

Anpassung der Teileitermethode auf 3-D-Freileitungsmodelle zur Berechnung der induktiven Beeinflussung

M.Sc. Fabian Wießner, FTZ Leipzig e.V.

Prof. Dr.-Ing. Faouzi Derbel, HTWK Leipzig, Institut für Elektrische Energietechnik

Dr.-Ing. Christian Rückerl, BG ETEM

1 Problembeschreibung

Bedingt durch die Energiewende und dem damit verbundenen Netzausbau ist es immer häufiger notwendig Montagearbeiten auf Freileitungsmasten in der Nähe von unter Spannung stehenden Leitern durchzuführen. Die dabei auftretende induktive und kapazitive Beeinflussung durch elektrische und magnetische Felder muss als Gefährdung für das Montagepersonal berücksichtigt werden. In der Vergangenheit wurden Freileitungsmodelle zumeist nur mit 2-D-Modellen berechnet, wobei die Parameter der Freileitung als konstant angenommen wurden [1]. In der Realität haben die Masten jedoch unterschiedliche Erdausbreitungswiderstände, die Bodenleitfähigkeit entlang der Freileitung ändert sich und die Anordnung der Leiterseile variiert (z.B. Leiterfolgenwechsel und verschiedene Masttypen). In der Praxis werden Beeinflussungsrechnungen häufig nach [2,3,4] durchgeführt. Dabei wird die schirmende Wirkung der Erdseile und anderer leitfähiger Objekte in der Umgebung nur im Fehlerfall mit Reduktionsfaktoren berücksichtigt. Geht man davon aus, dass kein Fehlerfall vorliegt, so wird diese Wirkung in [2] nicht berücksichtigt. Da die Ströme in den Erdseilen eine zusätzliche Spannung induzieren, kann die gesamte Spannung geringer oder sogar höher im Vergleich zum Modell nach [2] sein. Insbesondere die Phasenlage der Ströme in den Erdseilen spielt eine entscheidende Rolle. In einem 2-D-Modell werden die Ströme in den Erdseilen als konstant angenommen. In der Realität ist dies nicht der Fall, weil die Leiter des aktiven Systems verdreht werden und sich dadurch die Phasenlage der Ströme in den Erdseilen ändert. Es soll deshalb eine Methode gezeigt werden, mit welcher die Beeinflussung bei beliebig angeordneten Leiterstrukturen berechnet werden kann. Gefährdung des Montagepersonals durch hohe induzierte Berührungsspannungen. Erwärmung von Leitern (EUK) durch hohe Ströme infolge Induktion. Damit ist es möglich, vor Beginn der Montagearbeiten Gefährdungen für das Montagepersonal durch induzierte Spannungen (fließende Ströme) zu berechnen. Dafür wird die Teileitermethode aufbauend auf [5,6] für dreidimensionale Anordnungen erweitert. Die Vorgehensweise wird für ein Berechnungsbeispiel gezeigt.

2 Berechnen von Strömen endlich langer und vermaschter Leiterstrukturen

Die Berechnung der induzierten Spannungen, welche bei den Montagearbeiten zu Gefährdungen für das Montagepersonal durch zu hohe Berührungsspannungen (fließende Ströme) führen würde, wird unter Verwendung eines Modells aus konzentrierten Elementen durchgeführt. Die Impedanzen des Modells bestehen jeweils aus dem ohmschen Widerstand des Elements, der Eigeninduktivität des Elements und der Gegeninduktivität zu allen anderen Elementen des Modells. Die Leiterbündel einer Freileitung

sind im Betrieb nicht mit dem Erdseil bzw. mit dem LWL galvanisch verbunden. Jedoch sind die Leiterbündel über Kopplungsmechanismen mit dem Erdseil bzw. mit dem LWL verbundenen, um die Wirkung der elektromagnetischen Induktion darzustellen. So verursacht zum Beispiel der Strom in einem Element eine induzierte Spannung in einem anderen Element. Folgend wird auf die Berechnung der einzelnen konzentrierten Elemente eingegangen und der Aufbau des Berechnungsmodells beschrieben.

2.1 Allgemein für Linienleiter

Zum Bestimmen der induzierten Spannungen wird das Vektorpotenzial verwendet. Hierbei wird davon ausgegangen, dass in einer Leiterschleife C_1 ein Strom I fließt. Der magnetische Fluss, welcher aus dem Strom in der Leiterschleife C_1 resultiert, induziert eine Spannung in die Leiterschleife C_2 . Zur Bestimmung der Gegeninduktivitäten beliebiger Leiterschleifen werden diese in Polygonzüge zerlegt (Bild 1).

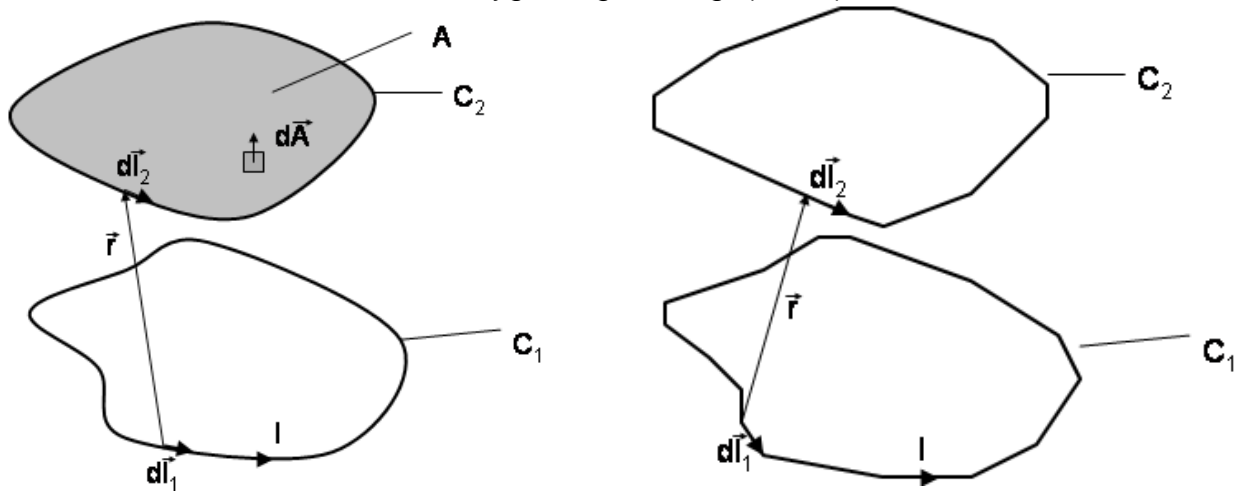


Bild 1: Leiterschleife zur Berechnung der Gegeninduktivität (links), diskretisierte Leiterschleife zur Berechnung der Gegeninduktivität (rechts)

Diese Teilleiterstücke sind jeweils sehr kurze gerade Leiterstücke. Die Genauigkeit der Berechnung kann erhöht werden, je kleiner diese Teilleiterstücke zerlegt werden. Die Induktivität wird aus der Summe aller Teilinduktivitäten der Teilleiterstücke bestimmt. Dies ist gültig, obwohl sich die magnetischen Flüsse der Teilleiterstücke ins Unendliche ausbreiten. Durch die Flussüberlagerungen heben sich die unendlichen Teile des magnetischen Flusses auf und es bleibt ein endlicher Anteil. Über das Vektorpotenzial und den Satz von Stokes ergibt sich die Formel für die äußere Induktivität zweier Leiterschleifen C_1 und C_2 . Somit gilt für die Kopplungsinduktivität M_{12} (1).

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{d\vec{s}_1 d\vec{s}_2}{\|\vec{r}_1 - \vec{r}_2\|} \quad (1)$$

Zur Bestimmung der induktiven Einkopplung wird das Umlaufintegral aus (1) in n mal berechenbare Integrale zerlegt. Dafür wird die Ausrichtung der Leiterstücke wie in Bild 3 verwendet. Das Vektorelement ds_1 wird dabei zum Teilleiterstück differentieller Länge dx . Das Vektorelement ds_2 wird rechtwinklig auf dx projiziert und ist damit der Kosinus des Zwischenwinkels beider Leiterstücke multipliziert mit dem Teilleiterstückelement dt . Somit gilt für die Gegeninduktivität zweier Leiterschleifen (2) und für die Gegeninduktivität zweier endlich langer Leiterstücke gilt (3).

$$M_{12} = \sum_n \sum_m L_{nm} \quad (2)$$

$$L_{nm} = \frac{\mu_0 \cdot \cos(\delta_{nm})}{4\pi} \int_{t_1}^{t_2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dxdt}{R_{nm}(x,t)} \quad (3)$$

Die Funktion $R_{nm}(x,t)$ aus (3) ist die Abstandsfunktion der Geraden x und t , auf denen die beiden Leiterstücke liegen. Die Integrationsgrenzen x_1 , t_1 , x_2 und t_2 ergeben sich jeweils aus dem Anfang und dem Ende der Leiterstücke. Da eine allgemeine Lösung des Doppelintegrals nur numerisch ermittelt werden kann, wird die Lösung lediglich für die Modelle von parallelen und windschiefen Leitern beschrieben. Um alle beliebigen Anordnungen berechnen zu können, werden die Anordnungen, unter Verwendung der später beschriebenen Koordinatentransformation, in eines der bestimmten Modelle gefasst.

2.2 Gegeninduktivität von paralleler Leiter

Die induktive Einkopplung zwischen zwei parallelen Leitern, welche in Bild 2 dargestellt wird, ist der einfachste Fall für die Lösung des Doppelintegrals aus (3).

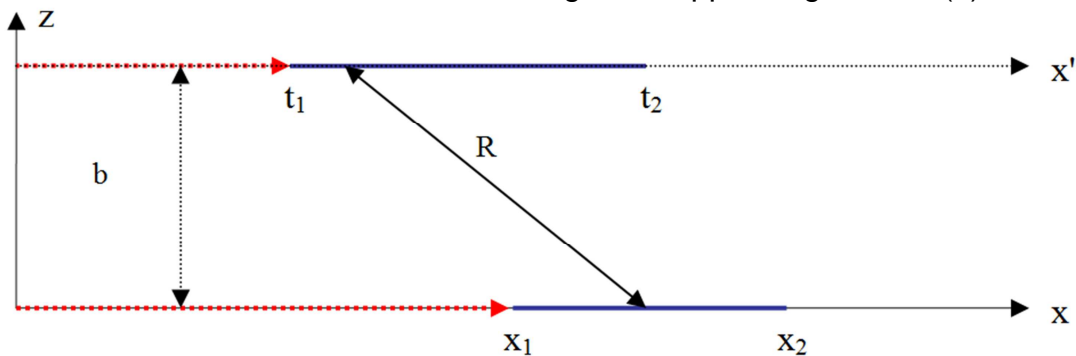


Bild 2: Modell zur Berechnung der Gegeninduktivität paralleler endlich langer Leiter

Für den Fall, dass der Zwischenwinkel der beiden Leiterstücke null Grad oder 180 Grad beträgt und der Abstand b zwischen den beiden Leitern ungleich null ist, gilt für die Abstandsfunktion R (4).

$$R = \sqrt{b^2 + (t - x)^2} \quad (4)$$

Das Lösen des Doppelintegrals aus (3) liefert die analytische Lösung für die Kopplungsinduktivität zwischen zwei parallelen Leitern und ergibt sich zu (5).

$$L_{nm} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \sum_{u=1}^2 \sum_{v=1}^2 (-1)^{u+v} \cdot \left\{ -(x_v - t_u) \cdot \operatorname{ar sinh} \left(\frac{x_v - t_u}{b} \right) + \sqrt{b^2 + (x_v - t_u)^2} \right\} \quad (5)$$

2.3 Gegeninduktivität von windschiefen Leitern

Die Bestimmung der Gegeninduktivität zweier endlicher windschief zueinander liegender Teilleiterstücke ist die allgemeine Lösung (3). Hierbei wird es nötig, die Abstandsfunktion R so weit wie möglich zu vereinfachen, da sonst die Lösung des Doppelintegrals aus (3) zu aufwendig wäre. Deshalb wird für die Ermittlung der Abstandsfunktion R ein passendes Modell entwickelt. Dies geschieht unter Verwendung der später betrachteten Koordinatentransformation. Es wird angenommen, dass sich die beiden Geraden, auf denen die jeweiligen Leiterstücke liegen, in planparallelen Ebenen zueinander befinden. Die Verbindung der beiden Geraden, welche orthogonal zu den beiden Ebenen liegen, wird als z -Achse definiert. Die beiden Richtungsvektoren der Geraden sind die x - und y -Achse des Koordinatensystems. Zur Bestimmung des Zwischenwinkels δ zwischen den

beiden Geraden wird das Skalarprodukt beider Richtungsvektoren genutzt. Daraus ergibt sich die in Bild 3 dargestellte Leiteranordnung.

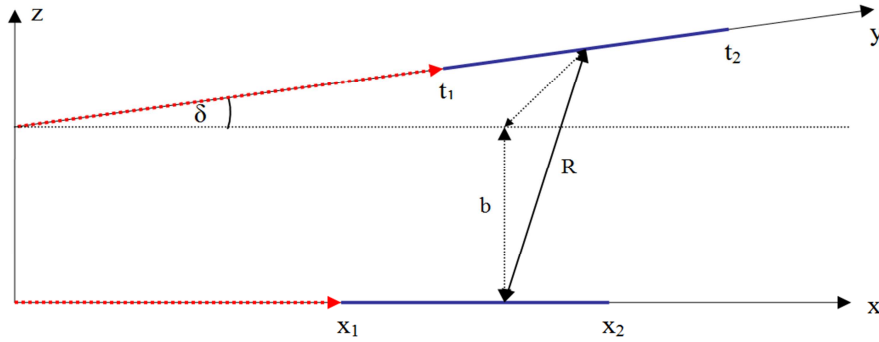


Bild 3: Modell zur Berechnung der Gegeninduktivität windschiefer endlich langer Leiter

Die Variable b ist der Abstand zwischen den beiden planparallelen Ebenen, in denen die Leiterstücke liegen. Daraus folgt die Abstandsfunktion R (6) der windschief zueinander liegenden Leiterstücke.

$$R = \sqrt{b^2 + x^2 + t^2 - 2 \cdot t \cdot \cos(\delta)} \quad (6)$$

Durch das Lösen des Doppelintegrals aus (3) mit der eingesetzten Abstandsfunktion R (6) für R_{nm} ergibt sich die Berechnungsfunktion der Gegeninduktivität für windschiefe Leiter (7).

$$L_{nm} = \frac{\mu_0 \cdot \cos(\delta_{nm})}{4\pi \cdot \sin(\delta_{nm})^2} \cdot \sum_{u=1}^2 \sum_{v=1}^2 (-1)^{\mu+\nu} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \cos(\delta_{nm}) \cdot z_{uv} (\ln(|z_{uv}|) - 1) + \\ \left[\begin{array}{l} cs_{uv} \cdot (\ln(|z_{uv}|) - 1) + c_v \cdot \ln \left(\frac{|cs_{uv} + z_{uv} - c_v|}{|\sqrt{-d} - c_v|} \right) \end{array} \right] \\ \pm \left[\begin{array}{l} +\sqrt{d} \cdot \left(\arcsin \left(\frac{-c_v \cdot z_{uv} - d}{z_{uv} \cdot \sqrt{c_v^2 + d}} \right) + \frac{2}{\pi} \right) \end{array} \right] \end{array} \right\} \quad (7)$$

Die Variablen d , c_v , cs_{uv} und z_{uv} (8-11) sind Substitutionen, welche sich beim Lösen des Doppelintegrals (3) ergeben. Diese werden wegen der besseren Darstellung nicht eingesetzt.

$$d = b^2 \cdot \sin^2(\delta_{nm}) \quad c_v = x_v \cdot \sin^2(\delta_{nm}) \quad cs_{uv} = \sqrt{z_{uv}^2 - 2c_v z_{uv} - d} \quad (8 - 11)$$

$$z_{uv} = \sqrt{t_u^2 + x_v^2 - 2x_v t_u \cos(\delta_{nm}) + b^2 - t_u \cdot \cos(\delta_{nm}) + x_v}$$

Das Vorzeichen des Summanden der Berechnungsfunktion der Gegeninduktivität (7) ist eine Fallunterscheidung und kann durch das Auflösen der Substitutionsvariable z_{uv} (11) nach der Grenze des Doppelintegrals t_u (6) bestimmt werden. Diese Umstellung der Wurzelfunktion liefert zwei Lösungen für Grenze t_u . Das Vorzeichen des Summanden der Berechnungsfunktion (7) ist somit, das Vorzeichen der Wurzel, der mit der Grenze t_u übereinstimmenden Lösung.

2.4 Koordinatentransformation zum Berechnen der Gegeninduktivität beliebig angeordneter Leiter

Die Gegeninduktivität zweier Leiterstücke aus (3) ist unabhängig von der Lage im Raum. Diese ist lediglich von der Lage der beiden Leiterstücke zueinander abhängig. Daher ist es möglich, beliebige Leiteranordnungen in die gewünschte Leiteranordnung aus Bild 3

zu überführen. Dazu werden die Einheitsvektoren des neuen Koordinatensystems (12-14) gebildet, mit welchen die invertierte Einheitsvektormatrix (15) gebildet wird.

$$\vec{x}'_e = \frac{\vec{x}_2 - \vec{x}_1}{|\vec{x}_2 - \vec{x}_1|} \quad \vec{y}'_e = \frac{\vec{t}_2 - \vec{t}_1}{|\vec{t}_2 - \vec{t}_1|} \quad \vec{z}'_e = \frac{\vec{x}'_e \times \vec{y}'_e}{|\vec{x}'_e \times \vec{y}'_e|} \quad (12-14) \quad T = \begin{pmatrix} x'_{ex} & y'_{ex} & z'_{ex} \\ x'_{ey} & y'_{ey} & z'_{ey} \\ x'_{ez} & y'_{ez} & z'_{ez} \end{pmatrix}^{-1} \quad (15)$$

Für das neue Koordinatensystem ist es nötig, einen Ursprung festzulegen. Dafür wird der Schnittpunkt S der Geraden, welche durch den kürzesten Abstand der Geraden x und t verläuft, und der Geraden, auf der das Leiterstück x liegt, gewählt. Somit ergeben sich für die neuen Koordinaten (16-19).

$$\vec{x}'_1 = T \cdot (\vec{x}_1 - \vec{S}) \quad \vec{x}'_2 = T \cdot (\vec{x}_2 - \vec{S}) \quad \vec{t}'_1 = T \cdot (\vec{t}_1 - \vec{S}) \quad \vec{t}'_2 = T \cdot (\vec{t}_2 - \vec{S}) \quad (16-19)$$

Die Vektoren x_1' und x_2' besitzen kein y_e' und z_e' Anteil. Der x_e' Anteil der Vektoren x_1' und x_2' ist die Lage auf der x - Achse in Bild 3. Die Vektoren t_1' und t_2' besitzen keinen x_e' Anteil. Der y_e' der Vektoren t_1' und t_2' liefert die Lage der Punkte auf der y-Achse in Bild 3 und der z_e' den geringsten Abstand b. Mit den in (16 - 19) bestimmten Parametern kann die Gegeninduktivität zweier Teilleiter mit (7) berechnet werden.

2.5 Induktive Kopplung bei galvanisch gekoppelten Maschen

Die induktive Kopplung bei galvanisch gekoppelten Maschen kann ebenfalls mit (2) berechnet werden, unter Einschränkung der gemeinsam durchflossenen Leiterstücke. Diese müssen mit dem Model in Bild 3 unter Verwendung des mittleren geometrischen Abstandes von sich selbst nach [7] berechnet werden. Im nächsten Bearbeitungsschritt werden alle unabhängigen Stromaschen im Gesamtmodell definiert. Ein Beispiel dafür wird in Bild 4 gezeigt.

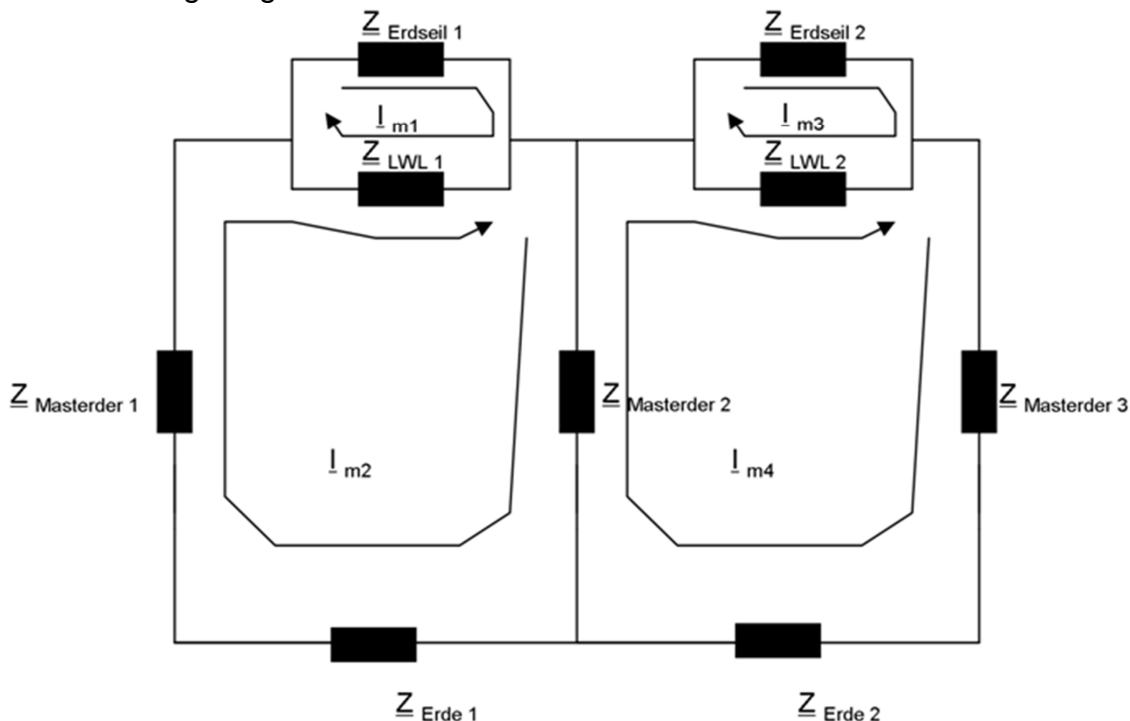


Bild 4: Beispiel zum Festlegen der Maschenströme

Bild 4 zeigt eine Möglichkeit für das Festlegen der Stromaschen entlang dem Erdseil und dem LWL an einem Beispiel für drei Masten. Der Ausschnitt beinhaltet vier Stromaschen (I_{m1} bis I_{m4}). Durch Überlagerung der Maschenströme ergeben sich die in den

einzelnen Elementen fließenden Ströme und daraus die resultierenden Spannungen. Sind alle Gegeninduktivitäten zwischen den einzelnen Maschen bestimmt, so können mit dem linearen Gleichungssystem (20) alle Ströme und Spannungen in den Maschen des Berechnungsmodells bestimmt werden. In (20) steht somit in der Hauptdiagonale der Maschenimpedanzmatrix Z_m die Summe der Impedanzen der jeweiligen Masche. Die Nebendiagonalen der Maschenimpedanzmatrix Z_m in (20) beinhalten die induktiven und galvanischen Kopplungen zwischen den jeweiligen Maschen. Diese können wie in (9) für die Kopplung zwischen den Maschen bestimmt werden.

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_{m1} \\ \underline{U}_{m2} \\ \underline{U}_{m3} \\ \vdots \\ \underline{U}_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Z}_{m11} & \underline{Z}_{m12} & \underline{Z}_{m13} & \cdots & \underline{Z}_{m1n} \\ \underline{Z}_{m21} & \underline{Z}_{m22} & \underline{Z}_{m23} & \cdots & \underline{Z}_{m2n} \\ \underline{Z}_{m31} & \underline{Z}_{m32} & \underline{Z}_{m33} & \cdots & \underline{Z}_{m3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{mn1} & \underline{Z}_{mn2} & \underline{Z}_{mn3} & \cdots & \underline{Z}_{mnn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_{m1} \\ \underline{I}_{m2} \\ \underline{I}_{m3} \\ \vdots \\ \underline{I}_{mn} \end{pmatrix} \quad \underline{Z}_{m12} = -\underline{Z}_{LWL1} + j\omega M_{12} \quad (20 - 21)$$

3 Berechnung der Berührungsspannung an der Zugtechnik während der Montage von Leiterbündel via Seilzug

Bei der Montage von Leiterbündel einer Freileitung, bei der das benachbarte Leitersystem in Betrieb ist, kommt es zu sehr hohen induzierten Spannungen und daraus resultierenden hohen Ströme in den geerdeten Leiterbündeln. Die Berührungsspannung an der Seilzugtechnik kann mit den in 2 beschriebenen Berechnungsverfahren bestimmt werden. Die Freileitungsmasten im Seilzugabschnitt sind Donaumasten (Bild 5 links).

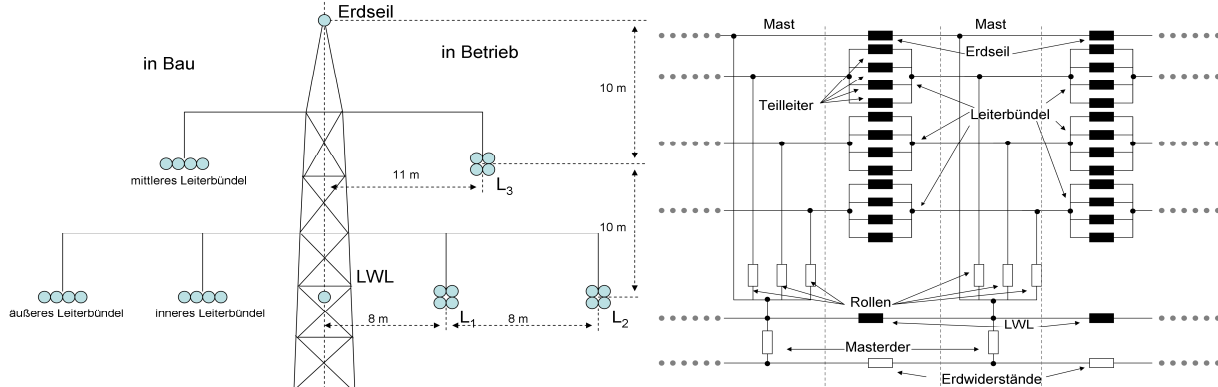


Bild 5: Mastbild der Freileitung (links), Ausschnitt aus dem konzentrierten Elemente - Modell geerdeter Leiter zweier Freileitungsmasten (rechts)

Auf dem Freileitungsmast befindet sich ein Leitersystem, welches mit einem maximalen Strom von 3,6 kA in Betrieb ist, ein Erdseil, ein LWL (Leitungsparameter gleich mit Erdseil) und das in Bau befindliche Leitersystem, welche über Laufraderder an den Masten geerdet sind. In Bild 5 (rechts) ein Ausschnitt aus dem konzentrierte Elemente - Modell des geerdeten Leitersystems dargestellt, in welche das sich im Betrieb befindende Leitersystem eine Spannung induzierte. Anlog zu Bild 4 werden die Strom-Maschen in dem Modell festgelegt und mit (20) berechnet. Aus den berechneten Strömen kann die Berührungsspannung an den Windenplätzen berechnet werden, wo sich die Seilzugtechnik (Seilwinden) für die Montage via Seilzug befindet. Die Berührungsspannungen den Windenplätzen ergeben sich aus Spannungsfall über den Laufraderdern der Seilzugrolle und dem Anteil des Potentials des Freileitungsmasten (Bild 6).

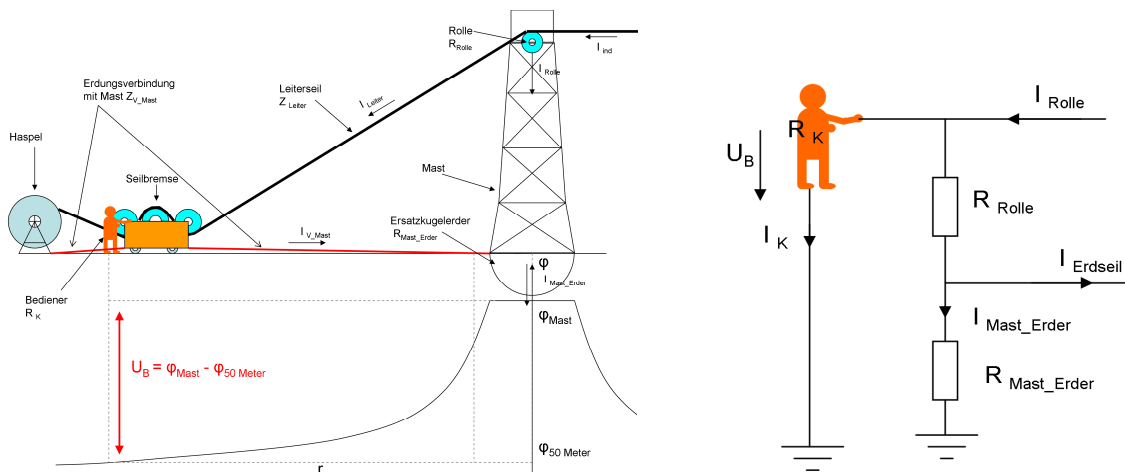


Bild 6: Potenzialtrichter am Windenplatz der Seilbremse (links), Zusammensetzung der Berührungsspannung an der Seilbremse (rechts)

Beim Seilzug werden mit einem Vorseil aus Stahl die Leiterseile des jeweiligen Leiterbündels entlang des Seilzugabschnittes gezogen (Bild 7). Im Modell mit konzentrierten Elementen werden daher Impedanzen des Vorseils durch die des Leiterbündels ersetzt.

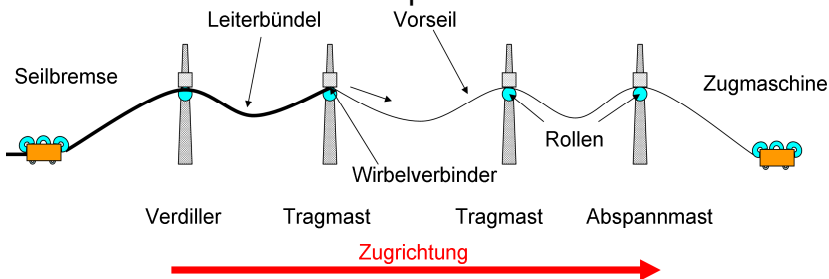


Bild 7: Veranschaulichung der Seilzugrichtung vom Verdrillungsmast zu Abspannmast

Damit kann die Berührungsspannung für jeden Zeitpunkt während des Seilzuges der Leiterbündel berechnet werden. Die Fragestellung, ob die in Bild 7 dargestellt Seilzugrichtung oder die Seilzugrichtung vom Abspannmast zum Verdrillungsmast im Bezug auf die resultierenden Berührungsspannungen am Windenplatz die günstigere ist, kann mit dem Berechnungsmodell geklärt werden.

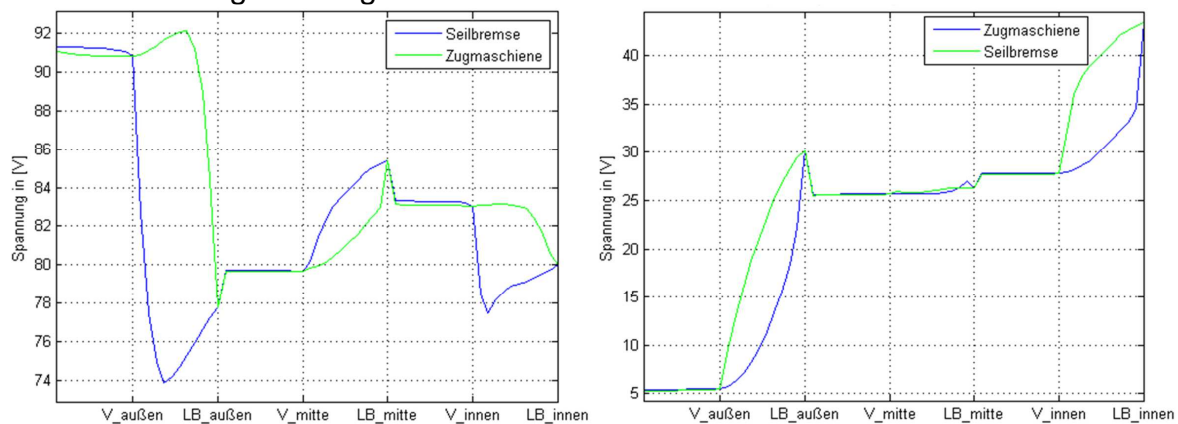


Bild 8: Berührungsspannung am Windenplatz beim Verdrillungsmast (links)/Abspannmast (rechts) Seilzugrichtung nach Bild 7 (blau), die entgegengesetzte Seilzugrichtung (grün)

In Bild 8 wird die Berührungsspannung während der gesamten Seilzugarbeiten gezeigt. Bei diesen Seilzugarbeiten wird zunächst das im Bild 5 links dargestellte äußere Vorseil von der Zugmaschine zur Seilbremse gezogen. Danach wird das äußere Leiterbündel von der Seilbremse zur Seilzugmaschine gezogen. Dies wird danach für das mittlere Vorseil und Leiterbündel und zuletzt für das innere Vorseil und Leiterbündel wiederholt. Im Bild 8 (links) ist zu erkennen, dass bereits vor Beginn der Seilzugarbeiten die Berüh-

rungsspannung am Verdrillungsmast deutlich erhöht ist. Dies liegt an den Strömen über das Erdseil und das LWL, welche sich durch den Wechsel der Leiterfolge am Verdrillungsmast über den Mast der abfließen müssen. Dadurch entsteht an diesem ein erhöhtes Potenzial. Des Weiteren kann in Bild 8 (links) erkannt werden, dass die Seilzugrichtung in Bild 7 die günstigere ist, da bei der entgegengesetzten Seilzugrichtung die Berührungsspannung am Verdrillungsmast beim Seilzug des ersten Leiterbündels ansteigt. Dies liegt an dem zusätzlichen Strom des gezogenen Leiterbündels, welches über das Erdseil und LWL abfließen muss und damit das Potenzial des Verdrillungsmastes erhöht. Die Seilzugrichtung hat auf die maximale Berührungsspannung des am anderen Ende des Seilzugabschnittes liegenden Abspannmastes (Bild 8 rechts) keinen Einfluss.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Aus dem Berechnungsbeispiel wird deutlich, dass sich das vorgestellte Verfahren für die Berechnung von induzierten Spannungen von Hochspannungsfreileitungen eignet. Mit dem Modell kann der Einfluss von Erdungsmaßnahmen, Seilzugreihenfolge, Seilzugrichtung auf induzierte Spannungen (fließende Ströme) untersucht werden. Durch die Möglichkeit zur Berechnung der Berührungsspannung während des Seilzuges liefert das vorgestellte Berechnungsverfahren einen Beitrag zum Bewerten von möglichen Gefährdungspotenzialen beim Freileitungsbau oder anderen Montagearbeiten. Des Weiteren kann mit der 3-D-Teilleitermethode eine Vielzahl von andern Anwendungen berechnet werden, da durch die Möglichkeit des punktuellen sehr genauen Diskretisierens eine hohe Genauigkeit bei gleichzeitig überschaubarem Berechnungsaufwand möglich ist. Mögliche Anwendungsgebiete sind z.B. die Berechnung der Beeinflussung von Telekommunikationsanlagen oder die von Berechnung Stromwärmeverlusten durch Erdungsanlagen mit Berücksichtigung von Stromverdrängungseffekten

Literaturangaben

- [1] Pohlmann, Dörnemann: Aspekte der elektrischen Beeinflussung bei der Verlegung von Leiterseilen in der Nähe von in Betrieb befindlichen Freileitungen, 6. Internationale AuS - Konferenz, VDE-Verlag Berlin-Offenbach, 2002
- [2] TE 1: Anleitung zur Berechnung der in Telekommunikations-Leitungen durch Starkstromleitungen induzierten Spannungen, Schiedsstelle für Beeinflussungsfragen, 2006
- [3] DIN VDE 0845-6-2: Maßnahmen bei Beeinflussung von Telekommunikationsanlagen durch Starkstromanlagen, 2014
- [4] ITU-T, Directives concerning the Protection of telecommunicationlines against harmful effects from electric power and electrified railway lines, Vol. II, Geneva 1999
- [5] Eichhorn, K.Fr: Induktivitäten windschiefer Leitersysteme, Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik); Springer-Verlag; Vol. 61, No. 6; 1979, S. 353 - 362
- [6] Raunig, C., Schmutzger, E: Modellierung und Berechnung der mutuellen niederfrequenten induktiven Kopplung, Elektrotechnik und Informationstechnik, V 131, I 8, Springer-Verlag, 2014
- [7] Rochus Gröber: Einbeitrag zur Berechnung der Stromkraft und der mittleren geometrischen Abstände bei Leitern mit besonderen Querschnittsformen, Dissertation RWTH Aachen, 1967