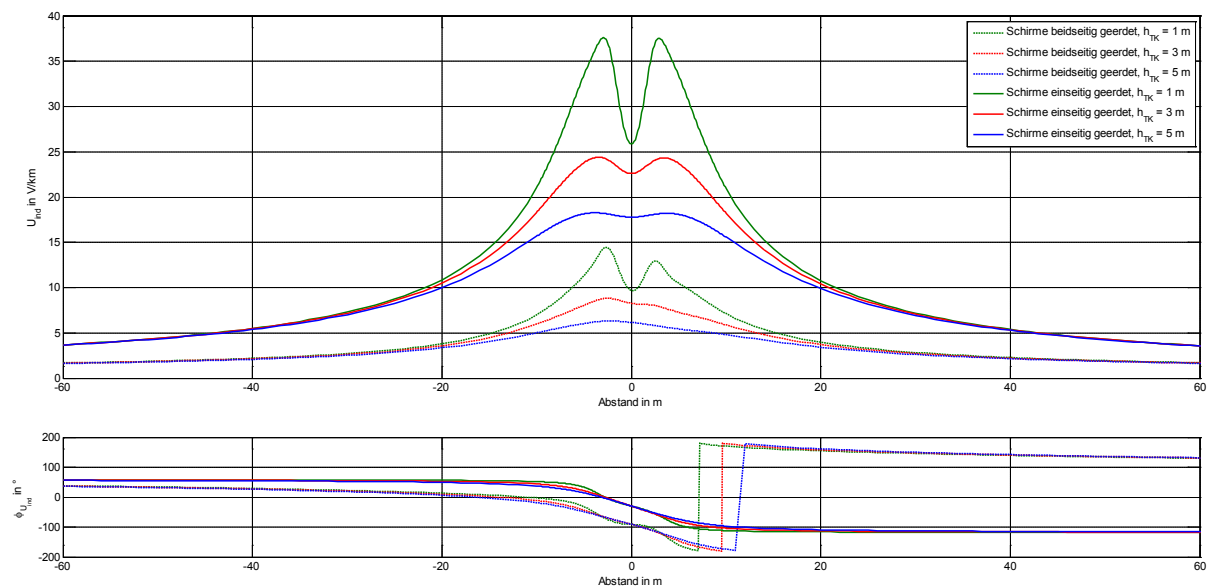


Abbildung 9: Betrag und Winkel der induzierten Spannung in einem TK-Leiter entlang einer Trasse des Beispiels Drehstromkabelleitung zur Veranschaulichung der Wirkung von einseitig bzw. beidseitig geerdeten Kabelschirmen

In der Abbildung 9, ist die reduzierende Wirkung der beidseitig aufgelegten Kabelschirme ersichtlich. In diesem Fall ergibt sich ein Reduktionsfaktor von etwa $r = 0,35$ in der Kabelsystemachse, von etwa 0,4 bei $h_{TK} = 1$ m, 0,4 bei $h_{TK} = 3$ m und 0,35 bei $h_{TK} = 5$ m am Ort der stärksten Beeinflussung und $r = 0,5$ in weiterer Entfernung vom Kabelsystem. Die Ortsabhängigkeit der Reduktionswirkung kann wieder demonstriert werden, es ist ersichtlich, dass die Reduktionswirkung mit zunehmendem Abstand von der Systemachse abnimmt.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

In dieser Arbeit wird gezeigt wie wichtig Reduktionsleiter oder Parallelerdungsleiter im Hinblick auf die Reduktion induktiv eingekoppelter Spannungen in isolierten Leitungssystemen der Energie- und Informationstechnik, Rohrsystemen oder anderer leitfähiger Systeme, die sich im Beeinflussungsbereich einer Hochspannungsanlage (Freileitung oder Kabel) befinden sind.

Weiters werden die Reduktionsströme, welche sich in den einzelnen Reduktionsleitern ausbilden und zur Reduktionswirkung beitragen berechnet und angeführt.

Ein wichtiger wissenschaftlicher Beitrag diese Arbeit liegt in der erstmaligen qualitativen und quantitativen Erfassung bzw. Berechnung der reduzierenden Wirkung von Erder-Systemen elektrischer Anlagen sowie von ausgedehnten Erdungsanlagen (z.B. globale Erdungssysteme) auf die im Beeinflussungsbereich befindlichen Systeme. Es ist deutlich erkennbar, dass die induktive Beeinflussung im Bereich globaler Erdungssysteme bzw. im urbanen Gebiet eine viel geringere Rolle spielt als in ländlichen Gebieten.

5 Literaturverzeichnis

Sofern Verweise in der gegenständlichen Veröffentlichung nicht direkt referenziert sind, dienen die angeführten Quellenangaben als weiterführende Literatur.

- [1] J. R. Carson: „*Wave propagation in overhead wires with ground return*“, in Bell Systems Technical Journal, Vol. 5, 539-554, 1926
- [2] F. Pollaczek: „*Über das Feld einer unendlich langen wechselstromdurchflossenen Einfachleitung*“, in Elektrische Nachrichtentechnik, Heftnr.: 9, Band 3, 339 - 359, 1926
- [3] Á. Déri, G. Tevan: „*Mathematical verification of Dubanton's simplified calculations of overhead transmission line parameters and its physical interpretation*“, Archiv für Elektrotechnik 63, 491-498
- [4] ITU-T, „*Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines*“, Vol. II, Calculating induced voltages and currents in practical cases, 1998
- [5] E.-P. Meyer: „*Stromrückleitung über das Erdreich, Impedanzen und induktiven Beeinflussung bei Leitern endlicher Länge*“, Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1982
- [6] G. Herold, „*Elektrische Energieversorgung II: Parameter elektrischer Stromkreise, Leitungen, Transformatoren*“, 2. Auflage, Wilburgstetten, Deutschland: J. Schlembach-Fachverlag, 2008
- [7] C. Raunig, „*Kapazitive und induktive Beeinflussung von Hochspannungsfreileitungen*“ Diplomarbeit am Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz, 2010
- [8] W. Emmer, „*Programm zur Berechnung induktiver Beeinflussungen*“, laufende Diplomarbeit am Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz, 2014