

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 99 (2008)
Heft: 7

Artikel: Magnetfeldereduzierung bei Drehstrom-Einleiterkabeln
Autor: Brakelmann, Heinrich
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-855842>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 08.02.2026

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

Magnetfeldreduzierung bei Drehstrom-Einleiterkabeln

Kompensationsleitersysteme mit 1-kV-Kabeln in optimierter Anordnung

Bei den Planungs- und Genehmigungsverfahren elektrischer Energieübertragungssysteme tritt der Aspekt der von ihnen hervorgerufenen Magnetfelder und deren Auswirkungen immer häufiger in den Vordergrund. Niedrige Grenzwerte sowie die Forderung nach Verträglichkeit mit anderen technischen Systemen erzwingen eine besondere Auslegung der Kabelanlagen für Hoch- und Höchstspannung. In diesem Beitrag wird aufgezeigt, wie das Magnetfeld von Einleiter-Drehstromkabeln mithilfe von Kompensationsleitern verringert werden kann. Für die Berechnung können sowohl die Linienleitermethode als auch die weit aufwendigere Finite-Elemente-Methode gleichwertig angewendet werden.

Die Ausführungsvarianten für die Kompensation sind – je nach Schirmungsaufgabe – mannigfaltig. Wegen der nicht mehr intuitiv zu optimierenden Vielzahl der Parameter (Anzahl, Leiterquerschnitt und -ma-

gen zur Einhaltung von $0,1 \mu\text{T}$ sind in anderen Ländern schon durchgesetzt worden.

Auch die elektromagnetische Verträglichkeit mit benachbarten technischen Systemen kann zu erhöhten Anforderungen an die Auslegung der Energieübertragungs-

systeme führen, wie etwa die Begrenzung der magnetischen Induktion oberhalb einer 400-kV-Trasse in Wien auf $15 \mu\text{T}$, begründet über die mögliche Beeinflussung von Herzschrittmachern.

Der Vergleich zwischen den Energieübertragungssystemen [1, 2] zeigt, dass die Höchstwerte der magnetischen Induktion direkt unter einem Freileitungssystem geringer sein können als diejenigen direkt oberhalb eines in einer Ebene verlegten Einleiterkabelsystems, insbesondere dann, wenn die Feldgrößen unmittelbar an der Erdoberfläche miteinander verglichen werden. Es zeigt sich allerdings auch, dass schon in wenigen Metern seitlichem Abstand vom Kabelsystem das Magnetfeld der Freileitung erheblich grösser wird als das der Kabel. Dies trifft somit auch für jede Wohnbebauung zu, die üblicherweise mit seitlichen Abständen von meist erheblich mehr als 1 bis 2 m errichtet ist.

Alternativen mit geringen Magnetfeldern ergeben sich bei der unterirdischen Energieübertragung einerseits durch die – allerdings belastbarkeitsmindernde – Le-

Heinrich Brakelmann

terial der Kompensationsleiter sowie ihre Koordinaten und die Aufteilung des Gesamtleiterquerschnitts) wird ein genetischer Algorithmus zur Optimierung angewendet. Dabei ergeben sich teilweise überraschende, nicht vorhersehbare Lösungen. Besondere Betrachtungen sind bei Kabel-Doppelsystemen anzustellen, die nach dem $(n-1)$ -Prinzip ausgelegt sind. Hierzu wird als konkretes Fallbeispiel eine 380-kV-Trasse analysiert. Es ergeben sich einfache Lösungen mit geringem Aufwand, wozu vier bis sechs 1-kV-Kompensationsleiterkabel oberhalb der Kabeladern in die Trasse einzubringen sind.

Die international höchst unterschiedlichen Grenzwerte reichen von dem von der WHO¹⁾ als Vorsorgewert empfohlenen Grenzwert für die magnetische Induktion (Flussdichte) von $100 \mu\text{T}$ ²⁾ bis zu spürbar geringeren Grenzwerten wie beispielsweise in Italien mit $3 \mu\text{T}$ für Neuanlagen und in der Schweiz mit $1 \mu\text{T}$ bis zu $0,2 \mu\text{T}$ z.B. in bestimmten italienischen Regionen. Forderun-

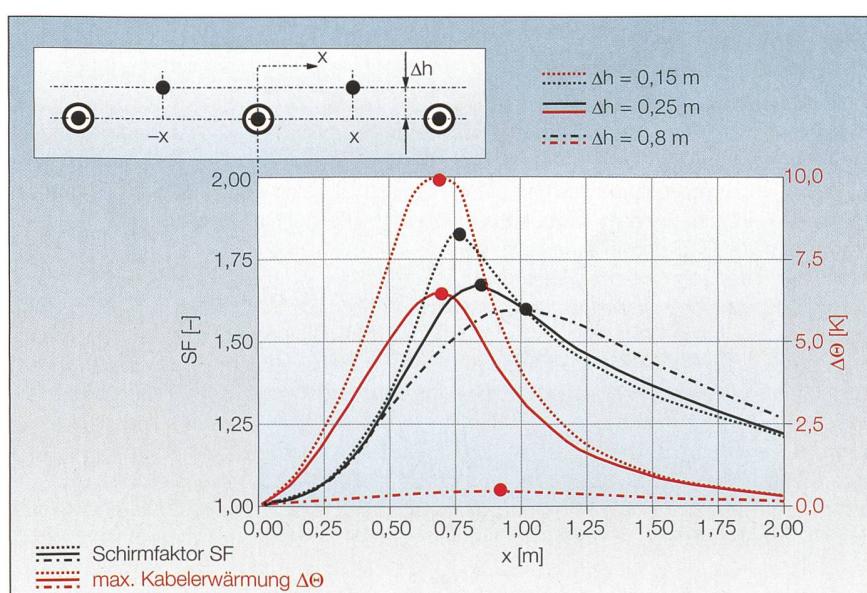


Bild 1 Schirmfaktor SF und maximale Kabelerwärmung $\Delta\Theta$ als Funktion der x-Koordinate des rechten Kompensationsleiters.

Parameter: Vertikaler Achsabstand Δh von Kabeln und Kompensationsleitern (mittlere Kabelader: $x = 0$).

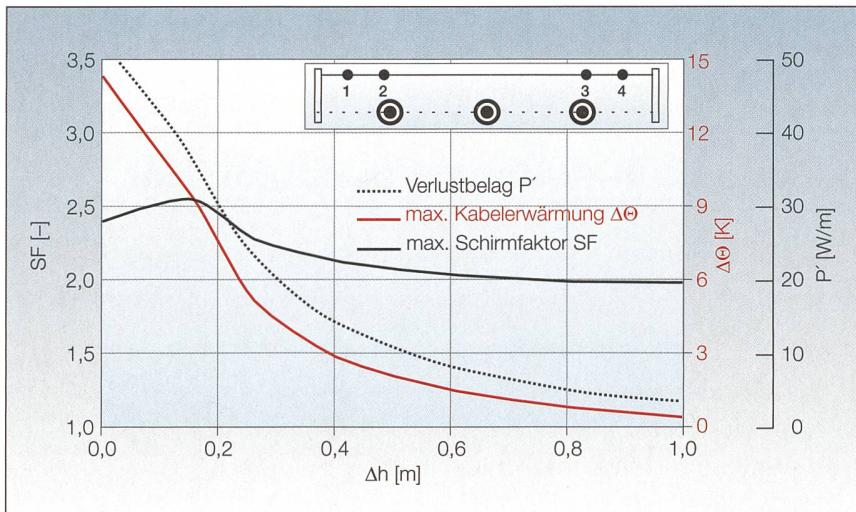


Bild 2 Maximaler Schirmfaktor SF, Verlustbelag P' und maximale Kabelerwärmung $\Delta\theta$ von vier in einer Ebene um Δh oberhalb des Kabelsystems liegenden vier Kompensationsleitern gleichen Querschnitts ($4 \times 240 \text{ mm}^2$).

gung der Kabel im dichten Dreieck³⁾ sowie durch den Einsatz von Bipolarsystemen [3, 4].

Je nach Übertragungsaufgabe, Anlagenauslegung und vorgegebenem Grenzwert wird eine Reduktion des Magnetfeldes durch Zusatzmassnahmen erforderlich. Der Schirmungsfaktor SF einer solchen Massnahme wird üblicherweise als $SF = B_0/B_{\text{red}}$ definiert, wobei B_0 die magnetische Induktion der Anlage ohne (SF = 1,0) und B_{red} mit Schirmungsmassnahme bedeuten. Eine Realisierung von Schirmungsfaktoren bis zu etwa 10 lässt sich noch relativ einfach mithilfe von Kompensationsleitern im Kabelfeld erreichen.

Kabelanlagen mit Kompensationsleitern

Der Vorschlag, parallel zu den zu schirmenden Kabeln Kompensationsleiter zu legen und diese an den Enden miteinander zu verbinden, existiert schon seit geraumer Zeit [5, 6]. Prinzipiell werden in solche Kompensationsleiter Gegenströme induziert, die nach der Lenz'schen Regel versuchen, ihrer Ursache entgegenzuwirken, also das ursprüngliche Magnetfeld der Kabel zu reduzieren. Anhand einer Versuchsanlage, in der unterschiedliche Anordnungen untersucht wurden [5], wurde die Übereinstimmung zwischen der nachfolgend erläuterten Berechnung und den Messergebnissen nachgewiesen. Es wird in [5] gezeigt, dass mit entsprechend vielen Kompensationsleitern grossen Querschnitts durchaus Schirmungsfaktoren bis zu etwa 11 erreicht werden können, allerdings mit den Nachteilen grossen Aufwandes und hoher Verluste und damit auch ent-

sprechend grosser Beeinträchtigungen der Kabelbelastbarkeit.

Die Frage der Magnetfeldverteilung im Endenbereich solcher Kompensationsleiter wurde in [6] im Zusammenhang mit der Schirmung in einem Muffenbereich untersucht. Dass auch mit Kompensationsleitern in grösserem Abstand zu den Kabeln Schirmfaktoren von 6 bis 8 erzielt werden können, kann anhand verschiedener Anwendungsbeispiele gezeigt werden: Auf verschiedenen, im Kabelgraben hierfür prädestinierten Flächen – horizontal oberhalb und unterhalb der Kabel sowie vertikal an beiden Grabenwänden – werden Möglichkeiten einer optimalen Positionierung aufgezeigt [7].

Der Frage einer optimalen magnetischen Schirmung mit möglichst geringer thermischer Beeinträchtigung der zu schirmenden Kabel wird derzeit in der Cigré⁴⁾-Working Group B1-23 nachgegangen. Optimierungsmöglichkeiten solcher Kompensationsleiter-Anordnungen werden im Folgenden ausführlich diskutiert.

Analysemethoden

Prinzipiell werden parallel zu den zu schirmenden Kabeln Kompensationsleiter gelegt und diese an den Enden miteinander verbunden. Das Problem besteht darin, die in diese Kompensationsleiter induzierten Gegenströme zu bestimmen und anschliessend aus allen Strömen der Anlage das resultierende Magnetfeld, die Leiterverluste und die thermischen Wechselwirkungen zu berechnen [5, 6, 7]. Hierzu sind die elektromagnetischen Kopplungen aller beteiligten Leiter über ihre Selbst- und Gegeninduktivitäten [8] unter Beachtung des Erdeinflusses

in einem Gleichungssystem zu formulieren. Dieses Gleichungssystem wird dann entsprechend den Erdungsbedingungen der Kompensationseiter umgeformt und gelöst [9].

Alternativ zu der hier beschriebenen Linienleitermethode besteht grundsätzlich auch die Möglichkeit, die in die Kompensationsleiter induzierten Ströme mithilfe der Finite-Elemente-Methode zu berechnen. Hierzu werden die Leiterquerschnitte aller Kompensationsleiter zu einem zusammenhängenden Wirbelgebiet erklärt, wodurch implizit der beidseitige Kurzschluss der Kompensationsleiter berücksichtigt wird. Vergleichsrechnungen mit beiden Verfahren zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der Rechenergebnisse.

Besondere Aufmerksamkeit ist den Querverbindungen an den Enden der Kompensationsleiter in dreierlei Hinsicht zu widmen [6]: Durch diese Querverbindungen vergrössert sich die Länge der Kompensationsleiter, ohne dass hier Längsspannungen durch die Kabelströme induziert würden. Entsprechende Faktoren können bei der Impedanzbestimmung eingeführt werden.

Zum anderen fliessen hier die Kompensationsleiterströme parallel zur Erdoberfläche, ohne dass sie ihrerseits (wie auf der übrigen Strecke) von den Kabelströmen kompensiert würden. Die hierdurch entstehenden Magnetfelder sind daher gesondert zu untersuchen [6]. Auch bedarf die Zusatzerwärmung der Kabel durch die in diesem Bereich kreuzenden Kompensationsleiter einer besonderen Betrachtung.

Belastbarkeitsreduktionen durch Kompensationsleiterverluste

Die in den Kompensationsleitern entstehenden Verluste rufen eine zusätzliche Erwärmung $\Delta\theta$ der wärmsten Kabelader her vor, was zu einer auf die ursprüngliche Strombelastbarkeit bezogenen, verringerten Belastbarkeit führt (Formel 1).

$$r = \sqrt{\frac{\theta_{\max} - \theta_a + \theta_x - \Delta\theta}{\theta_{\max} - \theta_a + \theta_x}} = \sqrt{1 - \frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\max} + \theta_x}}$$

Dabei bedeuten

- θ_{\max} höchstzulässige Kabeltemperatur
- θ_a Umgebungstemperatur
- θ_x Korrekturterm zur Berücksichtigung von partieller Bodenaustrocknung [10–14], wobei $\theta_x = \Delta\theta_{\text{cr}} \cdot (v_x - 1)$ gilt mit $v_x = \lambda_f/\lambda_T$ für $\Delta\theta_s \geq \Delta\theta_{\text{cr}}$ und $v_x = 1$ sonst

$\Delta\theta_{\text{cr}}$ ist die Grenzerwärmung für einsetzende Bodenaustrocknung mit den entsprechenden Wärmeleitfähigkeiten λ_f und λ_T des feuchten bzw. ausgetrockneten Bodens. Überschreitet die Erwärmung $\Delta\theta_s$

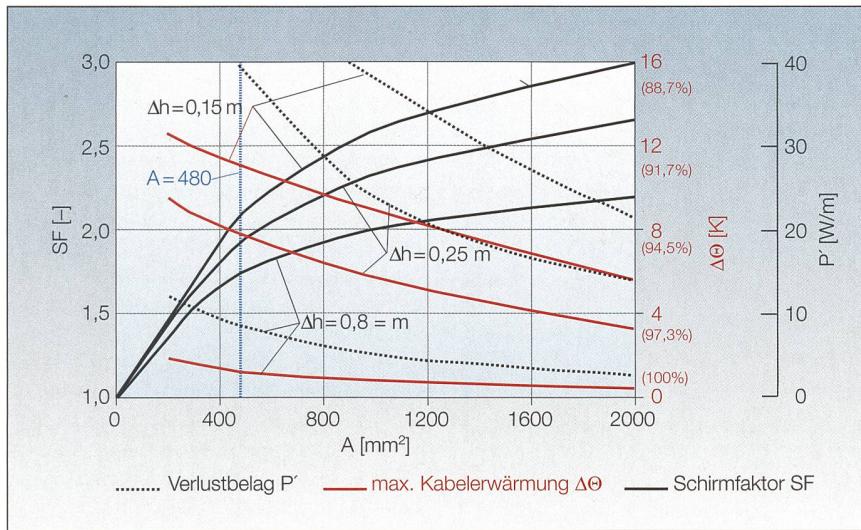


Bild 3 Schirmfaktor SF, Verlustbeläge P' und maximale Kabelerwärmung $\Delta\Theta$ als Funktion des Ge samtleiterquerschnitts A von vier in einer Ebene um Δh oberhalb des Kabelsystems liegenden Kompensationsleitern gleichen Querschnitts (nur Positions-Optimierung). An der $\Delta\Theta$ -Achse sind in Klammern die relativen Belastbarkeiten angegeben.

der Kabeloberfläche die Grenzerwärmung $\Delta\Theta_{cr}$ nicht, so wird $v_x = 1$ gesetzt, woraus $\Theta_x = 0$ folgt.

In den nachfolgenden Beispielen wird eine thermische Stabilisierung des Kabel grabens angenommen und somit in Formel 1 immer $\Theta_x = 0$ gesetzt.

Optimierungsbeispiele

Betrachtet wird im Folgenden die in [7] näher untersuchte Muffenanordnung eines 380-kV-Einleiter-VPE-Kabelsystems mit einem höchsten Leiterstrom von 1500 A. Die Legetiefe der in einer Ebene angeordneten Kabelladern ist 1,9 m, ihr Achsabstand beträgt 0,7 m. Der Muffenbereich sei thermisch stabilisiert ($1,0 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m})$). Ohne Kompensationsmaßnahmen beträgt die höchste magnetische Induktion an der Erdoberfläche $B_0 = 88,7 \text{ } \mu\text{T}$.

Im Folgenden werden unterschiedlich viele Kompensationsleiter in einer oder in zwei Ebenen positioniert, wobei Anzahl und Leiterquerschnitt der Kompensationsleiter sowie die Legeebenen vorgegeben werden. Die Lage der Kompensationsleiter wird mit Hilfe eines genetischen Algorithmus, wie er beispielsweise in [10] beschrieben ist, optimiert. Zielfunktion dieses Suchalgorithmus ist die Minimierung der grössten auftretenden magnetischen Induktion. Anschliessend wird in einem zweiten Optimierungsprozess bei Beibehaltung der Leiterpositionen und des Gesamt-Leiterquerschnitts die Minimierung der thermischen Beeinflussung des zu schirmenden Kabelsystems als zusätzliche Zielfunktion berücksichtigt, um den Gesamt-Leiterquerschnitt optimal aufzuteilen.

In den nachfolgenden Beispielen wird für die Optimierung normalerweise eine symmetrische Anordnung rechts und links der Systemmitte vorausgesetzt: Die Untersuchungen zeigen, dass sich bei der gegebenen symmetrischen Anordnung der Kabel für die optimierten unsymmetrischen Anordnungen nur geringfügige Positionsunterschiede der Kompensationsleiter und auch nur geringfügige Verminderungen der magnetischen Induktion ergeben.

Als erstes Beispiel zeigt Bild 1 die Abhängigkeiten des Schirmfaktors SF und der maximalen Kabelerwärmung $\Delta\Theta$ als Funktion der x-Koordinate des rechten von zwei Kompensationsleitern mit dem Abstand Δh der Legeebene oberhalb der Kabel. Deutlich wird, dass

- für alle optimierten x-Koordinaten (d.h. Maximum des Schirmfaktors) der rechte Kompensationsleiter immer rechts von der rechten Kabelader liegt und dass dieser optimale Punkt mit grösser werdendem vertikalen Abstand der Kompensationsleiterebene zunehmend nach rechts wandert;
- bei einer erheblichen Vergrösserung des vertikalen Abstands der Kompensationsleiter von $\Delta h = 0,15 \text{ m}$ auf $\Delta h = 0,8 \text{ m}$ sich der Schirmfaktor nur von rund 1,8 auf 1,6 verringert. Verbunden hiermit ist eine Verringerung der Kabelerwärmung von rund 10 auf rund 0,5 K, was eine Erhöhung der relativen Belastbarkeit von 93,1 auf 99,7% ermöglicht.

Die Abhängigkeit des erzielbaren Schirmfaktors SF, des Verlustbelags P' des Kompensationsleitersystems (gestrichelt) sowie der maximalen Kabelerwärmung $\Delta\Theta$ von der Höhe Δh oberhalb des Kabelsystems zeigt Bild 2 am Beispiel der Positionsoptimierung von vier in einer Ebene liegenden Kompensationsleitern gleichen Querschnitts ($4 \times 240 \text{ mm}^2$). Deutlich wird, dass das Maximum des Schirmfaktors von etwa 2,55 für eine Legeebene dicht bei den Ka-

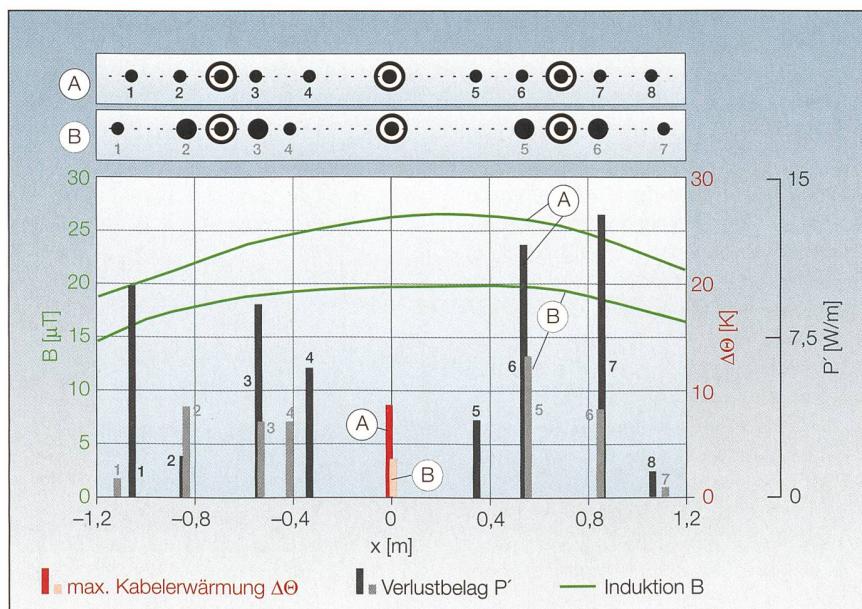


Bild 4 Horizontale Verteilung der Induktion B an der Erdoberfläche, des Verlustbelags P' der Kompensationsleiter 1 bis 8 sowie der resultierenden höchsten Kabelerwärmung $\Delta\Theta$.

Beispiel A: $A = 8 \times 240 \text{ mm}^2 = 1920 \text{ mm}^2$, SF = 3,3.

Beispiel B: $A = 3990 \text{ mm}^2$, SF = 4,4.

Querschnittsaufteilung für Leiter 4 und 7: 400 mm^2 , für Leiter 1: 500 mm^2 , für Leiter 2, 3 und 5: 630 mm^2 und für Leiter 6: 1000 mm^2 .

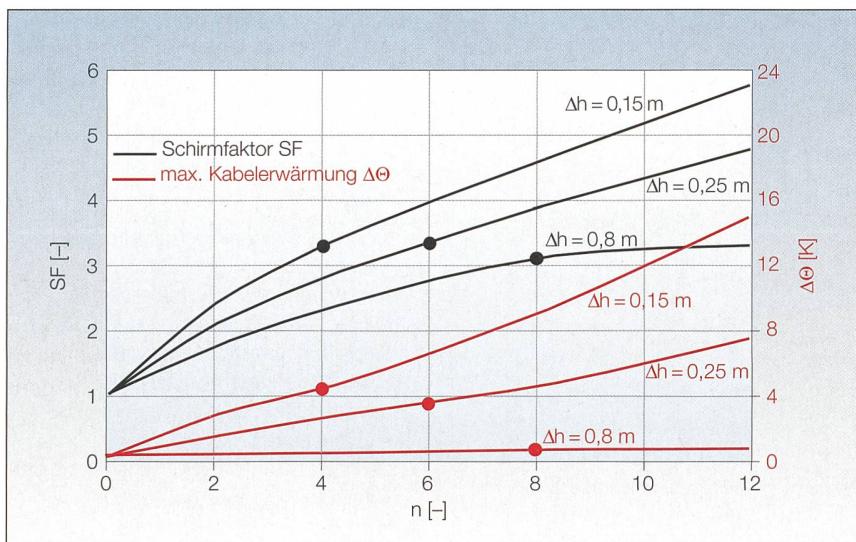


Bild 5 Schirmfaktor SF als Funktion der Anzahl n an Kompensationsleitern mit einem Kupferleiterquerschnitt von jeweils 240 mm^2 in einer Ebene in der Höhe Δh oberhalb der Kabelebene.
Parameter: Höhe Δh .

beln ($\Delta h \approx 0,15 \text{ m}$) auftritt, für grössere Abstände der Legeebene abnimmt und für Abstände von $\Delta h \geq 0,4 \text{ m}$ zwischen 2,0 und 2,1 etwa konstant bleibt. Andererseits lassen sich in diesem Abstandsbereich Verluste und zusätzliche Kabelerwärmung auf ein vernachlässigbares Mass senken.

Bild 3 verdeutlicht – wiederum wie in Bild 2 am Beispiel von vier querschnittsgleichen Kompensationsleitern in einer Ebene um Δh oberhalb des Kabelsystems – einige weitere grundsätzliche Zusammenhänge. Dargestellt sind der Schirmfaktor SF, die Gesamtverlustbeläge P' der Kompensationsleiter (gestrichelt) und die maximale Kabelerwärmung $\Delta\Theta$ als Funktion des Gesamtleiterquerschnitts A ($A = 2000 \text{ mm}^2$ bedeutet dabei vier Kompensationsleiter mit $4 \times 500 \text{ mm}^2$).

Zunächst kann Bild 3 entnommen werden, dass die Schirmfaktoren mit grösserer Nähe zum Kabelsystem anwachsen, gleichzeitig aber auch (und besonders für kleinere Leiterquerschnitte) die Verluste der Kompensationsleiter und die Zusatzerwärmung des Kabels stark zunehmen.

Die Nähe zum Kabelsystem wirkt sich auf die Schirmfaktoren umso stärker aus, je grösser der Gesamtleiterquerschnitt ist. So ändert sich im Abstandsbereich $\Delta h = 0,15$ bis $0,8 \text{ m}$ für $A = 480 \text{ mm}^2$ ($4 \times 120 \text{ mm}^2$) der Schirmfaktor nur zwischen 1,7 und 2,1, für $A = 2000 \text{ mm}^2$ ($4 \times 500 \text{ mm}^2$) hingegen von 2,2 bis 3,0.

Der Schirmfaktor kann durch den Gesamtleiterquerschnitt A durchaus spürbar beeinflusst werden: So steigt er in Bild 3 bei $\Delta h = 0,25 \text{ m}$ von $SF = 1,9$ mit $A = 480 \text{ mm}^2$ ($4 \times 120 \text{ mm}^2$) auf $SF = 2,6$ für $A = 2000 \text{ mm}^2$ ($4 \times 500 \text{ mm}^2$). Entscheidenden Einfluss nimmt der Gesamtleiterquerschnitt

A auf die Kompensationsleiterverluste und die hieraus resultierende Kabelerwärmung. So können in Bild 3 für das Beispiel $\Delta h = 0,25 \text{ m}$ mit Steigerung des Gesamtleiterquerschnitts von $A = 480 \text{ mm}^2$ auf $A = 2000 \text{ mm}^2$ die Verluste von rund 40 W/m auf 14 W/m und die Kabelerwärmung zugleich von 8 auf 3,5 K gesenkt werden. Die relative Kabelbelastbarkeit steigt hierbei von etwa 95 auf etwa 97%.

Für acht Kompensationsleiter, die in der Kabelebene positioniert sind (Mindestabstand zu den Kabeladern $\pm 150 \text{ mm}$), zeigt Bild 4 für zwei optimierte Anordnungen

die horizontalen Verteilungen der magnetischen Induktion B an der Erdoberfläche, den Verlustbelag P' der Kompensationsleiter 1 bis 8 sowie die resultierende höchste Kabelerwärmung $\Delta\Theta$.

Im Beispiel A werden acht querschnittsgleiche Kompensationsleiter mit $A = 8 \times 240 \text{ mm}^2 = 1920 \text{ mm}^2$ eingesetzt, die einen Schirmfaktor von $SF = 3,3$ ermöglichen. Die Verluste sind hier mit $57,1 \text{ W/m}$ extrem hoch und verringern die Kabelbelastbarkeit auf 88,3%.

Im Beispiel B von Bild 4 wird die Anordnung beibehalten, aber eine zusätzliche Optimierung der Querschnittsverteilung vorgenommen. Für einen Gesamtleiterquerschnitt von $A = 3990 \text{ mm}^2$ ergibt sich ein auf 4,4 vergrösserter Schirmfaktor, während sich die Verluste spürbar auf $24,7 \text{ W/m}$ verringern und die relative Kabelbelastbarkeit auf 95,2% ansteigt. Dieses Beispiel erscheint besonders interessant durch die beiden folgenden Aspekte:

- Es ergibt sich eine ungerade Anzahl von Kompensationsleitern. Dies bedeutet, dass nicht in jedem Fall mit Leiterschleifen, also Hin- und Rückleitern, argumentiert werden muss.
- Eine Optimierung der Anordnung hinsichtlich der günstigsten Aufteilung des Gesamtleiterquerschnitts kann zu spürbar verbesserten Lösungen führen.

Zwar erscheint die feine Querschnittsstufung des Beispiels B in Bild 4 ein wenig «sophisticated»; dennoch wird im Vergleich zu Beispiel A deutlich, dass nicht nur eine Vergrösserung des Gesamtleiterquer-

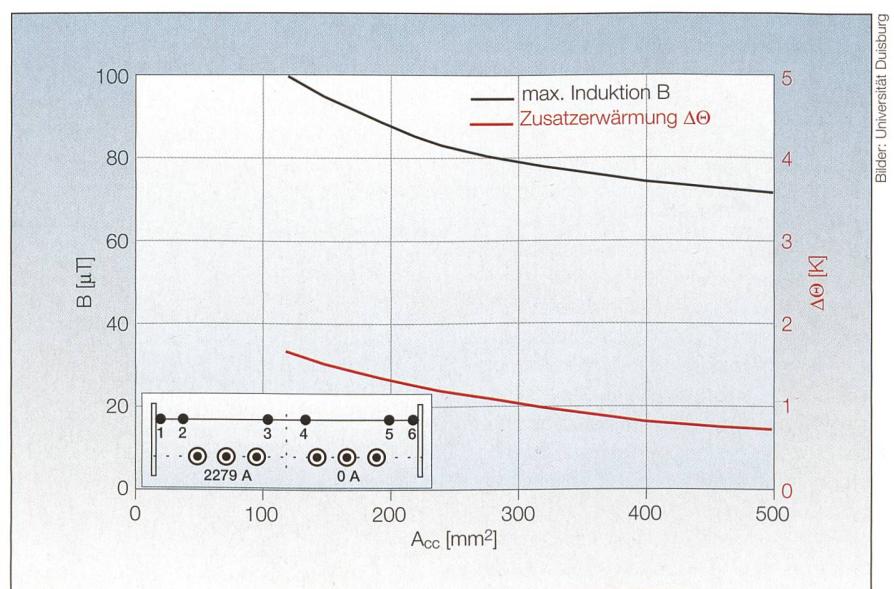
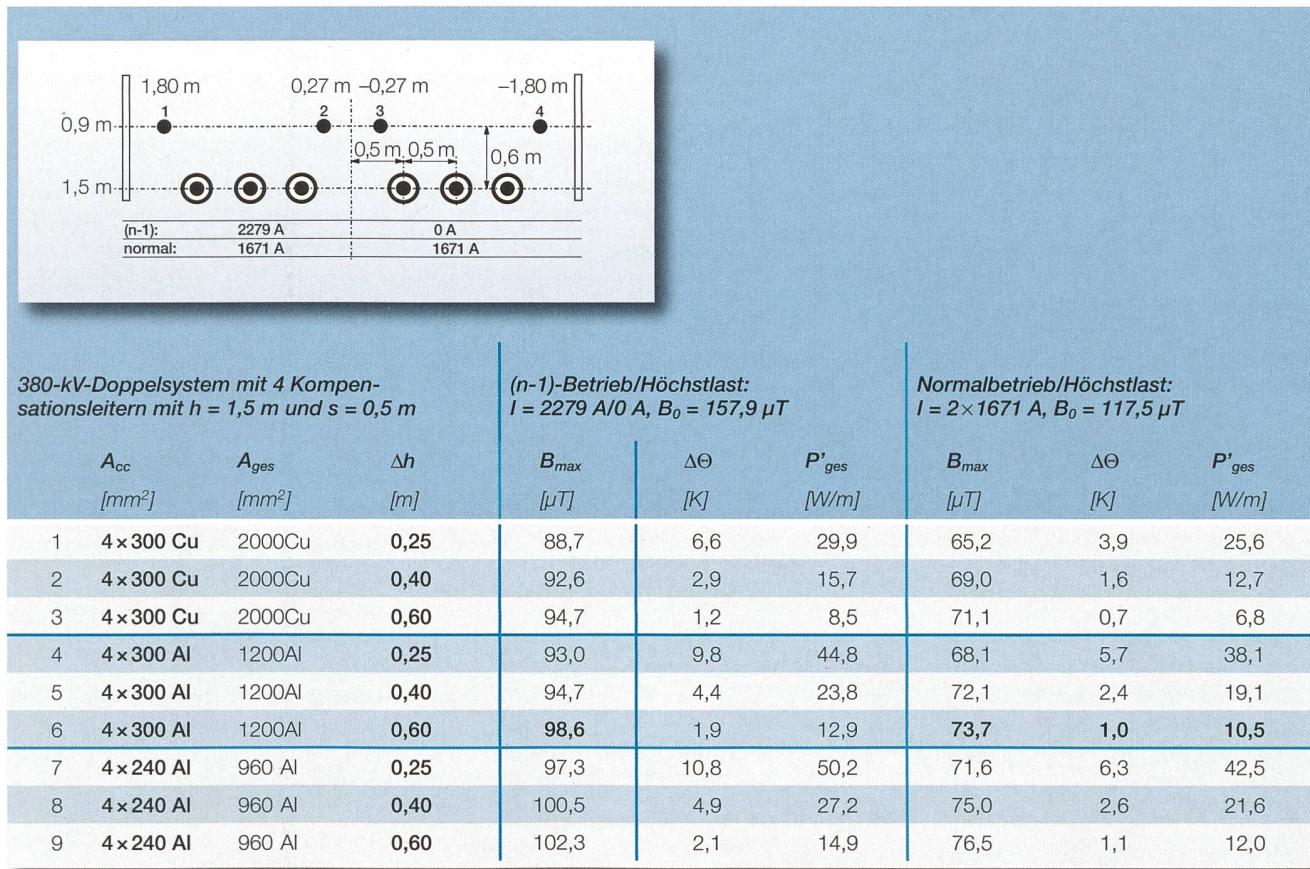


Bild 6 Maximale magnetische Induktion B an der Erdoberfläche und Zusatzerwärmung $\Delta\Theta$ der mittleren Kabelader des rechten Systems als Funktion des einzelnen Kompensationsleiterquerschnitts A_{cc} für sechs Kompensationsleiterkabel mit Aluminiumleitern.
 $\Delta h = 0,8 \text{ m}$, (n-1)-Fall: 2279 A/0 A.



380-kV-Doppelsystem mit 4 Kompensationsleitern mit $h = 1,5 \text{ m}$ und $s = 0,5 \text{ m}$

(n-1)-Betrieb/Höchstlast:
 $I = 2279 \text{ A}$ / 0 A , $B_0 = 157,9 \mu\text{T}$

Normalbetrieb/Höchstlast:
 $I = 2 \times 1671 \text{ A}$, $B_0 = 117,5 \mu\text{T}$

| | A_{cc} [mm 2] | A_{ges} [mm 2] | Δh [m] | B_{max} [μT] | $\Delta\Theta$ [K] | P'_{ges} [W/m] | B_{max} [μT] | $\Delta\Theta$ [K] | P'_{ges} [W/m] |
|---|------------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------|
| 1 | 4 × 300 Cu | 2000Cu | 0,25 | 88,7 | 6,6 | 29,9 | 65,2 | 3,9 | 25,6 |
| 2 | 4 × 300 Cu | 2000Cu | 0,40 | 92,6 | 2,9 | 15,7 | 69,0 | 1,6 | 12,7 |
| 3 | 4 × 300 Cu | 2000Cu | 0,60 | 94,7 | 1,2 | 8,5 | 71,1 | 0,7 | 6,8 |
| 4 | 4 × 300 Al | 1200Al | 0,25 | 93,0 | 9,8 | 44,8 | 68,1 | 5,7 | 38,1 |
| 5 | 4 × 300 Al | 1200Al | 0,40 | 94,7 | 4,4 | 23,8 | 72,1 | 2,4 | 19,1 |
| 6 | 4 × 300 Al | 1200Al | 0,60 | 98,6 | 1,9 | 12,9 | 73,7 | 1,0 | 10,5 |
| 7 | 4 × 240 Al | 960 Al | 0,25 | 97,3 | 10,8 | 50,2 | 71,6 | 6,3 | 42,5 |
| 8 | 4 × 240 Al | 960 Al | 0,40 | 100,5 | 4,9 | 27,2 | 75,0 | 2,6 | 21,6 |
| 9 | 4 × 240 Al | 960 Al | 0,60 | 102,3 | 2,1 | 14,9 | 76,5 | 1,1 | 12,0 |

Tabelle 380-kV-VPE-Kabel-Doppelsystem mit vier Kompensationsleitern. Normalbetrieb mit maximalen Lastströmen von jeweils 1671 A (2200 MVA). Höchstwert der magnetischen Induktion an der Erdoberfläche, Kabelerwärmung und Kompensationsleiter-Gesamtverlustbelag im (n-1)-Fall (2279 A; 1500 MVA) und für Höchstlast im Normalbetrieb mit Lastströmen von jeweils 1671 A.

schnitts, sondern gegebenenfalls auch die Aufteilung dieses Querschnitts zur Erzielung eines optimalen Ergebnisses und zur Aufwandsminimierung bedeutsam sein kann.

Zusammenfassend zeigt Bild 5 die Schirmfaktoren SF und die höchste Kabelerwärmung $\Delta\Theta$ für eine Anzahl n von Kompensationsleitern mit einem Kupferleiterquerschnitt von jeweils 240 mm 2 in einer Ebene in der Höhe Δh oberhalb der Kabelebene. Die Abbildung macht deutlich, dass mit steigender Anzahl der Kompensationsleiter – und hiermit auch des Gesamtleiterquerschnitts A – der Schirmfaktor vergrößert werden kann, – für zwölf Leiter bis zu etwa 5,8 [7]. Mit zunehmendem Abstand der Kompensationsleiterebene von der Kabelebene nimmt der Einfluss der Anzahl n ab und zeigt beispielsweise für $\Delta h = 0,8 \text{ m}$ ab etwa n = 7 Sättigungsverhalten.

Magnetische Schirmung eines 380-kV-Doppelsystems

Als konkretes Beispiel zur magnetischen Schirmung eines 380-kV-Doppelsystems wird in Anlehnung an die Studie [2] als Aufgabenstellung die gesicherte Übertragung von 1500 MVA mit zwei 380-kV-VPE-Ka-

belsystemen gewählt. In einer späteren Betriebssituation soll das Doppelsystem in der Lage sein, 2200 MVA als Höchstlast zu führen, wobei die Differenzleistung zu den durch die Kabelanlage gesicherten 1500 MVA durch zeitabhängige Belastbarkeitsreserven, durch parallele Leitungen und gegebenenfalls durch Re-Dispatching im Netz gesichert ist. Der Belastungsgrad der Strecke betrage $m = 0,7$. Die Geometrie der Trasse ist im oberen Teil der Tabelle (oben) wiedergegeben. Es wird von einem partiell austrocknenden Kabelgraben mit einer Umgebungstemperatur von 15 °C, einer Wärmeleitfähigkeit des feuchten Bodens von 1,0 W/(K·m), des ausgetrockneten Bodens von 0,4 W/(K·m) sowie von einem thermisch stabilisierten Bereich ausgingen. Die Kabelschirme sind zyklisch ausgekreuzt.

Unter diesen Vorgaben werden 380-kV-VPE-Kabel mit einem Kupferleiterquerschnitt von jeweils 2500 mm 2 in einer Einebenenanordnung gemäss Tabelle erforderlich. Das Doppelsystem bewirkt im Normalbetrieb während der Höchstlastphasen mit den Lastströmen von $2 \times 1671 \text{ A}$ direkt an der Erdoberfläche eine maximale magnetische Induktion von 117,5 μT , die sich in

einer Höhe von 1 m über der Erdoberfläche auf 58,2 μT verringert hat. Im nur kurzzeitig und sehr selten gegebenen Störungsfall, während der das verbleibende System einen Strom von 2279 A führen soll, vergrößert sich die magnetische Induktion direkt an der Erdoberfläche auf 157,9 μT , während sie in 1 m Höhe über der Erdoberfläche 60,7 μT beträgt.

Im Folgenden wird versucht, mithilfe von Kompensationsleitern das Magnetfeld so weit zu verringern, dass es in keiner statioären Betriebssituation den gesetzlichen Grenzwert von 100 μT überschreitet. Die Tabelle zeigt hierzu die optimale Anordnung von vier Kompensationsleitern, die sich in einer Höhe von $\Delta h = 0,6 \text{ m}$ über den Kabelsystemen befinden. Da im (n-1)-Fall entweder das rechte oder das linke Kabelsystem ausfallen kann, müssen die Kompensationsleiter symmetrisch zur Trassemitte angeordnet sein.

In der Tabelle sind für Kupfer- und Aluminiumleiter unterschiedliche Querschnitte und für unterschiedliche Legeebenen der vier Kompensationsleiter die maximale Induktion an der Erdoberfläche, die Erwärmung der mittleren Kabelader sowie der Gesamtverlustbelag des Kompen-

Magnetfelder

tionsleitersystems bei Vollast zusammengestellt. Hiernach ergeben sich günstige Lösungen auch für Kompensationskabel mit Aluminiumleitern. Grundsätzlich zeigen die Beispiele, dass zur Minimierung der Verluste im Normalbetrieb und der zusätzlichen Kabelerwärmung ein nicht zu geringer Abstand der Kompensationsleiterebene von der Kabelebene gewählt werden sollte.

Wird verlangt, dass der Verlustbelag des Kompensationsleitersystems nicht wesentlich grösser als 10 W/m und die zusätzliche Kabelerwärmung nicht wesentlich grösser als 1 K sein soll (was einer Belastbarkeitsminderung von weniger als 0,7% entspricht), so bietet sich Variante 6 als wenig aufwendige Lösung an: Hiernach sind vier 1-kV-VPE-Kabel mit einem Aluminiumleiterquerschnitt von jeweils 300 mm^2 (Gesamtleiterquerschnitt 1200 mm^2) 0,6 m oberhalb der Kabelsysteme zu verlegen, um folgende Grössen zu gewährleisten:

- maximale Induktion (Erdoberfläche) bei Höchstlast im Normalbetrieb: $73,7 \mu\text{T}$, bzw. im Störungsfall: $98,6 \mu\text{T}$,
- zusätzliche Kabelerwärmung im Normalbetrieb: 1,0 K,
- Verlustbelag des Kompensationsleitersystems bei Höchstlast: 10,5 W/m.

Für sechs Kompensationskabel mit Aluminiumleitern zeigt Bild 6 zusammenfassend die maximale magnetische Induktion B an der Erdoberfläche und die Zusatzerwärmung $\Delta\Theta$ der mittleren Kabelader des rechten Systems als Funktion des einzelnen Kompensationsleiterquerschnitts A_{cc} für $\Delta h = 0,8 \text{ m}$, und zwar für den $(n-1)$ -Fall (Störungsfall) bei gleichzeitigem Höchstrom von 2279 A im verbleibenden System.

Referenzen

- [1] H. Brakelmann: Kostenvergleich alternativer Ausführungen windbedingter Netzverstärkungsmassnahmen im Hochspannungsnetz

- in Schleswig-Holstein. Studie im Auftrag der E.ON Netz GmbH, Oktober 2005.
- [2] B. R. Oswald: Vergleichende Studie zu Stromübertragungstechniken im Höchstspannungsnetz. Forwind-Studie, 2005, www.forwind.de/oswald-studie.
- [3] H. Brakelmann, M. Jensen: Neues sechsphasiges Übertragungssystem für VPE-isolierte HVAC-See- und Landkabel hoher Übertragungsleistung. Ew (2006), H. 4, S. 34–43.
- [4] H. Brakelmann: Bipolare HVAC- und HVDC-Hochleistungs-Übertragungssysteme mit VPE-isolierten See- und Landkabeln. Veröffentlichung in Vorbereitung.
- [5] H. Brakelmann: Magnetfeldreduktion durch Zusatzleiter in Energiekabeltrassen Elektrizitätswirtschaft (1996), S. 274–279.
- [6] H. Brakelmann: Kompensationsleiter im Muffenbereich von Energiekabeln. Bulletin SEV/VSE (25/1998), S. 31–35.
- [7] P. Maioli, E. Zaccone: Passive Loops Technique for Electromagnetic Field Mitigation – Applications and Theoretical Considerations. Jicable-Conf. 2007, Versailles, S. 231–236.
- [8] E. Philippow: Grundlagen der Elektrotechnik. Berlin/Offenbach, Hüthig Verlag, 1989.
- [9] H. Brakelmann: Reduzierung des Magnetfeldes von Einleiter-Drehstromkabeln durch Kompensationsleiter. Studie im Rahmen des BMU-Projekts «Innovative Kabelkonzepte für die Entwicklung der elektrischen Infrastruktur zur systemtechnischen Einbindung grosser Kapazitäten Erneuerbarer Energie», Duisburg, 2007.
- [10] H. Brakelmann: Energietechnik programmiert – Probleme, Lösungen, Programme. VDE-Verlag (1989).
- [11] L. Heinhold, R. Stubbe: Kabel und Leitungen für Starkstrom. Siemens AG, Berlin/München, 1969.

Angaben zum Autor

Prof. Dr.-Ing. habil. **Heinrich Brakelmann** ist Professor im Fachgebiet Energietransport und -speicherung der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Duisburg-Essen. Die Hauptausrichtung seiner Arbeiten ist die Kabeltechnik. Er ist Mitglied im VDE/Cigré und war über viele Jahre Mitglied des DKE-Arbeitskreises AK 411.1.1 sowie der Cigré-WG 21-02 («Current ratings of cables») und der Cigré-WG B1-05 («Transient effecting long cables»). Zurzeit arbeitet er in der Cigré-WG B1.23 («Impact of EMF on Current Ratings and Cable»). Prof. Brakelmann ist Autor von mehr als 140 Fachaufsätzen sowie von drei Buchpublikationen zu Themen der Kabeltechnik sowie der Hochspannungs- und Hochstromtechnik.

heinrich.brakelmann@uni-due.de, Universität Duisburg-Essen, D-47048 Duisburg

¹⁾ WHO: World Health Organization (Weltgesundheitsorganisation); Sonderorganisation der Vereinten Nationen.

²⁾ Dieser Wert ist auch in der Bundesrepublik Deutschland gesetzlich vorgeschrieben.

³⁾ Dichtes Dreieck: Kabel, bei dem die drei Adern gebündelt sind.

⁴⁾ Cigré: Conseil international des grandes réseaux électriques.

Résumé

Réduction du champ magnétique des câbles triphasés monopolaires

Systèmes de compensation de câbles 1 kV en disposition optimisée. Lors de la procédure de planification et d'autorisation des systèmes de transport d'énergie électrique, l'aspect des champs magnétiques engendrés et de leurs effets joue un rôle de plus en plus important. Des valeurs limites basses ainsi que l'exigence de compatibilité avec d'autres systèmes techniques nécessitent une conception particulière des installations de câbles à haute et très haute tension. L'article montre comment des conducteurs de compensation permettent de réduire le champ magnétique de câbles monopolaires triphasés. Pour le calcul, on peut avoir recours aussi bien à la méthode des lignes d'induction qu'à celle beaucoup plus complexe des éléments finis.



Kleinstollen | Schächte | Kavernen

Nutzen Sie die Erfahrung von Gasser Felstechnik bereits bei der Projektierung.

Wir bieten Gesamtlösungen – von der Planung bis zur Ausführung.



Gasser Felstechnik AG | T +41 41 679 77 77 | www.felstechnik.ch

Unterlag | Felssicherung | Sprengbetriebe | Baubetriebe | Spezialbohrungen

Zu den schönsten Aspekten unserer Tätigkeit gehört das Wissen, an beständigen Werten zu arbeiten.

An Energie, anstelle von Strohfeuern an Leistung, anstelle von Hektik an Rendite, anstelle von Raubbau.

Unsere Partner im Energie-Markt pflegen dies seit vielen Jahrzehnten. Unser Bestreben ist es, sie für weitere zu unterstützen.

Beständigkeit hat Zukunft.



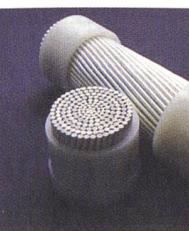
Energiesysteme und
Anlagentechnik AG
www.esatec.ch



Elektroarmaturen AG
Ihr ISO 9001:2000-zertifizierter Partner

Ebnatstrasse 152, CH - 8201 Schaffhausen

- **Armaturen für Abspannungen und Aufhängungen von Leiter- und Erdseilen**

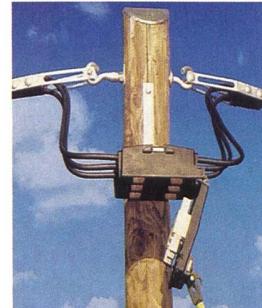


- **Spezielle Armaturen für Lichtwellenleiter**
- **Klemmen und Armaturen für Schaltanlagen bis 550kV**



- **Technische Berechnungen** für Seilbedämpfungen und **Seilschwingversuche**

- **Material für isolierte Freileitungen (ISO-Material)**



- **Isolatoren und Sicherungen**



Tel. / Fax: 052 634 00 84 / 85 info@ea-sh.ch

Was läuft bei Ihnen ohne Power?



Zuverlässige Energienetzwerke und Bordstromversorgung von ABB halten Ihr Verkehrsnetz sicher auf Trab. Mehr über ABB und unsere weltweit führenden Energie- und Automatisierungs-Technologien erfahren Sie unter www.abb.ch

Power and productivity
for a better world™

© 2008 ABB

ABB