

Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 98 (2007)
Heft: 22-23

Artikel: Messung und Kontrolle der Erdung von Hochspannungsmasten mit Erdseil
Autor: Joye, Patrick / Orzan, David / Zimmermann, Markus
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-857502>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 19.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Messung und Kontrolle der Erdung von Hochspannungsmasten mit Erdseil

Mess- und Berechnungsmethode der Einwirkspannungen im Erdkurzschlussfall

Bei einem Isolationsfehler auf einer Hochspannungsfreileitung kann der Fehlerstrom über den Mast zur Erde abgeleitet werden. Die dabei entstehenden Erdungsspannungen sind eine Gefahrenquelle für Personen. Wegen der möglichen Lebensgefahr ist speziell die Berührungsspannung zu erwähnen. Mit den in der Starkstromverordnung [1] festgelegten Normen [2] sollen solche Risiken reduziert werden, indem sie z.B. die maximale Berührungsspannung für eine bestimmte Fehlerabschaltzeit vorgibt. Je nach der Wahrscheinlichkeit eines Aufenthalts von Personen in der Nähe eines bestimmten Masts wurden zur Bestimmung der zulässigen Berührungsspannung drei Zonen festgelegt. Je nach Zone und Fehlerabschaltzeit muss für die Beurteilung der Personengefährdung die Erdungsspannung gemessen und analysiert werden. Damit lassen sich die Berührungsspannung und die Schrittspannung im Einflussbereich des Masts berechnen.

Das Erdseil schützt in erster Linie die Phasenleiter vor direkten Blitzschlägen. Neben dieser sehr wichtigen Funktion hat es einen starken Einfluss auf die Erdungsspannung bei einem Erdkurzschluss, was sich auf zwei verschiedene Arten bemerk-

Patrick Joye, David Orzan, Markus Zimmermann

bar macht. Erstens werden durch das Erdseil die Erdungen von benachbarten Masten parallel geschaltet, und zweitens wird bei starr oder niederohmig geerdeten Netzen der im Boden fließende Fehlerstrom verringert. Auf diese Effekte haben Querschnitt und Material des Erdseils einen signifikanten Einfluss.

Parallelschaltung des Erdnetzes von benachbarten Masten

Durch das Erdseil besteht zwischen den Masten eine galvanische Verbindung. Dies führt zur in Bild 1 dargestellten Verschaltung der Leiterimpedanz Z des Erdseils mit den einzelnen Ausbreitungswiderständen der Masterdungen R_A . Durch die Impedanz des Erdseils nimmt der Einfluss der einzelnen Masterdungen mit zunehmender Distanz ab. Die resultierende

Ersatzimpedanz wird als Kettenleiterimpedanz Z_K bezeichnet.

Die gesamte Impedanz einer Masterdung Z_E in der Mitte einer langen Leitung kann, wie in Bild 2 dargestellt, durch die Parallelschaltung des Erdwiderstands R_A mit den Kettenleiterimpedanzen Z_{KA} und Z_{KB} zu beiden Seiten des Masts gebildet werden.

Der Einfluss des Querschnitts, des Materials des Erdseils sowie der einzelnen Ausbreitungswiderstände der Masterdungen auf die Kettenleiterimpedanz wird durch folgendes Beispiel erläutert (Bild 3):

Die Bilder 4a, b und 4e, f zeigen den Verlauf des Betrags der Kettenleiterimpedanz

zu beiden Seiten des jeweiligen Masts (links Z_{KA} , rechts Z_{KB}). In den Bildern 4c, d und 4g, h sind Betrag und Phasenwinkel der parallel geschalteten Kettenleiterimpedanzen dargestellt. Die gesamte Erdimpedanz eines Masts ergibt sich durch die Parallelschaltung der beiden Kettenleiterimpedanzen Z_{KA} und Z_{KB} und des jeweiligen Ausbreitungswiderstands. In den Beispielen verkleinert sich die Erdimpedanz durch das Erdseil aus Stahl von 10Ω auf etwa $1,5 \Omega$ und für das Erdseil aus Aludrey auf etwa $0,75 \Omega$.

In Bild 4 sind auch die Einflussbereiche der Erdungsanlagen der Unterstationen er-

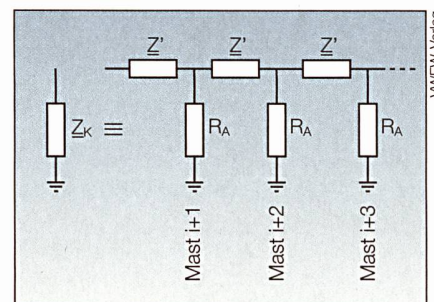


Bild 1 Ersatzschaltbild der Kettenleiterimpedanz.

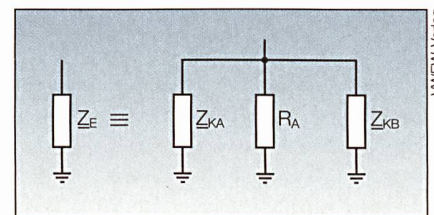


Bild 2 Ersatzschaltbild der Erdungsimpedanz eines Masts.

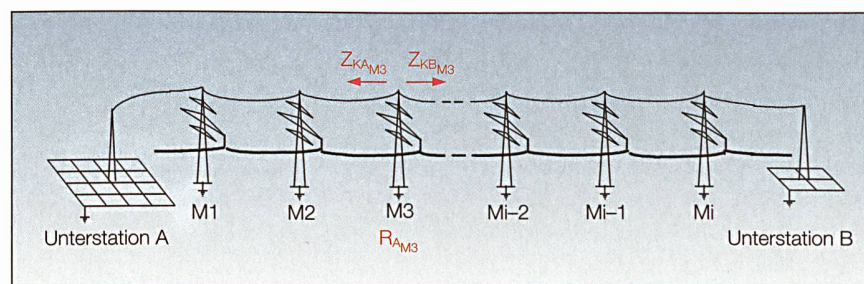


Bild 3 Situation zur Berechnung der Kettenleiterimpedanz.

Netzfrequenz: 50 Hz; Länge: 15 km; Anzahl Maste: 59; Mastabstand: 250 m; spezifischer Erdwiderstand: $200 \Omega\text{m}$; Ausbreitungswiderstand der Masterdungen: 10Ω ; Ausbreitungswiderstand der Erdung von Unterstation A: $0,1 \Omega$; Ausbreitungswiderstand der Erdung von Unterstation B: $1,0 \Omega$.

Leiterzahl	Material/ Querschnitt	Reduktionsfaktor r_E
1 Erdseil	St 50, 70, 95	0,98
1 Erdseil	Al/St 50/30	0,78
1 Erdseil	Al/St 120/20, 70	0,70
1 Erdseil	Al/St 240/40	0,65
1 Erdseil	Al/St 120/70 und 1 Bodenseil 120 mm ² Cu	0,52
2 Erdseile	Al/St 95/55	0,50

Tabelle Reduktionsfaktoren für verschiedene Erdseile auf Freileitungen.
Freileitungen: Abstand Erdseil–Leiter ca. 15 m.

sichtlich. Beim Erdseil aus Stahl ist dieser auf rund 2,5 km Entfernung vor der Unterstation erkennbar und beim Erdseil aus Aldrey auf etwa 5 km Entfernung. Bei weiter entfernten Masten hat die Erdung der Unterstationen keinen nennenswerten Einfluss auf die Erdimpedanz.

Verminderung des Fehlerstroms im Boden

Der Nullstromanteil des Kurzschlussstroms, der in der Schleife Phasenleiter–Erde fließt, induziert in der Schleife Erdseil–Erde einen in entgegengesetzter Richtung fließenden Strom (I_{ES} , Bild 5). Da diese Ströme im Boden in entgegengesetzter Richtung fließen, wird der Strom in der Erde verkleinert und dadurch auch die Berührungsspannung verringert. Das Verhältnis zwischen dem Strom im Erdreich (I_{EKS}) und des Nullstromanteils des Kurzschlussstroms in den Phasenleitern (I_{KS}) wird als Reduktionsfaktor (r_E) bezeichnet.

$$r_E = \frac{I_{EKS}}{I_{KS}} = 1 - \frac{I_{ES}}{I_{KS}} \quad (1)$$

Das Material, der Querschnitt des Erdseils und die Anordnung von allen Leiterseilen sowie des Erdseils beeinflussen den Reduktionsfaktor beziehungsweise die Grösse des induzierten Stroms. Obwohl der Reduktionsfaktor im allgemeinen Fall eine komplexe Grösse ist, wird der Imaginärteil normalerweise vernachlässigt. In der Tabelle sind die Reduktionsfaktoren für gebräuchliche Seilanordnungen angegeben [3].

Zusammenspiel von Kettenleiterimpedanz und induktiver Koppelung

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Einflüsse des Erdseils ergibt sich die Situation in Bild 5. Die Erdungsspannung \underline{U}_E wird durch die beiden Kettenleiterimpedanzen, den Mastwiderstand sowie die induktive Koppelung beeinflusst.

Bei einem Kurzschluss auf einem weit von der Unterstation entfernten Mast nimmt der gegen Erde abfließende Strom in den benachbarten Masten mit zunehmender Distanz ab (Bild 6a zwischen Mast 7 und Mast 45). Der im Erdseil übrig bleibende Strom ist auf die weiter oben erwähnte induktive Koppelung zurückzuführen (Bild 6b zwischen Mast 30 und Mast 40); der ins Erdreich abfließende Strom I_{EKS} (Bild 5) kann somit bestimmt werden. Die Berechnung der Erdungsspannung ist bei einer bekannten Erdimpedanz Z_E nach Formel 2 vergleichsweise einfach.

$$\underline{U}_E = Z_E \cdot I_{EKS} \quad \text{mit} \quad I_{EKS} = \sum_{i=1}^n r_{Ei} \cdot I_{KS} \quad (2)$$

Der Parameter n gibt dabei die Anzahl Phasenleiter, die die Fehlerstelle speisen, an (normalerweise $n = 2$).

Bei einem Kurzschluss auf einem Mast in der Nähe einer Unterstation ist die Bestimmung der Erdungsspannung schwieriger. Der Anteil des Stroms der induktiven Koppelung im Erdseil sowie derjenige der benachbarten Maste und der Unterstation lassen sich nicht einfach unterscheiden (Bild 6: zwischen Unterstation A und Mast 7). Die

Grösse und Herkunft des Kurzschlussstroms, die Erdseile der verschiedenen Leitungen, die Erdimpedanz der Unterstation sowie die möglicherweise vorhandenen Transformatoren mit der jeweiligen Sternpunktbehandlung führen zu einer starken Beeinflussung der Erdungsspannung. Nur mit einer genauen Studie des Netzes können die Erdimpedanzen, die Erdungsspannung sowie die Berührungsspannung berechnet bzw. analysiert werden.

Mast 7 der Beispiel-Leitung aus Bild 3 befindet sich in der Nähe der Unterstation A und ist entsprechend weit von der Unterstation B entfernt. Bild 6a zeigt die Erdströme in den einzelnen Masterdungen bei einem Erdkurzschluss auf Mast 7. Die Ströme im Erdseil aus $1 \times 70 \text{ mm}^2$ Stahl sind in Bild 6b dargestellt. Der Reduktionsfaktor lässt sich berechnen und beträgt für dieses Beispiel 0,94. Es ist zu bemerken, dass der Anteil des Kurzschlussstroms aus der Unterstation A ungefähr 3-mal grösser ist als jener aus der Unterstation B.

Für die Berechnung des Kurzschlussstroms im Boden kann Formel 3 verwendet werden.

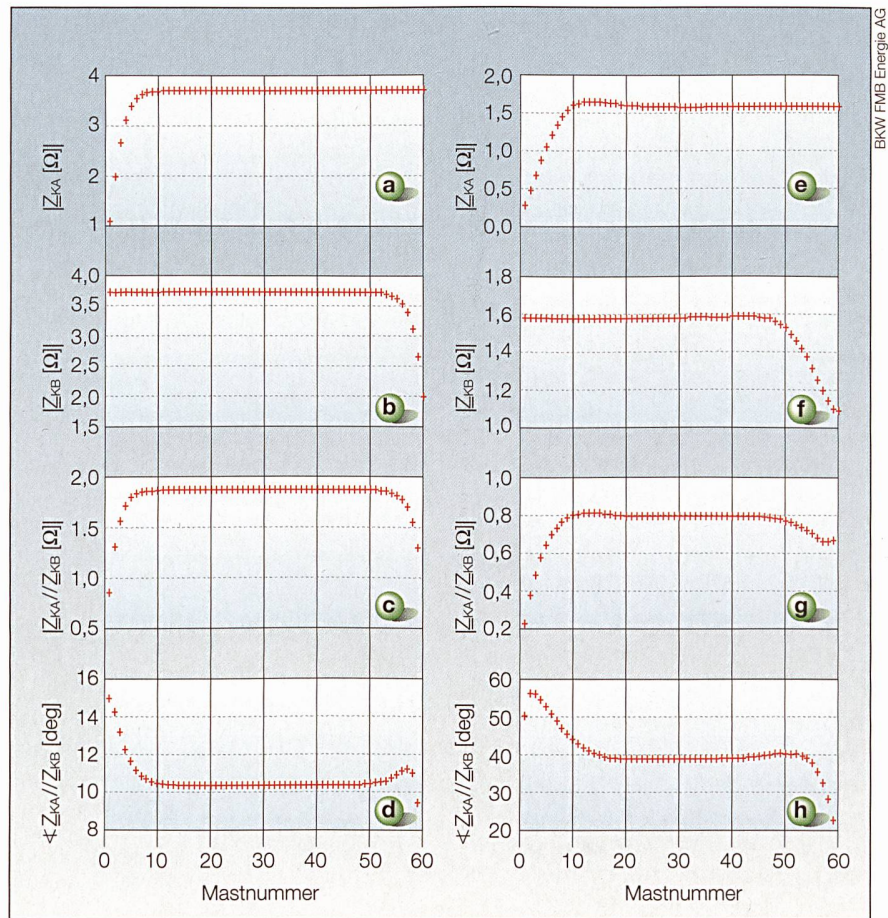


Bild 4 Kettenleiterimpedanzen der Maste in Abhängigkeit vom Erdseiltyp.
Linke Spalte: Beispiel für ein Erdseil aus Stahl $1 \times 70 \text{ mm}^2$; rechte Spalte: Beispiel für ein Erdseil aus Aldrey $1 \times 160 \text{ mm}^2$. Mast Nr. 1 ist jeweils der erste Mast auf der Seite der Unterstation A.

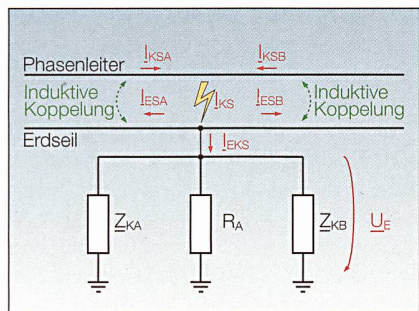


Bild 5 Ersatzschaltbild der Erdimpedanzen und Verteilung des Erdkurzschlussstroms.

$$I_{EKS} = \sum_{i=1}^n r_{Ei} \cdot I_{KS_i} \equiv (1-0,40) \cdot I_{KSA} + (1-0,06) \cdot I_{KSB} \quad (3)$$

$$\text{mit } r_E = 1 - \frac{I_{ES}}{I_{KS}}$$

Messung der Erdungsanlage

Zur Messung der Erdimpedanz gibt es verschiedene Verfahren. Mit tragbaren Messgeräten können Messungen verhältnismässig schnell und einfach gemacht werden. Das Erdseil und die Konstruktion der Maste begrenzen jedoch manchmal den Einsatzbereich dieser Messverfahren: Es können nur die gesamte Erdimpedanz und die Berührungsspannung am Mast gemessen werden. Zur Messung der Erdimpedanz eines Masts, der Kettenleiterimpedanzen sowie der Berührungsspannung im Umkreis von mehr als 10 m muss ein ausgereifteres Messverfahren angewendet werden.

Messung der Erdung mit der Strom-Spannungs-Methode

Dieses Messverfahren, das auch zum Messen der Erdungsanlagen von Unterstationen verwendet wird, ist genauer als die Messung mit tragbaren Messgeräten. Dabei speist man einen relativ grossen Strom (10–30 A) in die Erdungsanlage eines Masts. In Bild 7 wird das Prinzip der Messung schematisch dargestellt. Der Messstrom wird – unabhängig von den Leiterseilen – über eine mindestens 100 m entfernt liegende Erdungselektrode zur Quelle zurückgeführt.

Damit eine ausreichende Genauigkeit erzielt werden kann, sollte der Widerstand der provisorischen Erdungselektrode relativ klein sein. Der Messstrom (I_{mes}) sowie der über das Erdseil zu den benachbarten Masten abfliessende Strom (I_{es}) werden vektoriell gemessen. Der Verlauf der Erdungsspannung kann ebenfalls vektoriell gemessen werden. Damit lässt sich die Schrittspannung an verschiedenen Orten bestimmen. Zudem kann auch die Berührungsspannung am Mast sowie an Objek-

ten in der Umgebung gemessen werden. Da der Reduktionsfaktor des Erdseils nicht direkt gemessen werden kann, muss er über eine nachträgliche Berechnung bestimmt werden.

Berechnung der Erdimpedanz und der Erdungsspannung

Mit den Messresultaten der Strom-Spannungs-Methode können die äquivalente Erdimpedanz, die Kettenleiterimpedanzen und der Erdwiderstand des Masts berechnet werden. Durch lineare Extrapolation lassen sich dann Erdungs-, Schritt- und Berührungsspannung bei einem tatsächlichen Erdkurzschluss gut abschätzen. Zur Berücksichtigung der kritischsten Situation kann der Zustand des Bodens (Feuchtig-

keit, Temperatur) ebenfalls in die Berechnung einbezogen werden.

Beispiel einer konkreten Messung in der Skiregion Sörenberg

In der Skiregion Sörenberg wurde für den Mast Nr. 173 der 220-kV-Leitung Bickigen–Innertkirchen eine Erdungsmessung durchgeführt. Diese Messung wurde gewünscht, um die zu erwartende Berührungsspannung auf einer Stütze einer neuen Sesselbahn unmittelbar neben dem Freileitungsmast zu berechnen.

Der Mast Nr. 173 ist von der Unterstation Bickigen 49,5 km (70% der Leitungslänge) und von der Unterstation Innertkirchen 21,2 km (30% der Leitungslänge) entfernt und

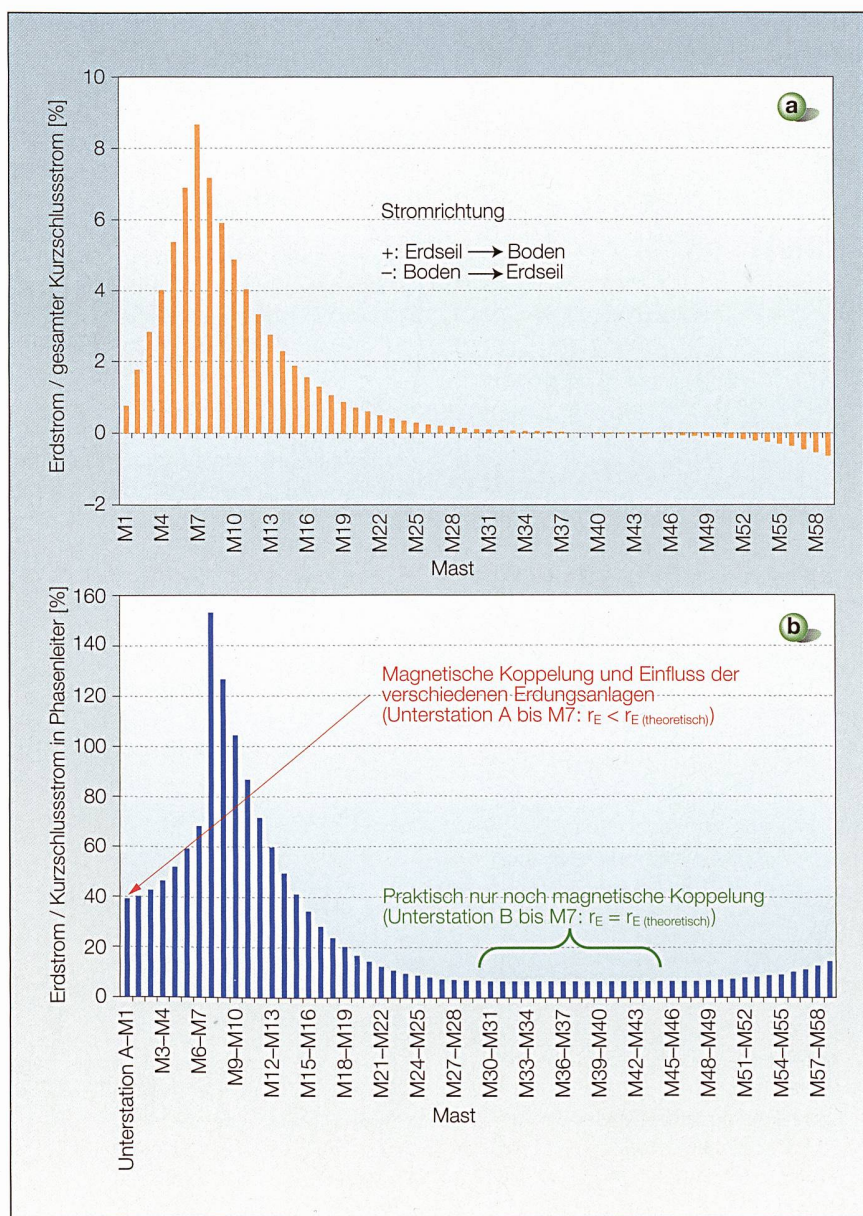


Bild 6 Auswirkungen des Kurzschlussstroms auf Erdstrom und Erdseilstrom. Bild 6a: Strom in der Masterdung; Bild 6b: Strom im Erdseil.

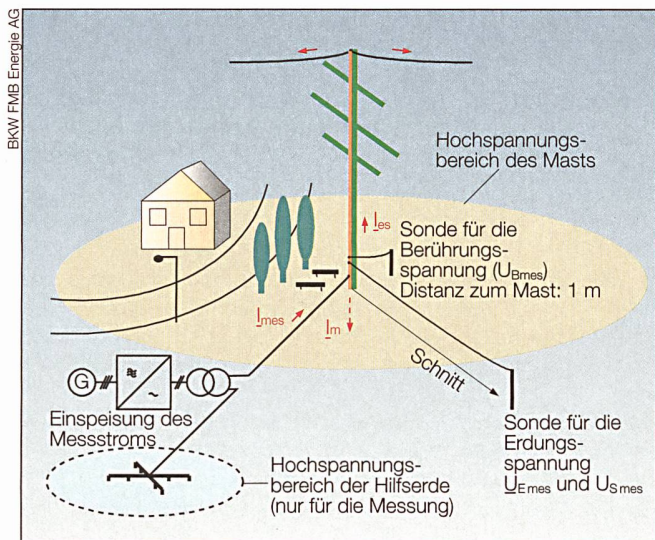


Bild 7 Prinzip einer Messung durch die Strom-Spannungsmethode.

Speisung der Messeinrichtung erfolgt durch eine Notstromgruppe, eine Verbindung zum Nieder- oder Mittelspannungsnetz ist nicht notwendig.

Die Messung kann ohne Ausschaltung der Leitung erfolgen, wobei die Messspezialisten die notwendigen Sicherheitsmassnahmen zu treffen haben. Durch den normalen Netzbetrieb verursachte Störungen können durch die Wahl der Frequenz des einzuspeisenden Stroms über die frequenzselektive Messung eliminiert werden. Mit der Messeinrichtung können Berührungsspannungen auch in der Umgebung der Erdungsanlage gemessen werden. Sie eignet sich für die Messung von Masten von Freileitungen mit Erdseil, für Kabelmuffenschächte und für Mittelspannungsanlagen wie beispielsweise Transformatorenstationen, Schaltstationen oder Industrieanlagen.

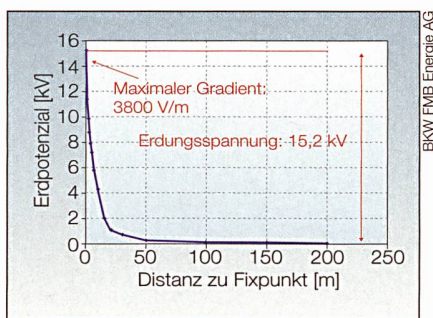


Bild 8 Erdungsspannungsprofil um den Mast bei einem Erdkurzschluss.
Fixpunkt: Erdband Mast Nr. 173.

Damit die Erdungs-, Schritt- und Berührungsspannungen abgeschätzt werden können, musste der effektiv im Erdboden fließende Fehlerstrom bestimmt werden. Dazu wurde mit einem Berechnungsprogramm für elektrische Netze der Kurzschlussstrom unter Einbezug der gesamten Erdungsimpedanz des Masts ermittelt.

Daraus ergab sich ein Erdkurzschlussstrom am Fehlerort von 10,70 kA mit $\varphi = -81^\circ$, der sich aus 3,60 kA (bei $\varphi = -80^\circ$) aus Bickigen und 7,10 kA (bei $\varphi = -81^\circ$) aus Innertkirchen zusammensetzte.

Entsprechend ergab die Berechnung des Reduktionsfaktors der Erdseile für 50 Hz für den Leitungsabschnitt in Richtung Innertkirchen als auch für jenen in Richtung Bickigen $r_E = 0,98$.

Der effektiv im Boden fließende Strom lässt sich damit gemäss Formel 4 berechnen.

$$I_{EKs} = \sum_{i=1}^n r_{E_i} \cdot I_{Ks_i} = 10,50 \text{ kA } \varphi = -81^\circ \quad (4)$$

Durch Extrapolation ergaben sich folgende Werte:

- Erdungsspannung: $U_E = 15,2 \text{ kV}$
- Maximale Schrittspannung: $U_S = 3800 \text{ V/m}$
- Berührungsspannungen: Mast Nr. 173 auf Seite Sennhütte: 2430 V; Mast Nr. 173 auf Seite Sesselbahn: 3790 V; Stütze Nr. 7 der Sesselbahn: 690 V

Eines der gemessenen Erdungsspannungsprofile für einen reellen Erdkurzschluss ist in Bild 8 dargestellt.

Die verwendete Messeinrichtung

Bei der Messeinrichtung handelt es sich um eine fahrbare Ausrüstung mit einem Gesamtgewicht von ungefähr 800 kg. Die

Referenzen

- [1] Verordnung vom 30. März 1994 über elektrische Starkstromanlagen (Starkstromverordnung), AS 1994 1199.
- [2] Regeln des SEV: Erden als Schutzmassnahme in elektrischen Starkstromanlagen. SEV/ASE 3755: 1999.
- [3] VWEV-Verlag: Erdungen in Starkstromnetzen. 1992.

Angaben zu den Autoren

Patrick Joye ist seit 2000 bei der BKW FMB Energie AG als Fachspezialist in der Abteilung Engineering Netze tätig.
patrick.joye@bkw-fmb.ch

Dr. David Orzan ist seit 1998 bei der BKW FMB Energie AG tätig. Bis 2004 war er Leiter des Ressorts Schutz und Diagnostik. Seither ist er Leiter der Abteilung Engineering Netze.
david.orzan@bkw-fmb.ch

Markus Zimmermann ist seit 2006 bei der BKW FMB Energie AG als Schutzspezialist in der Abteilung Engineering Netze tätig.
markus.zimmermann@bkw-fmb.ch

BKW FMB Energie AG, Bahnhofstrasse 20, 3072 Ostermündigen

verfügt über ein Erdseil aus $1 \times 70 \text{ mm}^2$ Stahl. Die Distanz zwischen dem Freileitungsmast und dem Mast der Sesselbahn beträgt ungefähr 25 m.

Vor Ort wurden bei der Einspeisung des Messstroms folgende Werte gemessen:

- Messstrom: 16,0 A, $\varphi = 0^\circ$
- Strom im Erdseil: 13,5 A, $\varphi = -2^\circ$
- Erdungsspannung: 19,3 V, $\varphi = 11^\circ$
- Berührungsspannungen: Mast Nr. 173 auf Seite Sennhütte 2,80 V; Mast Nr. 173 auf Seite Sesselbahn 4,38 V; Stütze Nr. 7 der Sesselbahn 0,80 V

Die Erdimpedanzen wurden aufgrund der Messung und der Bodenbeschaffenheit berechnet und ergaben die nachfolgenden Werte.

- Korrekturfaktor der Bodenbeschaffenheit: $K_J = 1,20$
- Äquivalente Erdimpedanz: $Z_E = 1,44 \Omega$, $\varphi = 10,4^\circ$
- Erdwiderstand des Masts: $R_A = 8,9 \Omega$
- Kettenleiterimpedanz: $Z_{KA}/Z_{KB} = 1,72 \Omega$, $\varphi = 12,3^\circ$

La version française de cet article se trouve en page 27 de ce numéro.

Technology is our business

Innovationspreis 2007

The **winner** is ...



Gaudenz Koepfel, ETHZ, für seine Dissertation
«Future Energy Systems»

Jetzt einreichen ...

deine Diplomarbeit in Elektro-, Energie- oder
Informationstechnik für die

ETG- und ITG-Innovationspreise 2008

Spätester Eingabetermin: **15. März 2008**

Details: www.electrosuisse.ch

electrosuisse >>>

Technology is our business

Prix Innovation 2007

The **winners** are ...



Alain Crevoisier et Arnaud Guichard,
HEIG-VD, pour leur projet de recherche
«Plateau musical interactif»

Alors annoncez-vous dès maintenant!

Soumettez votre travail de diplôme du domaine électro-technique, des techniques de l'énergie ou des techniques de l'information pour les

Prix Innovation 2008 de l'ETG et de l'ITG

jusqu'au **15 mars 2008** au plus tard

Plus d'information: www.electrosuisse.ch

electrosuisse >>>