Kompensationsleiter im Muffenbereich von Energiekabeln

Autor(en): **Brakelmann, Heinrich**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **89 (1998)**

Heft 25

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-902156

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Mit Kompensationsleitern lassen sich Magnetfelder von erdverlegten Kabeln verkleinern. Im Bereich der Kabelmuffen, wo die Verlegegeometrie der Kabel zu dreidimensionalen Feldverteilungen führt, stellt sich diese Massnahme schwieriger dar. Die Rechnungen und Messungen in diesem Beitrag zeigen aber, dass Kompensationsleiter auch hier zur Reduzierung der Magnetfelder eingesetzt werden können.

Kompensationsleiter im Muffenbereich von Energiekabeln

■ Heinrich Brakelmann

Problemstellung

Elektronische Systeme können schon durch sehr schwache 50-Hz-Magnetfelder gestört werden. Zur Vermeidung solcher Störungen durch erdverlegte Einleiter-Drehstromkabel wurden in [1, 2] unterschiedliche Massnahmen diskutiert: so wurde am Beispiel eines 110-kV-Einleiter-VPE-Kabels sehr hoher Übertragungsleistung gezeigt, welche Möglichkeiten zur Magnetfeld-Reduzierung durch die Art der Verlegung, durch Kompensationsbeschaltungen der Kabelmäntel oder auch durch den Einsatz von Kompensationsleitern genutzt werden können.

Beim Einsatz von Kompensationsleitern waren in [2] die Magnetfelder im Bereich der Querverbindungen an den Enden der Kompensationsabschnitte noch ausser Acht geblieben. Hier sind prinzipiell dreidimensionale Magnetfelder zu untersuchen, wozu im folgenden ein Berechnungsverfahren beschrieben wird.

Ein zusätzliches Problem ergibt sich regelmässig im Bereich der Kabelmuffen: aus konstruktiven und montagetechnischen Gründen wird in der Muffengrube oft die längs der Trasse gewählte, meist relativ dichte Verlegeanordnung der Einleiterkabel aufgegeben und statt dessen eine Einebenenanordnung mit grossem Achsabstand gewählt. Eine solche Anordnung bewirkt dann jedoch im Muffenbereich weitaus höhere Magnetfelder, als sie längs der übrigen Kabeltrasse gegeben sind. Im vorliegenden Bericht wird daher auch die Fragestellung aufgegriffen, die Magnetfelder im Muffenbereich von Einleiterkabeln mit Hilfe von Kompensationsleitern zu reduzieren. Dabei wird allein der Aspekt der Beeinflussung im ungestörten, symmetrischen Betrieb der Kabel angegangen.

Magnetfeld-Reduzierung durch Kompensationsleiter

Wie bereits in [2] diskutiert, sollen Magnetfeld-Reduzierungen in gewünschtem Ausmass durch Verlegung zusätzlicher Kompensationsleiter im Kabel-

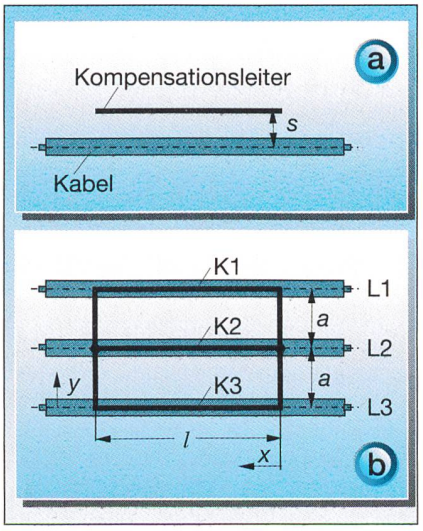

Bild 1 Versuchsanordnung mit drei Kompensationsleitern je Kabelader
a: Seitenansicht; b: Draufsicht; a = 1,0 m; s = 0,3 m; l = 10 m

Adresse des Autors
Prof. Dr.-Ing. *Heinrich Brakelmann*
Fachbereich Elektrotechnik, Gerhard-Mercator-Universität, D-47048 Duisburg

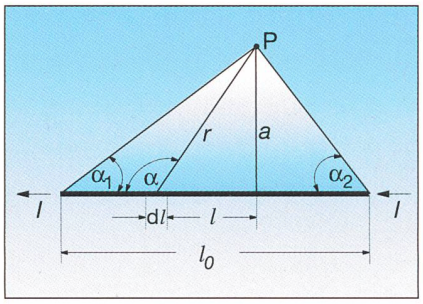

Bild 2 Zur Berechnung der magnetischen Induktion im Aufpunkt P

Betrachtet wird ein vom Strom *I* durchflossener Leiterabschnitt der Länge l_0.

graben erreicht werden, die an ihren Enden miteinander kurzgeschlossen sind. Ein Beispiel einer solchen Anlage mit drei Kompensationsleitern je Kabelader ist in Bild 1 dargestellt. Es sollen keine zusätzlichen Spannungsquellen wie Umbauwandler, Phasen-Drehregler oder ähnliches eingesetzt werden, um die Kompensationseinrichtung wenig aufwendig, wartungsfrei, störungsunanfällig und so zu gestalten, dass ihre Lebenserwartung derjenigen der Kabelanlage entspricht.

Berechnungsverfahren

Damit stellt sich zunächst einmal die Aufgabe, die von den (symmetrischen) Leiterströmen in den Kompensationsleitern induzierten Ströme als Funktion ihrer Position und ihres Leiterquerschnitts zu berechnen. Diese Berechnung erfolgt über die Bestimmung der Eigen- und Koppelimpedanzen aller Leiter. Bei der vorliegenden Problematik, dass Kompensationsleiter endlicher Länge mit längs der Kabeltrasse wechselnden Positionen zu berücksichtigen sind, unterteilt man die Trasse zweckmässigerweise in mehrere Längenabschnitte, für deren Anfang und Ende zunächst die Anfangs- und Endpunkte sämtlicher Leiter definiert sind. Windschief zueinander verlaufende Leiterabschnitte lassen sich durch rechtwinklige Poligone ersetzen, so dass ausschliesslich Leiterabschnitte entstehen, die entweder parallel oder aber senkrecht zueinander verlaufen. Die Koppelimpedanzen solcher Leiterabschnitte sind beispielsweise in [3,4] angegeben. Die den Kabelleitern und Kompensationsleitern insgesamt zuzuordnenden Eigen- und Koppelimpedanzen folgen dann aus der Kombination der entsprechenden Abschnittsimpedanzen.

Auf diese Weise ergibt sich für die in den N_L Kabelleitern induzierten Längsspannungen $\underline{U}_L$ und die in den N_K Kompensationsleitern induzierten Längsspannungen $\underline{U}_K$ ein Gleichungssystem vom Rang $N_{ges} = N_L + N_K$ in der Form

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_L \\ \underline{U}_K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_L \\ \underline{I}_K \end{pmatrix} \qquad (1)$$

mit

$\underline{U}_L$ Vektor der (Kabel-)Leiter-Längsspannungen,

$\underline{U}_K$ Vektor der Kompensationsleiter-Längsspannungen,

$\underline{I}_L$ Vektor der Leiterströme,

$\underline{I}_K$ Vektor der Kompensationsleiterströme,

$\underline{A}$ Matrix der Koppelimpedanzen zwischen den (Kabel-)Leitern,

$\underline{B}$ Matrix der Koppelimpedanzen zwischen Kompensationsleitern und Leitern,

$\underline{C}$ Matrix der Koppelimpedanzen zwischen Leitern und Kompensationsleitern und

$\underline{D}$ Matrix der Koppelimpedanzen zwischen den Kompensationsleitern.

Je nach Schaltungsbedingungen kann das Gleichungssystem (1) umgestellt werden, um hieraus die Kompensationsleiterströme zu bestimmen. So ergibt sich beispielsweise bei beidseitigem Kurzschliessen und Erden der Kompensationsleiter die Bedingung

$$\underline{U}_K = 0 = \underline{C} \cdot \underline{I}_L + \underline{D} \cdot \underline{I}_K \qquad (2)$$

woraus die Kompensationsleiterströme folgen:

$$\underline{I}_K = -\underline{D}^{-1} \cdot \underline{C} \cdot \underline{I}_L \qquad (3)$$

Bei nur einseitiger Erdung oder bei ungeerdeten Kompensationsleitern ergibt

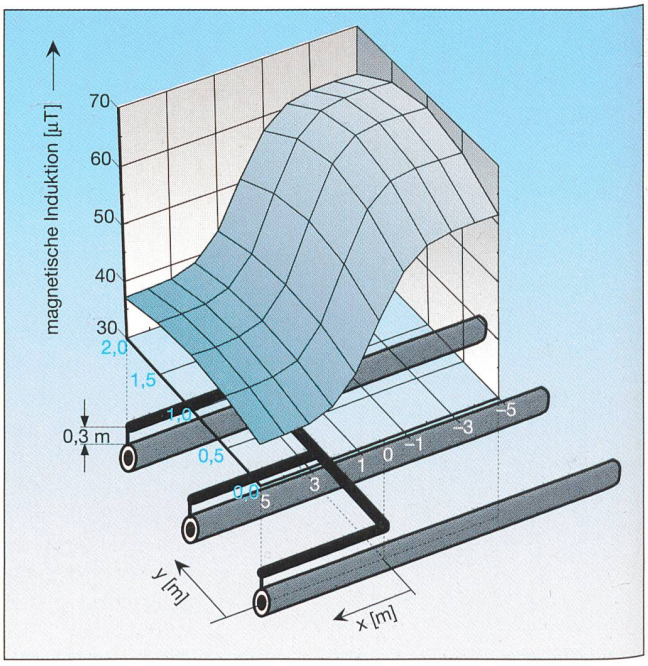

Bild 3 Verteilung der magnetischen Induktion in einer Höhe von 1 m über dem Erdboden für 1600 A Laststrom des 110-kV-Einleiter-VPE-Kabels

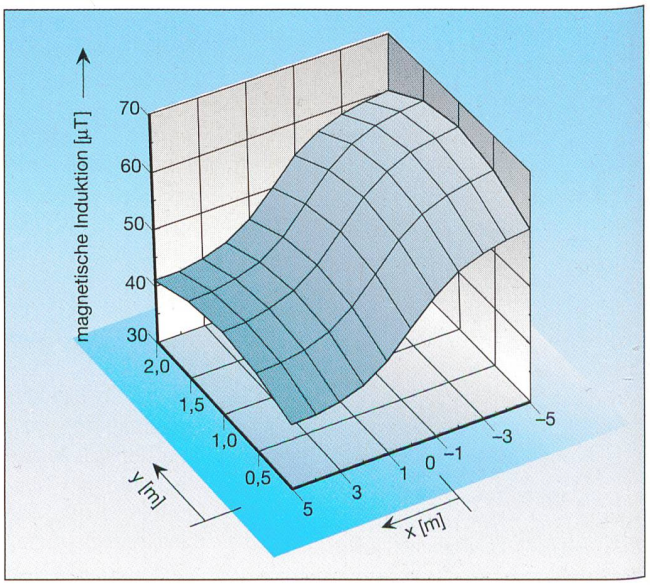

Bild 4 Verteilung der magnetischen Induktion (wie in Bild 3, aber ohne Berücksichtigung der Kurzschlussverbindungen bei der Magnetfeldberechnung)

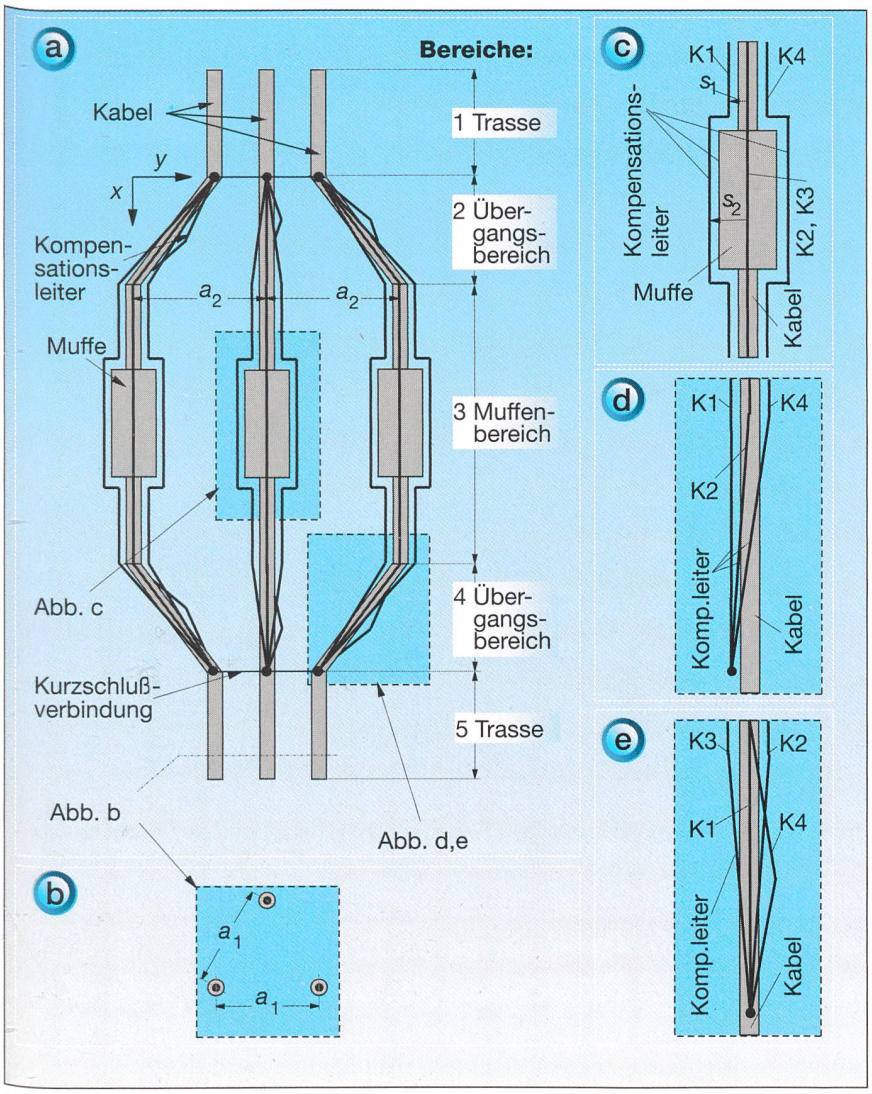

Bild 5 Anordnung der Kabel, der Muffen und der Kompensationsleiter im Bereich der Muffengrube

a: Draufsicht, b: Querschnitt im Bereich der Kabeltrasse, c: Seitenansicht der Muffe, d: Seitenansicht im Übergangsbereich 4, e: Draufsicht im Übergangsbereich 4

sich einerseits die Summenbedingung für die Kompensationsleiterströme

$$\Sigma \underline{I}_K = 0 \qquad (4)$$

und andererseits die Bedingung, dass die Spannungen längs aller N_K Kompensationsleiter gleichgross sein müssen:

$$\underline{U}_K = \underline{U}_{KI} = \underline{U}_{Ki},\ i = 1 \ldots N_K \qquad (5)$$

Durch Einarbeiten der Bedingungen (4) und (5) in Gleichungssystem (1) können mit Hilfe geeigneter Matrizenumformungen die zunächst unbekannte Kompensationsleiter-Längsspannung $\underline{U}_K$ und anschliessend die Kompensationsleiterströme bestimmt werden.

Zur Magnetfeldberechnung werden alle auftretenden Ströme als Linienleiterströme betrachtet. Soll die magnetische Induktion in einem Aufpunkt, beispielsweise an der Erdoberfläche, bestimmt werden, so ergeben sich in diesem Aufpunkt jeweils die x-Komponente, die y-Komponente und die z-Komponente der magnetischen Induktion durch Überlagerung der komplexen Einzelkomponenten, die von allen Linienleiterströmen der einzelnen Leiterabschnitte nach Bild 2 hervorgerufen werden. Der Maximalwert der Induktion folgt durch zeitabhängige Betragsbildung und Suche innerhalb eines engen Zeitrasters.

So liefert nach dem Biot-Savartschen Gesetz ein vom Strom I durchflossener Leiterabschnitt der Länge d$\boldsymbol{l}$ nach Bild 2 den Anteil d$\boldsymbol{B}$ zur magnetischen Induktion im Aufpunkt P, der die aufgespannte Ebene senkrecht durchdringt [5]:

$$\mathrm{d}\boldsymbol{B} = \mu I/(4\pi r^3) \cdot (\mathrm{d}\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{r}) \qquad (6)$$

Hat der Leiterabschnitt die Gesamtlänge l_0, so liefert die Integration von Gleichung (6) mit den Geometriegrössen nach Bild 2 den Gesamtanteil (vergl. auch [5])

$$\Delta\boldsymbol{B} = [\mu I/(4\pi a)] \cdot (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2)\ \boldsymbol{l}_0 \times \boldsymbol{a}/(l_0\, a) \qquad (7)$$

mit a dem Abstandsvektor nach Bild 2.

Die Berechnung dieser magnetischen Induktion für alle Leiterabschnitte, Zerlegung in ihre kartesischen Komponenten und anschliessende Überlagerung gibt die Möglichkeit, Magnetfelder beliebiger Leiteranordnungen zu bestimmen, die sich durch gerade Leiterabschnitte annähernd darstellen lassen.

Messergebnisse

Zur Überprüfung des Berechnungsverfahrens wurde die in [2] beschriebene Versuchsanlage nach Bild 1 aufgebaut, bei der die drei induzierenden Kupferleiter einen Querschnitt von 630 mm² aufweisen und mit einem Achsabstand von 1,0 m in einer Ebene verlegt sind; der Strom je Phase betrug 500 A. Als Kompensationsleiter wurden 10-kV-VPE-Einleiterkabel mit 120 mm²-Aluminiumleitern verwendet. Die Länge der Kompensationsleiter betrug rund 6 m zuzüglich der Länge der Querverbindungen.

Je Kabelader wurden bis zu vier Kompensationsleiter symmetrisch und äquidistant zur Kabelachse in unterschiedlichen Positionen verlegt. Der für die unterschiedlichen Fälle in [2] durchgeführte Vergleich zwischen den gemessenen Leiterströmen und magnetischen Induktionen mit ihren Rechenwerten weist aus, dass eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung gegeben ist.

Die relativen Abweichungen der einer Kabelader zuzuordnenden, berechneten bzw. gemessenen Stromsumme betragen zur unsicheren Seite (d.h. geringere Kompensationswirkung) maximal 2,6%. Damit kann davon ausgegangen werden, dass die sich einstellenden Kompensationsleiterströme durch das verwendete Rechenprogramm mit tolerierbarer Fehlerschranke prognostiziert werden.

Magnetfeld der Kurzschlussverbindungen von Kompensationsleitern

Mit Hilfe der oben beschriebenen Berechnungsmethode wurde der Frage nachgegangen, wie das magnetische Feld im Bereich der Querverbindungen an den Enden der Kompensationsleiter verteilt ist: da sich hier die Magnetfelder der Kompensationsleiterströme (quer zur Kabelrichtung) und der Kabelleiter überlagern, war eine Induktionsanhebung in diesen Bereichen befürchtet worden.

Hierzu wird als Beispiel, wie in [2], ein 110-kV-Einleiter-VPE-Kabel betrachtet, das zur Übertragung hoher Leistungen einen Kupferleiterquerschnitt von 1600 mm² (Millikenleiter) aufweist. Die Dicke der VPE-Isolierung beträgt 18 mm. Die Kabeladern haben

Kupferschirme von 100 mm² Querschnitt mit darüberliegendem Korrosionsschutz und einen Aussendurchmesser von rund 103 mm. Die Kupferschirme sind zur Vermeidung von Längsstrom-Verlusten einseitig geerdet. Das Kabelsystem wird mit einem Strom von 1600 A betrieben.

Nach Bild 1 soll von einer Einebenenanordnung mit einer Verlegetiefe von 1,7 m und einem grossen Achsabstand von 1,0 m ausgegangen werden. Ohne Kompensationsleiter beträgt der über der mittleren Kabelader auftretende Maximalwert der magnetischen Induktion 67 µT.

Als Kompensationsleiter soll oberhalb jeder Kabelader mit einem Achsabstand von 0,3 m jeweils ein einadriges 1-kV-Kunststoffkabel mit einem Kupferleiterquerschnitt von 500 mm² entsprechend Bild 1 verlegt werden.

Bild 3 zeigt die sich in 1 m Höhe über der Erdoberfläche einstellenden magnetschen Flussdichten $\boldsymbol{B}_1$ im Bereich der Kompensationsleiter, insbesondere auch im Bereich der Querverbindungen ($x = 0$ m).

Man erkennt, dass die magnetische Induktion im Kompensationsbereich schon in einem Abstand von etwa 3 m vom Kompensationsleiterende anzusteigen beginnt und oberhalb der Querverbindungen eine Grösse von rund 56 µT erreicht (gegenüber rund 39 µT in der Mitte des Kompensationsbereichs).

Zum Vergleich wurde das Magnetfeld für dieselben Kabelleiter- und Kompensationsleiterströme, aber ohne Berücksichtigung der Querverbindungen der Kompensationsleiter untersucht. Bild 4 weist hierzu aus, dass die Kompensationsleiterströme in den Querverbindungen die magnetischen Induktionen innerhalb des Kompensationsbereichs abschwächen, ausserhalb des Kompensationsbereichs hingegen anheben, insgesamt also die Verteilungen längs der z-Achse steiler werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass

- die magnetischen Induktionen im Endenbereich der Kompensationsleiter höher sind als im sonstigen Kompensationsbereich,
- die Querverbindungen aber der Kompensationsleiter sich positiv, das heisst feldvermindernd im Kompensationsbereich auswirken.

Im folgenden sollen die Magnetfelder im Bereich einer Muffengrube einer eingehenden Betrachtung unter Berücksichtigung der realen Geometrie unterzogen werden.

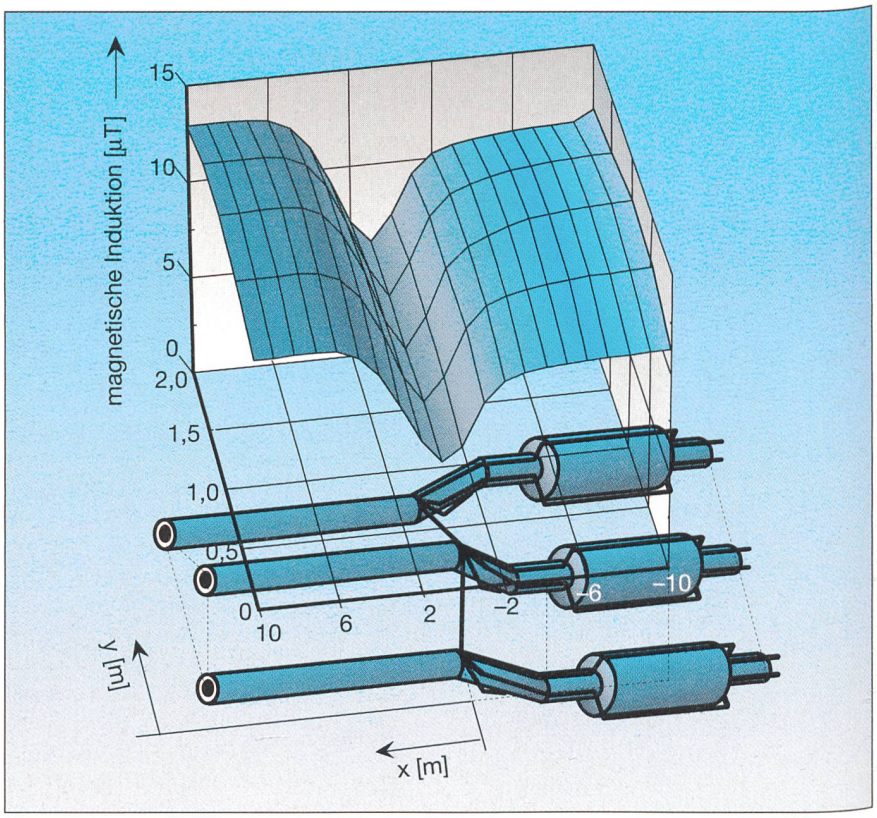

Bild 6 Verteilung der magnetischen Induktion in einer Höhe von 1 m oberhalb der Muffengrube für einen Laststrom von 1600 A

Magnetfeld einer Muffengrube mit Kompensationsanlage

Bild 5a zeigt die Draufsicht der untersuchten Muffengrube. Dabei wird davon ausgangen, dass die Kabel auf der Trasse im Dreieck mit einem Achsabstand von $a_1 = 0{,}3$ m verlegt sind (Bild 5b). Durch diese Verlegeanordnung wird sichergestellt, dass bei dem höchsten zu erwartenden Betriebsstrom von 1600 A eine einzuhaltende magnetische Induktion B_{max} nicht überschritten wird.

Dies ist allerdings im Bereich der Muffengrube ohne Kompensationsleiter nicht zu erreichen, da hier aus verlege- und montagetechnischen Gründen eine Einebenenanordnung mit einem Achsabstand von $a_2 = 1{,}0$ m erforderlich wird. Zur Abschwächung des Magnetfeldes sollen daher im Bereich der Muffengrube je Kabelader vier Kompensationsleiter (Kupferleiterquerschnitt 500 mm²) vorgesehen werden.

Die Positionierung der Kabeladern, der Muffen und der zwölf Kompensationsleiter sind den Teilabbildungen 5a bis e zu entnehmen. Die Kompensationsleiter werden ausserhalb des eigentlichen Muffenbereichs dicht an den Kabeladern (Achsabstand $s_1 = 0{,}1$ m) geführt; im Bereich der Muffe wechseln sie ihre Positionen entsprechend Bild 5c und weisen hier einen Achsabstand von $s_2 = 0{,}36$ m zu den Kabelleitern auf. Sie sind auf beiden Seiten der Muffengrube, jeweils am Anfang der Trassenbereiche, in denen die Kabel wieder in enger Dreiecksanordnung verlegt sind, durch eine oberhalb der Kabeladern geführte Querverbindung kurzgeschlossen.

Die sich im Bereich der Muffengrube in 1 m Höhe über der Erdoberfläche einstellenden magnetischen Flussdichten $\boldsymbol{B}_1$ sind in Bild 6 wiedergegeben. Man erkennt, dass mit der hier gewählten Kompensationsanlage die magnetische Induktion im Muffenbereich spürbar gesenkt werden kann (auf rund 20% der Induktion ohne Kompensation; vgl. vorhergehender Abschnitt) und nur geringfügig höher liegt als auf der übrigen Kabeltrasse.

Auch zu diesen Rechenergebnissen liegen inzwischen Vergleichsmessungen vor, die eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung ausweisen.

Folgerungen

Es wird der Fall betrachtet, dass aufgrund störempfindlicher Geräte im unmittelbaren Einwirkungsbereich einer Kabeltrasse die stationäre magnetische Flussdichte einen vorgegebenen Höchstwert nicht überschreiten soll. Selbst wenn es auf der Trasse durch eine geeignete Verlegeanordnung gelingt, diesen

Höchstwert einzuhalten, so muss doch im Bereich der Kabelmuffen aus konstruktiven und montagetechnischen Gründen die längs der Trasse gewählte, meist enge Verlegeanordnung der Einleiterkabel aufgegeben und statt dessen eine Einebenenanordnung mit grossem Achsabstand gewählt werden, die höhere Magnetfelder bewirkt, als sie längs der übrigen Kabeltrasse gegeben sind.

Im vorliegenden Bericht wird gezeigt, dass die Magnetfelder im Muffenbereich mit Hilfe von Kompensationsleitern reduziert werden können, die an ihren Enden miteinander kurzgeschlossen sind. Die für solche inhomogenen Verlegeanordnungen auftretenden, dreidimensionalen Magnetfeldverteilungen können mit der beschriebenen Methode analysiert werden.

Anzahl, Querschnitt und Positionierung der Kompensationsleiter hängen in starkem Masse von mehreren Parametern ab, so beispielsweise von der geforderten Magnetfeldreduktion und der Geometrie des Muffenbereiches. Zudem sind thermische Gesichtspunkte zu beachten, da die in den Kompensationsleitern entstehenden Stromwärmeverluste die gerade im Muffenbereich oft kritische thermische Situation weiter verschärfen; Sondermassnahmen wie beispielsweise eine thermische Stabilisierung können hier erforderlich werden.

Conducteur de compensation au niveau des boîtes de jonction

Le rapport ci-présent démontre l'application des conducteurs de compensation afin de supprimer des champs magnétiques. Est analysé en particulier le comportement aux environs des boîtes de jonction, où la géométrie de pose des câbles entraîne des répartitions tridimensionnelles des champs. Nombre, section et positionnement des conducteurs de compensation dépendent de la réduction exigée des champs magnétiques et de la géométrie des environs des boîtes de jonction. Les pertes par effet Joule produits dans les conducteurs de compensation peuvent mener juste au niveau des boîtes de jonction à des températures critiques et rendre nécessaires des mesures d'exception comme par exemple une stabilisation thermique.

Literatur

[1] *H. Brakelmann:* EMV-Massnahmen für Drehstrom-Einleiterkabel. El.wirtsch. 15(1995), 926–930.

[2] *H. Brakelmann:* Magnetfeldreduktion durch Zusatzleiter in Energiekabeltrassen, El.wirtsch. 5(1996), 274–279.

[3] *K. Fr. Eichhorn:* Induktivitäten windschiefer Leitersysteme. Arch.f.El.technik (1979), 353–361.

[4] *A. Farschtschi:* Berechnung von Stromverteilungen und Induktivitäten bei räumlich dreidimensionalen Schleifen-Anordnungen. Habilitationsschrift TU Clausthal, 1984.

[5] *E. Philippow:* Grundlagen der Elektrotechnik. Berlin/Offenbach: Hüthig 1989.

[6] *H. Brakelmann:* Energietechnik programmiert. Probleme, Lösungen, Programme. Berlin/Offenbach: VDE-Verlag 1989.

Betriebsleiter von Elektroversorgungsunternehmen!

Haben Sie das Sicherheitskonzept bei Ihrem Kunden überprüft ...

... und wie steht's mit Ihrem eigenen?

SEV ASE

Ein Sicherheitskonzept mit dem SEV gibt Ihnen Gewissheit.

Kontaktstelle:
Rolf Oster, SEV, SM, Telefon 01 956 12 10, Fax 01 956 17 10
E-Mail: rolf.oster@sev.ch