

ABSCHIRMUNG VON MAGNETISCHEN FELDERN MITHILFE VON ROHREN AUS DUKTILEM GUSSEISEN

von Prof. Dr. Ralf Peter Brinkmann



PAM
SAINT-GOBAIN

Abschirmung von magnetischen Feldern mithilfe von Rohren aus duktilem Gusseisen

Ralf Peter Brinkmann

Die Verteilung elektrischer Energie erfolgt in Europa mithilfe einer komplexen Infrastruktur. Kraftwerke und Verbraucher sind durch ein Netzwerk aus elektrischen Stromleitungen (Freileitungen und Erdkabel) sowie Schalt- und Umspannwerken miteinander verbunden. Die in der Umgebung von Erdkabeln auftretenden magnetischen Felder werden von Teilen der Öffentlichkeit als gesundheitsgefährdend angesehen. In diesem Fachbericht wird gezeigt, dass durch die Verlegung der Kabel in Rohren aus duktilem Gusseisen Abhilfe möglich ist. Der mit dem Verfahren verbundene Verlust an elektrischer Energie ist vernachlässigbar.

Problemstellung

Die Verteilung elektrischer Energie erfolgt in Europa mittels einer komplexen Infrastruktur. Kraftwerke und Verbraucher sind durch ein Netzwerk aus elektrischen Stromleitungen sowie Schalt- und Umspannwerken verbunden [1]. Überwiegend wird Dreiphasen-Wechselstrom (Drehstrom) der Frequenz 50 Hz verwendet, und zwar auf verschiedenen Spannungsebenen: Das Höchstspannungsnetz (220 kV/380 kV) dient dem überregionalen Transport der Energie. Das Hochspannungsnetz (in der Regel 110 kV) und das Mittelspannungsnetz (1 kV bis 50 kV) übernehmen die Grob- bzw. Feinverteilung. Die Anbindung des Endverbrauchers leistet schließlich das Niederspannungsnetz (400 V bzw. einphasig 230 V) (**Bild 1**).

Stromleitungen können wahlweise überirdisch (Überland- oder Freileitung) oder unterirdisch (Erdkabel) ausgeführt werden. Dabei sind wirtschaftliche Überlegungen ausschlaggebend [2]: In gering besiedelten Regionen werden meist die kostengünstigeren Freileitungen verwendet; in Ballungsräumen tendiert man zu den kompakteren Erdkabeln. Häufig andere Präferenzen hat dagegen die Bevölkerung, zumindest deren organisierter Teil. Eine Vielzahl von Initiativen engagiert sich gegen den Neubau von „Stromautobahnen“ im Rahmen der sogenannten Energiewende und fordert den Abbruch der Projekte oder zumindest die „Verlegung unter die Erde“ [3-5].

Dafür werden neben ästhetischen Aspekten vor allem gesundheitliche Argumente diskutiert. Die Politik hat auf diese Forderungen teilweise schon reagiert [6]. In andere Richtung gehende Argumente der Industrie scheinen dagegen wenig Gehör zu finden [7].

In jüngster Zeit sind aber auch kritische Stimmen zur Erdverlegung laut geworden [8-11]. Diese beziehen sich auf alle Spannungsebenen, wobei die Hoch- und Höchstspannungsanlagen als überregionale Einrichtungen naturgemäß die weitaus größere Aufmerksamkeit erhalten. Auf diese wachsende Besorgnis der Bevölkerung haben das Bundesamt für Strahlenschutz und andere Institute bereits reagiert

[12, 13]. Es wird im Wesentlichen darauf verwiesen, dass ein schädigender Einfluss schwacher magnetischer Felder bislang nicht nachgewiesen sei. Die Überzeugungskraft dieser Stellungnahmen ist schwer zu beurteilen.

Dieser Fachbericht wird einem anderen Gedanken nachgehen: Können die bei der Übertragung elektrischer Energie auftretenden magnetischen Felder nicht einfach abgeschirmt werden, und zwar konkret mithilfe von Rohren aus duktilem Gusseisen?

Die im Folgenden angestellten Überlegungen lassen sich grundsätzlich auf alle Spannungsebenen des Stromnetzes anwenden; ausgenommen ist lediglich die Gleichstrom-Übertragung. Von besonderer Bedeutung sind sie jedoch für die Feinverteilung (Mittelspannungsebene): Zum einen sind hier häufig sensitive (d. h. von Menschen frequentierte) Bereiche betroffen, z. B. bei Verlegung der Kabel unter Gehwegen oder Straßen. Zum zweiten werden für diese Ebene sehr oft mehradrige Kabel verwendet, die bereits alle drei Drehstromphasen enthalten und die sich leicht in einem Gusseisenrohr verlegen lassen.

Grenzwerte für magnetische Felder

Die elektromagnetische Wechselwirkung ist die am besten bekannte Grundkraft der Natur. Sie umfasst zwei eng verwandte aber unterschiedliche Felder, nämlich das elektrische Feld, quantitativ angegeben durch die elektrische Feldstärke E mit Einheit V/m (Volt pro Meter), und das magnetische Feld, gemessen als magnetische Flussdichte B mit Einheit T (Tesla). Die technische Nutzung des Elektromagnetismus ist unverzichtbar für unsere Zivilisation. Es ist natürlich ein Faktum, dass elektromagnetische Phänomene körperliche Schädigungen und andere Gesundheitsgefahren hervorrufen können: Stromunfälle (elektrische Schläge), Röntgenschäden, Verstrahlungen. Alle diese Risiken hängen von dem Charakter, der Stärke, und der Wirkungsdauer der elektromagnetischen Einwirkung ab, weswegen der Gesetzgeber angepasste Grenzwerte für die maximal zulässige Exposition der Bevölkerung festgelegt hat.

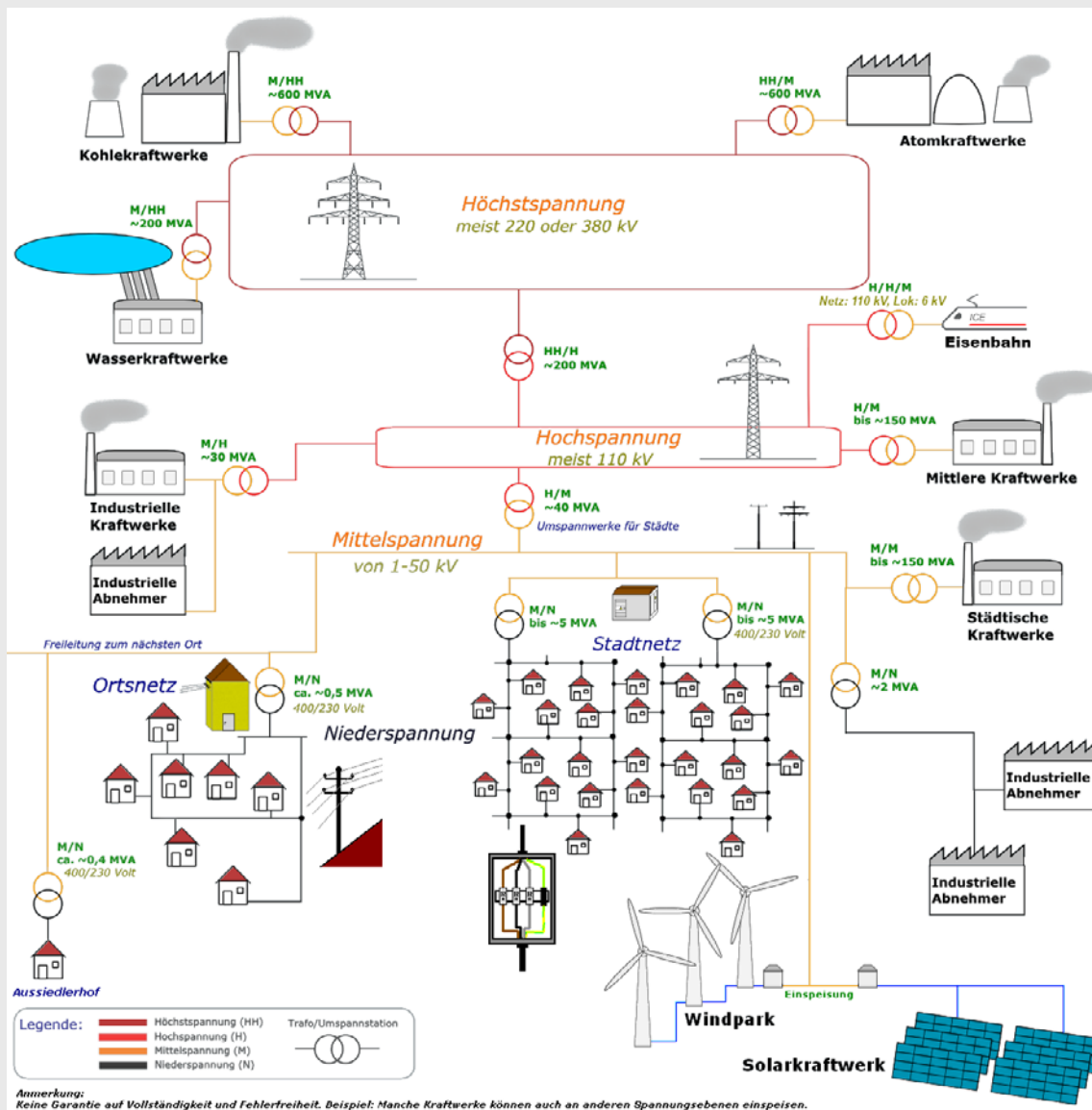


Bild 1: Schematische Darstellung des Stromnetzes in Deutschland [1]

Für den in diesem Fachbericht interessierenden Fall der Einwirkung von Magnetfeldern bei einer Frequenz von 50 Hz legt die „26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)“ den Grenzwert für die magnetische Flussdichte B auf einen Effektivwert von $100 \mu\text{T}$ [14]. (Als Vergleich: Das natürliche Erdmagnetfeld hat in Mitteleuropa eine Flussdichte von $50 \mu\text{T}$, eine handelsüblicher Hufeisenmagnet kommt auf etwa 100 mT . In medizinischen Kernspinnresonanztomographen werden bis zu 3 T erreicht, in Forschungsanlagen sogar bis zu 15 T .) Betreiber von Niederfrequenzanlagen wie eben Erdkabel müssen Vorkehrungen dafür treffen, dass der gesetzlich festgelegte Grenzwert in allen Bereichen, die nicht nur dem vorübergehenden Aufenthalt von Menschen dienen, nicht überschritten werden.

Es muss betont werden, dass der gesetzlich festgelegte Grenzwert nicht unumstritten ist [9]. Vielfach wird erwähnt, dass andere Länder bis zu 100-fach niedrigere Grenzwerte haben. So legt etwa die Schweiz für Orte mit empfindlicher Nutzung (z. B. Schlaf- und Wohnzimmer) weit striktere Begrenzungen fest, für niederfrequente Magnetfelder den Wert von $1 \mu\text{T}$ [15]. Angesichts der Besorgnis in der Bevölkerung mag es sinnvoll sein, sich auch hierzulande an ähnlichen oder sogar geringeren Zahlenwerten zu orientieren.

Modellierung elektromagnetischer Systeme

Die heute akzeptierte mathematische Theorie der elektromagnetischen Phänomene wurde, als Abschluss einer über 2000-jährigen Forschungsgeschichte, 1864 durch Maxwell formuliert. Mathematisch umfasst sie ein System von vier gekoppelten partiellen Differentialgleichungen,

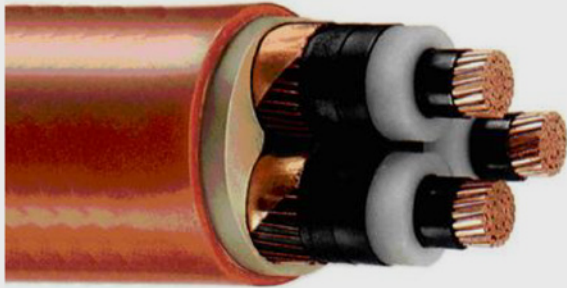


Bild 2: Offenes Ende eines Mittelspannungskabels N2XSEY nach VDE 0276-620 [16]

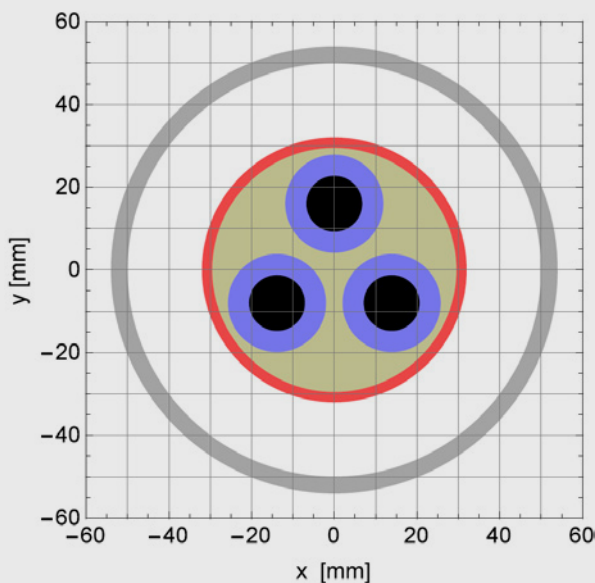


Bild 3: Querschnitt der hier untersuchten Konfiguration mit kartesischem Koordinatensystem: Mittelspannungskabel mit abschirmendem Rohr aus duktilem Gusseisen

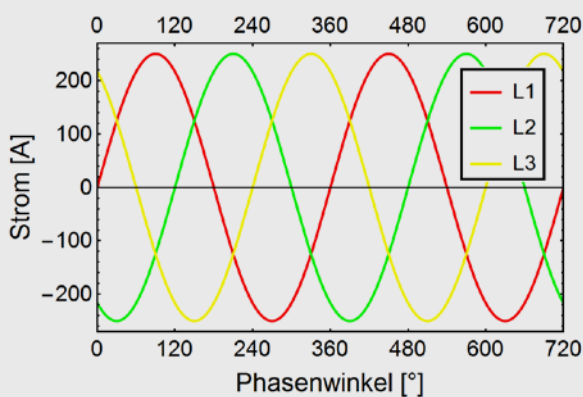


Bild 4: Dreiphasenwechselstrom (Drehstrom) ist eine Form von Mehrphasenwechselstrom, die aus drei einzelnen Wechselströmen oder Wechselspannungen der Netzfrequenz 50 Hz besteht, die zueinander in ihren Phasenwinkeln fest um 120° verschoben sind

die die Wechselwirkung der erwähnten elektrischen und magnetischen Felder untereinander und mit Ladungen und Strömen beschreiben. Ihr physikalischer Inhalt lautet:

- » Elektrische Felder können statisch hervorgerufen werden durch elektrische Ladungen und elektrisch polarisierte Materie, sowie dynamisch durch veränderliche Magnetfelder. Im ersten Fall sind sie Quellfelder, im zweiten Wirbelfelder.
- » Magnetische Felder können statisch hervorgerufen werden durch elektrische Ströme und magnetisierte Materie, sowie dynamisch durch veränderliche elektrische Felder. Magnetische Felder sind immer Wirbelfelder.

Komplettiert wird das System der Maxwell'schen Gleichungen durch weitere Beziehungen, die die Reaktion der Materie auf anliegende elektrische und magnetische Felder beschreiben. Hier gibt es eine kaum zu überblickende Vielfalt; deswegen sollen nur die im folgenden Modell wichtigen Materialtypen erwähnt werden:

- » Gase, wie z. B. Luft, reagieren auf elektrische und magnetische Felder praktisch gar nicht. (Dies gilt zumindest für die angenommenen moderaten Felder. In Falle deutlich höherer elektrischer Feldstärke, genauer bei Erreichen der sogenannten Durchbruchfeldstärke, würde sich allerdings ein Lichtbogen und damit ein Kurzschluss ausbilden.)
- » Isolatoren reagieren auf magnetische Felder ebenfalls wenig. Auf elektrische Felder reagieren sie mit einer elektrischen Polarisation, was hier allerdings keine Rolle spielt. (Bei höheren Feldstärken käme es auch hier zu einem Durchbruch.)
- » Leiter reagieren auf elektrische Felder mit einem Stromfluss. Die lokale Stromdichte j ist in der Regel proportional zur elektrischen Feldstärke E . Der Proportionalitätsfaktor ist eine Materialkonstante, sie wird als elektrische Leitfähigkeit σ bezeichnet.
- » Magnetische Materialien reagieren auf magnetische Felder mit einer Magnetisierung. Im linearen Fall ist deren Wert proportional zur Stärke des anliegenden Magnetfeldes. Anschaulich heißt dies, dass magnetische Materialien das Magnetfeld „leiten“ können, und zwar umso besser, je höher ihre relative Permeabilität μ_r ist.

Diese zwecks Anschaulichkeit sprachlich formulierten Zusammenhänge lassen sich natürlich präziser als mathematische Gleichungen darstellen. Aus ihrer gegenseitigen Kopplung entsteht ein mathematisches Modell, das dann gelöst werden muss. Dazu kann man entweder spezialisierte mathematische Verfahren oder Computersimulationen einsetzen.

Das Magnetfeld eines Drehstromkabels

Nach diesen Vorüberlegungen sei nun im Detail auf das Magnetfeld in der Umgebung einer erdverlegten Drehstromleitung eingegangen. Für ein konkretes Beispiel wird das national und international genormte Mittelspannungskabel N2XSEY nach VDE 0276-620 zugrunde

gelegt, wie es von einer Reihe von Herstellern angeboten wird [16]. **Bild 2** zeigt ein Kabelende; **Bild 3** den leicht idealisierten Querschnitt in einem kartesischen Koordinatensystem. (Aufgrund der annähernden Translationsinvarianz reicht ein „zweidimensionales“ Modell aus: Alle physikalischen Größen hängen nur von x oder y ab, nicht von der dritten Koordinate z . Der Schwierigkeitsgrad der mathematischen Behandlung wird dadurch erheblich reduziert.)

Das Kabel hat einen Außendurchmesser von 108 mm; im Inneren verlaufen in einem Abstand von 28 mm die drei 13,5 mm starken Kupferadern. Sie sind gegeneinander durch 3,4 mm starke Umhüllungen aus vernetztem Polyethylen isoliert, der Kabelmantel besteht aus PVC. Als Verlegetiefe wird ein Wert von 0,6 m (Mindestverlegetiefe nach VDE 0276) angenommen. Das Kabel wird von einem symmetrischen Drehstrom der Amplitude 250 A durchflossen.

Bild 4 zeigt den Zeitverlauf der Stromstärke in den drei Adern: Jeder Einzelstrom ist für sich sinusförmig mit einer Frequenz von 50 Hz; durch den gegenseitigen Versatz von jeweils 120° ist der Summenstrom zu jedem Zeitpunkt null.

Zunächst sei der Fall ohne Abschirmung betrachtet. Der elektrische Strom in den Adern ruft ein magnetisches Feld hervor, das die Gestalt eines ebenen Dipolfeldes hat (**Bild 5**). Die Dichte der Feldlinien ist ein anschauliches Maß für die Stärke des Feldes (Flussdichte). Aufgrund der zeitlichen Modulation der Ströme und ihrer versetzten Phasenlage rotiert das Dipolfeld mit der Frequenz 50 Hz

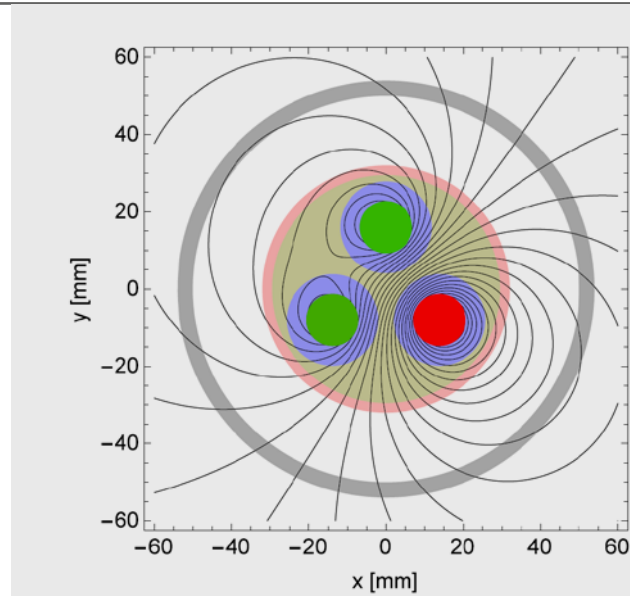


Bild 5: Magnetisches Feld in der näheren Umgebung eines Drehstromkabels für einen willkürlich gewählten Phasenpunkt. Die Einfärbung der Adern deutet die momentane Stromrichtung an. Man erkennt die dipolartige Form des Feldes. Das zwecks Vergleichbarkeit eingezeichnete Rohr ist magnetisch nicht aktiv

um die Achse. Bild 5 zeigt also eine Momentaufnahme des Feldes für einen willkürlich gewählten Phasenpunkt. Die Stärke des Feldes nimmt mit wachsendem Abstand r von der Achse ab, für große Abstände proportional zu r^{-2} . **Bild 6** und **Bild 7** zeigen die gemittelte magnetische Flussdichte in der Umgebung eines unabgeschirmt unter einem

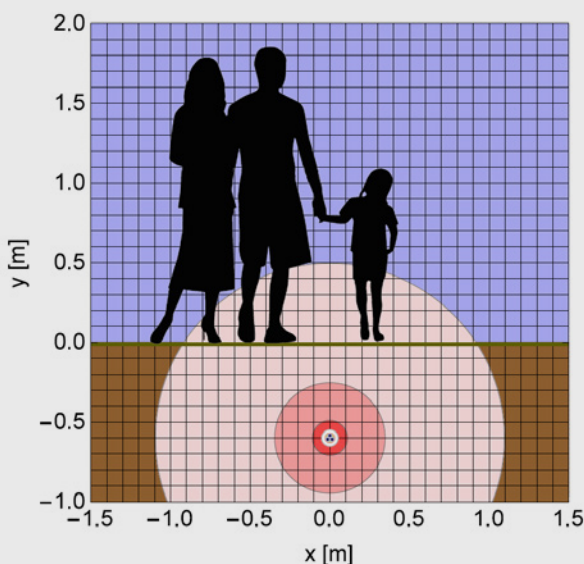


Bild 6: Zeitgemittelte magnetische Flussdichte eines in 0,6 m Tiefe unter einem Gehweg verlegten, nicht abgeschirmten Mittelspannungskabels bei einer Strombelastung von 250 A. Die farbigen Gebiete bezeichnen (von außen nach innen) die Zonen, in denen die Flussdichte die Werte $1 \mu\text{T}$, $10 \mu\text{T}$, und $100 \mu\text{T}$ übersteigt

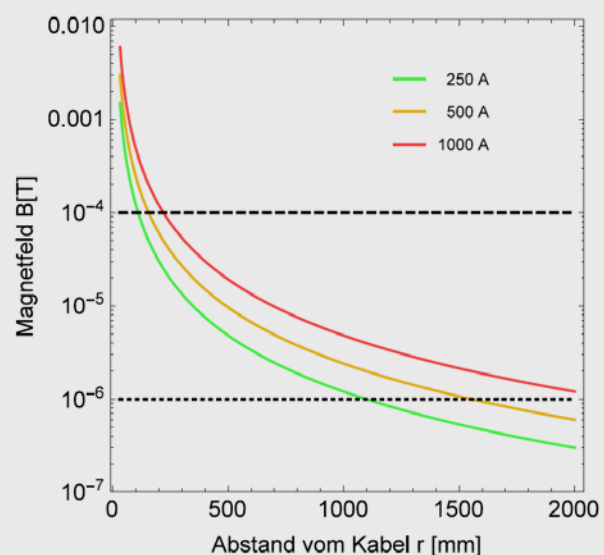


Bild 7: Zeitgemittelte magnetische Flussdichte in der Umgebung eines nicht abgeschirmten Mittelspannungskabels für die Belastungsfälle 250 A, 500 A, und 1000 A. Eingezeichnet sind die im Text erwähnten Grenzwerte $100 \mu\text{T}$ und $1 \mu\text{T}$

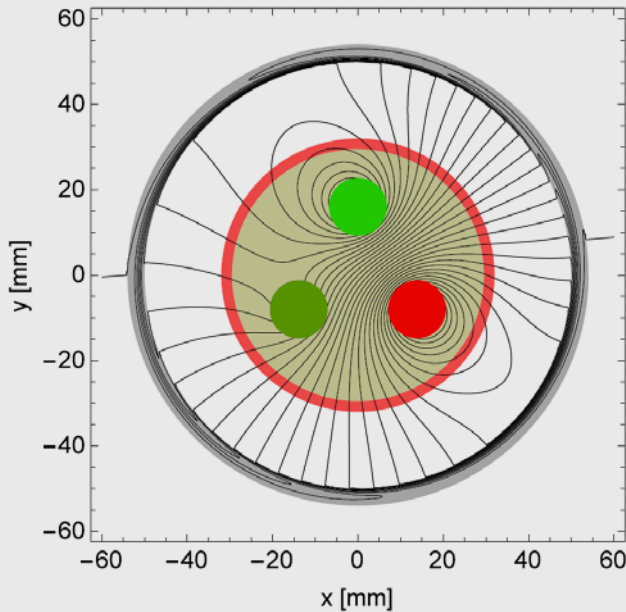


Bild 8: Magnetisches Feld eines durch ein Gusseisenrohr abgeschirmten Drehstromkabels zu einem willkürlich gewählten Phasenpunkt. Im Inneren des Rohrs herrscht eine verhältnismäßig hohe magnetische Flussdichte, außerhalb ist sie sehr viel schwächer. Die Abschirmung ist eine Kombination statischer und dynamischer Effekte

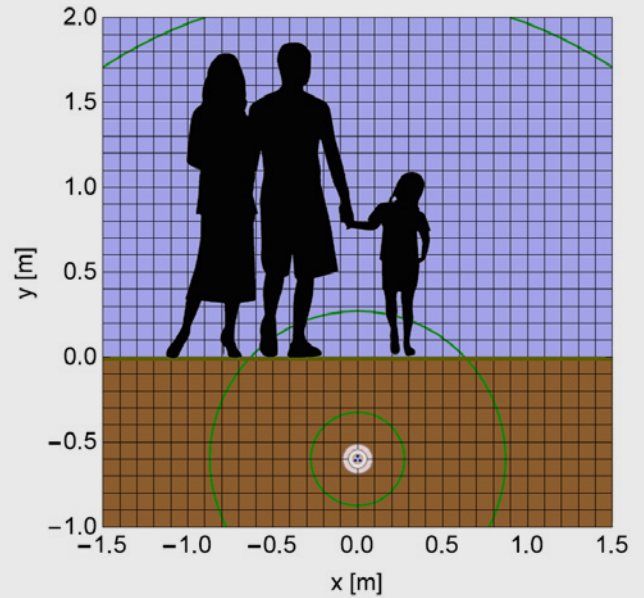


Bild 9: Phasengemittelte magnetische Flussdichte in der Umgebung eines erdverlegten, durch ein Gusseisenrohr abgeschirmten Mittelspannungskabels bei einer Strombelastung von 250 A. Das innere farbige Gebiet bezeichnet die Zone, in denen die Flussdichte den Wert $1 \mu\text{T}$ übersteigt. Die grünen Linien sind (von innen nach außen) die Isolinien zu 100 nT, 10 nT und 1 nT

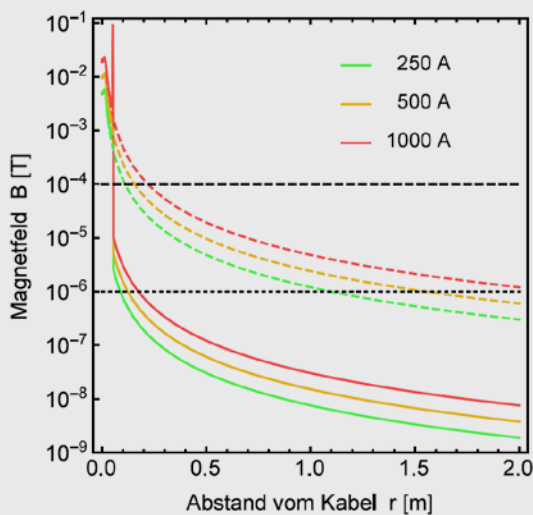


Bild 10: Phasengemittelte magnetische Flussdichte in der Umgebung eines durch ein Gusseisenrohr abgeschirmten Mittelspannungskabels, für die Belastungsfälle 250 A, 500 A und 1000 A (durchgezogene Linien) im Vergleich zum nicht abgeschirmten Fall (durchbrochene Linien)

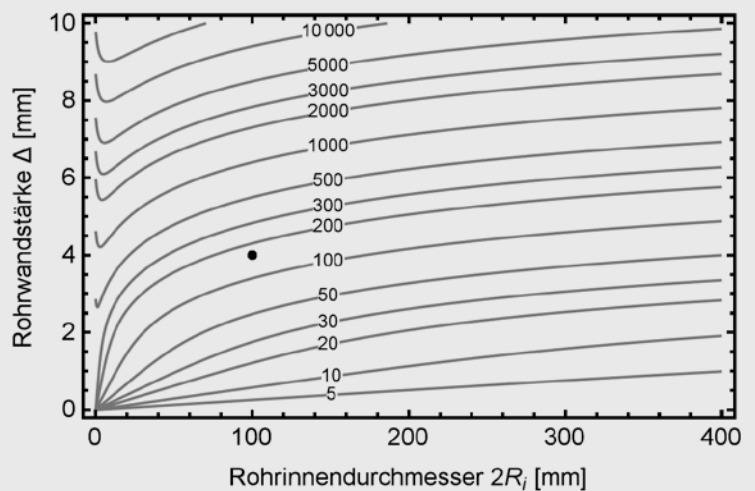


Bild 11: Abschirmfaktor S von Rohren aus duktilem Gusseisen in Abhängigkeit vom Innendurchmesser $2R_i$ und von der Wanddicke Δ . Für die Leitfähigkeit wurde $\sigma = 2 \times 10^6 \text{ S/m}$ angesetzt, für die Permeabilitätszahl $\mu_r = 1600$. Beispiel: Ein Rohr des Innendurchmessers $2R_i = 100 \text{ mm}$ und der Wanddicke $\Delta = 4 \text{ mm}$ hat einen Abschirmfaktor $S \approx 160$

ROHRE aus duktilem GUSSEISEN...

...für eine
strahlungsarme
Umwelt!



Abschirmung
elektromagnetischer Felder.



Gehweg verlegten Kabels. An der Oberfläche ist der deutsche Grenzwert von $100 \mu\text{T}$ sicher eingehalten, nicht jedoch der Schweizer Grenzwert von $1 \mu\text{T}$. Ein auf dem Gehweg spielendes Kind wäre im ungünstigsten Fall einer magnetischen Flussdichte von einigen μT ausgesetzt.

Kann eine Verlegung des Kabels in einem Rohr aus duktilem Gusseisen Abhilfe schaffen? Die Eigenschaften des Materials lassen dies sofort vermuten. Duktiles (d. h. verformbares) Gusseisen ist eine stahlähnliche Eisen-Kohlenstoff-Legierung und zeichnet sich dadurch aus, dass es gleichzeitig elektrisch leitfähig und magnetisierbar ist. Die genauen Materialdaten sind herstellungs- und temperaturabhängig [17]. Hier wird für die elektrische Leitfähigkeit der Wert $\sigma = 2 \times 10^6 \text{ S/m}$ verwendet, 30-fach geringer als die Leitfähigkeit von Kupfer, aber millionen- bis milliardenfach über der von Erdreich bzw. Luft. Die relative magnetische Permeabilität wird zu $\mu_r = 1600$ angenommen. Die Wechselwirkung von duktilem Gusseisen mit einem elektromagnetischen Feld ist also sehr stark.

Quantitative Aussagen sind durch Auswertung eines näher spezifizierten Modells möglich. Dafür wird angenommen, dass das Kabel zentriert in einem Rohr aus Gusseisen verlegt ist, wobei ein Innenradius von $R_i = 50 \text{ mm}$ und eine Wanddicke von $\Delta = 4 \text{ mm}$ angesetzt wird.

Die Rechnung zeigt, dass diese Abschirmung in der Tat von erheblicher Wirksamkeit ist. **Bild 8** macht dies deutlich: Im Inneren des Rohres sind die Feldlinien dicht und die Flussdichte damit sehr hoch; in das Äußere ragen hingegen praktisch keine Feldlinien hinein.

Der Abschirmfaktor S , der Quotient der gemittelten Flussdichte ohne und mit Abschirmung, hat im Beispiel einen Wert von 165. Allgemein ist er eine Funktion der Materialparameter Leitfähigkeit und Permeabilität sowie der Geometrieparameter Rohrradius und -wanddicke.

Eine einfache Formel ist nicht möglich. Es kann jedoch als Faustregel festgehalten werden, dass Wanddicken von 4 mm zu Abschirmfaktoren von über 100 führen, also die magnetische Flussdichte auf unter 1 % absenken. Das lässt sogar den Schweizer Grenzwert leicht erreichen. Exaktere Zahlenwerte können aus **Bild 11** abgelesen werden.

Wie funktioniert nun die Abschirmung? Physikalisch setzt sie sich aus der Überlagerung zweier einander verstärkender Einzeleffekte zusammen. Die statische Abschirmung beruht auf der guten Magnetisierbarkeit des Materials: Gusseisen leitet den magnetischen Fluss 1600-mal besser als Luft oder Erdreich und bewirkt somit quasi einen „magnetischen Kurzschluss“ zwischen den beiden Polen des durch den Drehstrom hervorgerufenen magnetischen Dipols. Das Feldlinienbild lässt dies klar erkennen. Die dynamische Abschirmung ist hingegen eine Konsequenz der guten elektrischen Leitfähigkeit des Gusseisens: Das sich zeitlich ändernde Magnetfeld des Drehstroms induziert nach den Maxwell-Gleichungen ein elektrisches Feld, das gemäß dem Ohm'schen Gesetz wiederum einen Strom in der Rohrwand fließen lässt. Dieser Sekundärstrom erregt ebenfalls ein magnetisches Feld, was aber dem ursprünglichen entgegen gerichtet ist (Lenz'sche Regel) und so dessen Abschirmung bewirkt. In Summe kann man also sagen: Rohre aus duktilem Gusseisen können die bei der Übertragung elektrischer Energie mittels Drehstrom auftretenden Magnetfelder wirksam abschirmen. Sieht man einmal von den Kosten der Rohre und den (Zusatz-)Kosten ihrer Verlegung ab, hat das Verfahren keine ins Gewicht fallenden Nachteile. Speziell treten auch nur unwesentliche elektrische Verluste auf – im diskutierten Beispiel sind dies rund 40 Watt pro Kilometer, was in etwa dem Verbrauch einer Glühbirne entspricht.

Dank

Der Verfasser dankt Herrn Peter Brune, Saint-Gobain PAM Deutschland GmbH, für die Anregung zu dieser Untersuchung und für viele interessante Diskussionen.

Literatur

- [1] Wikipedia „Stromnetz“ (2016), <https://de.wikipedia.org/wiki/Stromnetz>
- [2] Hofmann, L.; Oswald, B.R.: Gutachten zum Vergleich Erdkabel - Freileitung im 110-kV-Hochspannungsbereich, (Universität Hannover (2010), <http://www.energie.brandenburg.de>
- [3] Bürgerinitiative Pro-Erdkabel-Neuss (2016), <http://www.pro-erdkabel-neuss.de>
- [4] Bürgerinitiative Jeinsen (2016), <http://www.bi-jeinsen-pro-erdkabel.de>
- [5] Bürgerinitiative Pro-Erdkabel-Hochwald, (2016) <http://www.pro-erdkabel-hochwald.de>
- [6] Webseite der Bundesregierung (2015), <http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2015/10/2015-10-07-netzausbau-erdkabel-statt-freileitung.html>
- [7] 50 Hertz Transmission GmbH (Herausgeber): Freileitung oder Erdkabel? Hintergrundinformationen (2012), <http://www.50hertz.com>
- [8] Vitzthum, T.: (Die Welt), Die Illusion vom schönen, gesunden Erdkabel (2012), <http://www.welt.de/politik/deutschland/article111193105/Die-Illusion-vom-schoenengesunden-Erdkabel.html>
- [9] Schneider, W.: Defizite der deutschen Grenzwerte für elektromagnetische Felder von Höchstspannungsleitungen (2016), www.forum-netzintegration.de
- [10] Bürgerinitiative Rettet den Rursee (2016), <http://rettetdenrursee.de>
- [11] Group „20 kV-Erdleitung-empfohlene Mindestabstände“ (2014), <https://groups.google.com>
- [12] Bundesamt für Strahlenschutz, „Elektrische und magnetische Felder der Stromversorgung“ (2014), <https://www.bfs.de>
- [13] Genz, D.: Magnetische Flußdichte an Kabeltrassen der elektrischen Energieversorgung, TU Berlin (2000).
- [14] 26. BImSchV: Verordnung über elektromagnetische Felder Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, www.bmub.bund.de/N50382
- [15] Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung, <https://www.admin.ch/ch/d/sr/8/814.710.de.pdf>
- [16] Produktblatt Fa. Kabeck GmbH, N2XSEY Mittelspannungskabel nach VDE 0276-620 (2016), <http://www.kabeck.de/produktblaetter/N2XSEY.pdf>
- [17] Hasse, S.: Duktiles Gusseisen, Handbuch für Gusserzeuger und Gussverwender, Berlin (1996)

AUTOR



Prof. Dr. **RALF PETER BRINKMANN**
Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für
Theoretische Elektrotechnik
Tel. +49 234 32-26336
ralf-peter.brinkmann@tet.rub.de
 2017: EG-H-18



Saint-Gobain PAM Deutschland GmbH
Saarbrücker Straße 51
66130 Saarbrücken
info@pam-d.saint-gobain.com
www.pamline.de

Stand: Februar 2017