

EMV-Beeinflussung durch Elektroenergieanlagen

Vorkommen und Gegenmaßnahmen

R. Gehrke, Berlin

Elektroenergieanlagen werden in Deutschland mit Spannungen bis zu 380 kV und Strömen bis zu einigen kA bei 50 Hz betrieben. Dadurch entstehen niederfrequente elektrische und magnetische Felder, die im Gegensatz zu den hochfrequenten Feldern getrennt von einander berechnet und gemessen werden können. Dieser Beitrag zeigt die Auswirkungen der unterschiedlichen Felder und geeignete Gegenmaßnahmen auf.

1 Elektrische Felder

Elektrische Felder sind vorwiegend von der Spannung abhängig. Sie entstehen zwischen Anlagenteilen mit unterschiedlichem Potential und damit zwischen Anlagenteilen mit Leiter-Leiter-Spannung oder Leiter-Erde-Spannung. Die höchsten elektrischen Felder treten demnach in Anlagen auf, die mit 380 kV betrieben werden. Für die allgemeine Öffentlichkeit zugänglich sind hier Freileitungsanlagen. Schalt- und Umspannanlagen befinden sich immer in für die Öffentlichkeit verschlossenen Betriebsräumen oder in eingezäunten Betriebsgeländen.

1.1 Grenzwerte

Für öffentlich zugängliche Bereiche schreibt die 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (26. BImSchV) [1] einen zulässigen Grenzwert für elektrische 50-Hz-Felder von 5 kV/m und 100 μ T für die magnetische Flussdichte in 50-Hz-Magnetfeldern vor. Diese Grenzwerte dienen dem Schutz von Menschen und Nutztieren und gelten für einen dauerhaften Aufenthalt in Gebieten mit diesen Feldeinwirkungen. In Ausnahmefällen darf für einen kurzzeitigen Aufenthalt (5 % von 24 Stunden) z. B. für eine land- oder forstwirtschaftliche Tätigkeit in der Nähe von Freileitungsanlagen, der Grenzwert für elektrische Felder bis maximal 100 % überschritten werden, wenn die elektrischen Felder kleinräumig und außerhalb von Gebäuden vorhanden sind. Die Verordnung berücksichtigt nicht die Wirkung elektrischer und magnetischer Felder auf elektrisch oder elektronisch betriebene Implantate.

1.2 Freileitungen

Unter Freileitungen tritt die höchste elektrische Feldstärke an der Erdoberfläche in

den Bereichen auf, wo die Leiterseile ihren tiefsten Durchhang haben. Das ist bei Freileitungen im ebenen Gelände in der Mitte zwischen zwei Masten, der sogenannten Spannungsmitte.

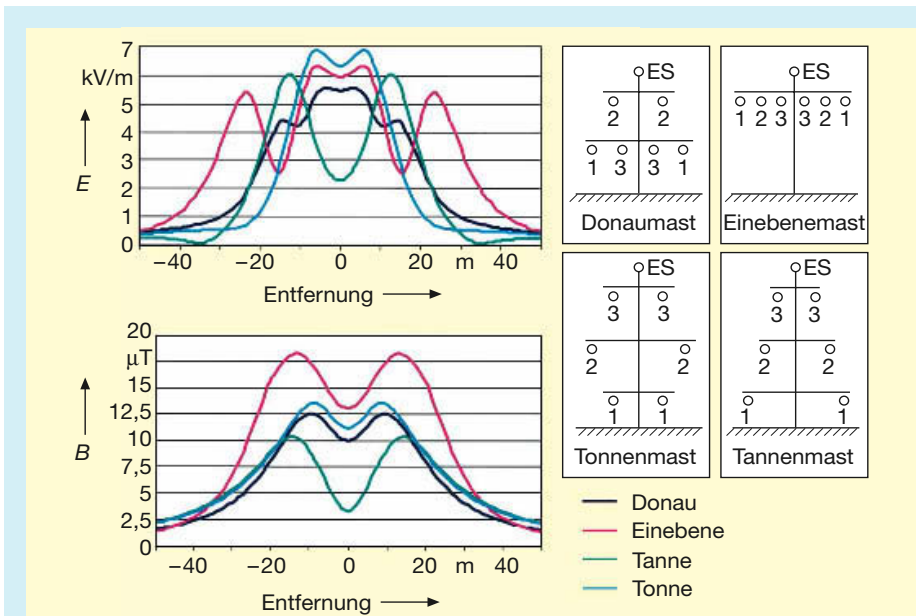
Bild 1 zeigt die Verteilung der elektrischen Feldstärke und der Vollständigkeit halber auch die Verteilung der magnetischen Fluss-

dichte an der Erdoberfläche in Spannungsmitte quer zur Freileitungstrasse für vier der gebräuchlichsten Freileitungsmastformen.

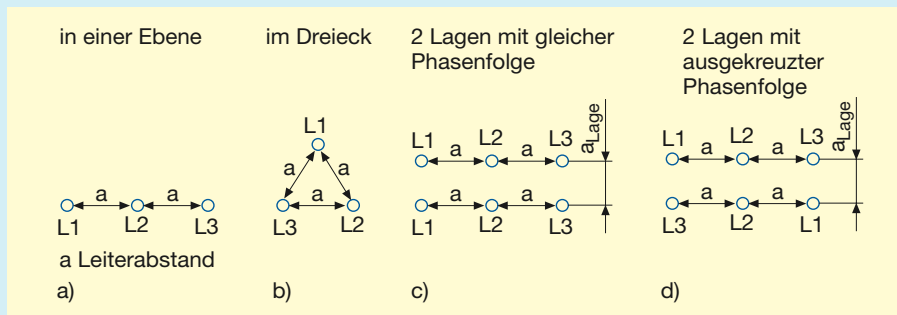
Die Berechnungen wurden mit 380 kV, drei Teilleitern je Phase, einem Durchhang in Spannungsmitte von 10 m, einer Strombelastbarkeit von 1000 A je System und dem Berechnungsprogramm Winfield [2] durchgeführt.

Der Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 μ T wird an der Erdoberfläche aufgrund des großen Abstands zu den aktiven Leitern auch unter ungünstigen Bedingungen weit unterschritten. Für die elektrische Feldstärke ist zu erkennen, dass bei 380 kV durchaus Gebiete auftreten, die den Grenzwert von 5 kV/m für einen dauerhaften Aufenthalt überschreiten. Ein kurzzeitiger Aufenthalt ist jedoch überall möglich.

Da die Spannung direkt proportional der Verteilung der elektrischen Feldstärke ist, ist für Freileitungstrassen bis einschließlich 220 kV um und unter diesen Anlagen keine Überschreitung des Grenzwertes für den dauerhaften Aufenthalt bei normalen Betriebsbedingungen zu erwarten.



1 Verteilung der elektrischen Feldstärke und magnetischen Flussdichte von 380-kV-Freileitungen mit verschiedenen Mastprofilen an der Erdoberfläche in Spannungsmitte (berechnet mit [2])



2 Leiteranordnungen im Drehstromsystem (DS-System)

Autor

Prof. Dr.-Ing. Renate Gehrke unterrichtet an der Berliner FHTW im Fachbereich Ingenieurwissenschaften.

2 Reduzierung der elektrischen Feldstärke

Zur Verringerung der elektrischen Feldstärke an der Erdoberfläche unter Freileitungstrassen sind folgenden Gegenmaßnahmen möglich:

- Einsatz von Freileitungen mit Kombinationsgestänge, das sind Freileitungsmasten mit mehreren unterschiedlichen Spannungsebenen übereinander. Die unten angeordneten niedrigen Spannungsebenen wirken wie elektrische Schirme gegenüber den darüber liegenden höheren Spannungsebenen.
- Andere Phasenbelegung am Mast. Entsprechend der Anordnungen im Bild 1 werden im rechten System die Leiteranordnung der Phasen L1 und L3 vertauscht oder das rechte System um 120° gedreht.
- Durchgängige Masterhöhung ist in der Regel eine kostenintensive Maßnahme.
- An der Störsecke (z. B. empfindliche elektrische und elektronische Geräte) können Abschirmungen eingesetzt werden. In diesen Fällen werden gut leitende Materialien, die impedanzarm mit der Erde verbunden werden, um die Störsecke wie ein Käfig angeordnet.

3 Magnetische Felder

Magnetische Felder werden im wesentlichen von der Stromstärke in den Leitungen bestimmt. Dabei ist es unabhängig, ob diese Leitungen zu Freileitungen, Kabeln, Stromschienen oder Verteilungsanlagen gehören. Jeder stromdurchflossene Leiter baut um sich ein direkt proportional von der Stromstärke abhängiges Magnetfeld auf.

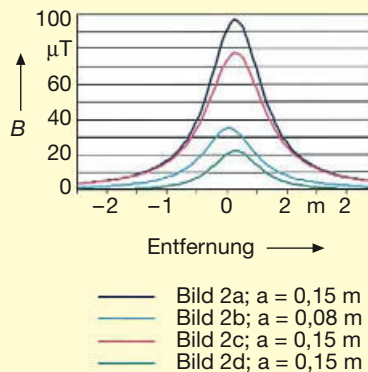
Bei einem einzelnen stromdurchflossenen Leiter nimmt das magnetische Feld in Abhängigkeit von der Entfernung r mit r^{-1} ab.

3.1 Leitungsführung

Bei mehreren stromdurchflossenen Leitern überlagern sich die Feldstärken der einzelnen Leiter. Dabei spielt die Stromrichtung in den Leitern, der Abstand zwischen den Leitern und deren Anordnung zueinander eine entscheidende Rolle. Die Leiter können in einer Ebene, im Dreieck oder ggf. in mehreren Lagen mit unterschiedlicher Phasenfolge gelegt werden (Bild 2).

Außerhalb der Leitungstrasse nimmt das Magnetfeld in Abhängigkeit der Entfernung r mit r^{-2} für Wechselstromleitungen und mit r^{-3} für Drehstromleitungen ab.

In Bild 3 sind die Verteilungen der magnetischen Flussdichte in jeweils 0,5 m über der Leitungstrasse entsprechend der vier Leiteranordnungen nach Bild 2 dargestellt. Die Berechnungen wurden für die Anordnungen 2a und 2b mit einer Leiterstromstärke von 500 A und für die Anordnungen 2c und 2d mit 250 A je Lage durchgeführt. Als Abstände zwischen den Leitern und den Lagen wurden 0,15 m eingesetzt. Bei der Dreiecklegung wurde der Lei-



3 Magnetische Flussdichteverteilung eines Drehstromsystems

Berechnet für eine Höhe von 0,5 m über den obersten Leitern bei Leiteranordnungen gemäß Bild 2 ($a_{\text{Lage}} = 0,15$ m, berechnet mit [2])

terabstand von 0,08 m so gewählt, dass eindrige Kabel sich bei dieser Legung berühren würden. Eine weitere Reduzierung des Leiterabstandes bei Dreiecklegung ist nur durch den Einsatz von mehradrigen Kabeln möglich. Aus Bild 3 ist zu erkennen, dass aus EMV-Sicht die stromführenden Leiter im Dreieck oder in zwei Lagen mit ausgekreuzter Phasenfolge gelegt werden sollten.

3.2 Spulen und Wicklungen

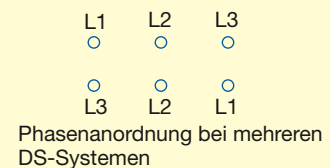
Eine weitere Quelle für magnetische Felder sind Geräte, in denen stromdurchflossene Spulen oder Wicklungen, wie z. B. bei Motoren oder Transformatoren, für den Betrieb erforderlich sind. Da die Wicklungen in diesen Geräten oft sehr hohe Windungszahlen haben und die Windungszahl wie die Stromstärke direkt proportional die Höhe des magnetischen Feldes bestimmt, können auch in der Nähe von Geräten mit sehr kleinen Strömen (z. B. Netzteile für elektronische Geräte) störende Magnetfelder auftreten. In [3] S. 199 Tafel 2 sind einige Beispiele für magnetische Flussdichten in der Umgebung von Haushaltsgeräten aufgeführt.

4 Gegenmaßnahmen

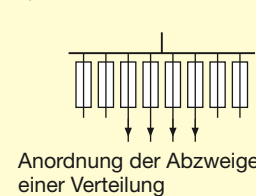
Es sind verschiedene Maßnahmen zur Verringerung des magnetischen Feldes möglich. Entweder wird die Entstehung des Feldes verringert oder es werden Abschirmungen an der Störquelle bzw. der Störsecke eingesetzt. Im einzelnen können folgende Maßnahmen verwendet werden.

4.1 Feldreduzierende Maßnahmen

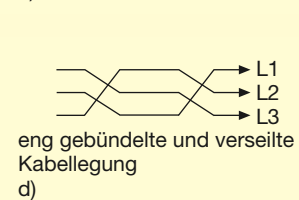
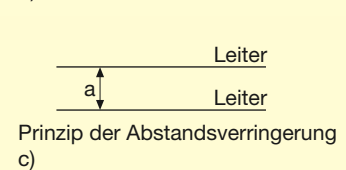
- Verringerung der Stromstärke in den Leitern.
 - Alle Möglichkeiten der **Kompensation** des Leiterstroms nutzen, um möglichst



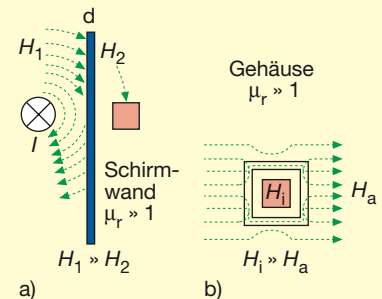
Phasenordnung bei mehreren DS-Systemen



Anordnung der Abzweige in einer Verteilung

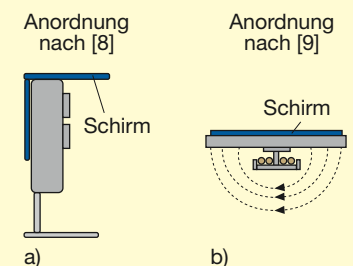


4 Feldreduzierende Maßnahmen



5 Wirkung von Schirmwänden

- durch den Einbau einer Schirmwand
- geschirmtes elektrotechnisches Betriebsmittel durch ein Gehäuse ([4] S. 342)



6 Beispiele für den Einsatz von Schirmwänden

nur noch den Wirkanteil der geforderten Leistung übertragen zu können.

- Große Leistungen auf mehrere Systeme aufteilen (**Phasensplitting**) und die Phasen gemäß Bild 4a anordnen.
- Bei zweiphasigen WS-Systemen sollte der Rückleiter oder, wenn notwendig z. B. bei WS-Bahnanlagen, ein zusätzlicher Leiter in die Nähe der Zuleitung gelegt werden.
- Leistungsstarke Abnehmer und Einspeisungen sollten in das Innere von Anlagen und Verteilungen gelegt werden, wie im Bild 4b am Beispiel einer NS-Verteilung mit Reserveabgängen gezeigt wird. Sinngemäß sollten die Leitungen für Ringversorgungen angeordnet werden. Somit bleibt das Hauptfeld weitestgehend innerhalb der elektrotechnischen Anlage.
- Abstandsverringerung a zwischen den stromführenden Leitungen (Bild 4c). Die Leitungsführung sollte so dicht wie möglich erfolgen, damit sich bei entgegengesetzten Stromrichtungen in den Leitern die Magnetfelder der einzelnen Leiter gut kompensieren können.
- Wenn ein System mit einadrigen Kabeln zum Einsatz kommt, sollten die Kabel eng gebündelt und, wenn erforderlich, verseilt werden (Bild 4d).

4.2 Abschirmungen

Eine Abschirmung kann störende Magnetfelder von empfindlichen Geräten fernhalten (entspricht in der EMV einer Abschirmung an der Störsenke). Alternativ sind die Störfelder direkt am Verursacher, d. h. der Störquelle, abzuschirmen.

In Bild 5 sind zwei mögliche Schirmformen schematisch dargestellt.

Schirmmaterial. Prinzipiell können Schirmwände aus ferromagnetischen Stoffen oder unmagnetischen Materialien bestehen. Entsprechend unterschiedlich ist die physikalische Wirkung der Schirme, wobei Gehäuse-schirme aus unmagnetischen Materialien im niederfrequenten Bereich nicht sinnvoll sind.

Ferromagnetische Schirme. Ferromagnetische Stoffe sind beispielsweise

- Eisen ($\mu_r = 50 - 200$ [5]),



7 Blick in einen Monitor mit Gehäuseabschirmung [11]



8 Monitor mit Magnetfeldkompensator [11]

- Mu-Metall ($\mu_r = 20\,000 - 30\,000$ [5]; 75 % Ni, 18 % Fe, 2 % Cr, 5 % Cu [6]) oder
- Texturbleche ($\mu_r = 16\,000$ in Walzrichtung [7], Haupteinsatzgebiet ist der Transformatorenbau).

Diese Stoffe haben eine relative Permeabilität μ_r , die bedeutend größer als 1 ist und weisen damit eine bessere magnetische Leitfähigkeit als Luft auf. Wie in Bild 5a zu erkennen ist, werden magnetischen Feldlinien in diesem Material gebündelt, bis die Sättigung erreicht ist. Damit ist die Wirksamkeit des Schirms von der Materialeigenschaft μ_r , der Dicke des Schirms d und der gesamten Schirmfläche im Vergleich zu den Abmaßen der Quelle abhängig. Bild 6 zeigt zwei Beispiele für die Anordnung dieser Schirme.

Wirbelstromschirme. Unmagnetische Materialien sind z. B. Aluminium ($\mu_r = 1,000\,022$) und Kupfer ($\mu_r = 0,999\,99$ [10]). Diese Stoffe haben ein μ_r von rund 1 und beeinflussen die Magnetfeldverteilung unwesentlich. Durch die hohe elektrische Leitfähigkeit γ werden beim Eindringen von zeitlich sich ändernden Magnetfeldern in diesen Schirmen Wirbelströme induziert. Diese Ströme erzeugen ihrerseits ein Magnetfeld, welches dem einwirkenden Feld entgegenwirkt. Hier ist die Wirkung von der Schirmwanddicke d und der gesamten Schirmfläche sowie der zeitlichen Änderung des eindringenden Magnetfelds abhängig. Als Abschirmmaßnahme im niederfrequenten Bereich sind diese Schirme weniger geeignet, da meist ein hoher Materialeinsatz notwendig wird. Es ist zu beachten, dass sich dicke unmagnetischen Schirme (auch Wirbelstromschirme genannt) infolge der Wirbelströme erwärmen.

Bypass-Wirkung. Wenn sich die Störquelle wegen ihrer Gesamtausmaße oder der speziellen Lage nicht abschirmen lässt, ist es sinnvoller die Schirmung an der Störsenke vorzunehmen. Bild 5b zeigt die prinzipielle Wirkung von ferromagnetischen Materialien direkt an der Störsenke. Die magnetischen Feldlinien werden hier durch die bessere magnetische Leitfähigkeit gebündelt und um die Störsenke herum geleitet. Diese Wirkung wird daher auch als Bypass-Wirkung bezeichnet. Ein praktischer Anwendungsfall dieser Abschirmung ist im Bild 7 zu sehen.

Magnetfeldkompensator. Im Bild 8 ist eine weitere Möglichkeit der Abschirmung an der Störsenke dargestellt. Hier wird ein Magnetfeldkompensator eingesetzt, indem im Rahmen der Abschirmeinrichtung ein gezieltes Gegenfeld aufgebaut wird. Solche Anordnungen können mit einem Helmholtzspulenpaar ([12]) aufgebaut werden, indem zwei Spulen mit dem Radius r im gleichen Abstand r angeordnet werden. Wenn niederfrequente Ströme durch die Spulen fließen, entsteht im Innern des Spulenpaars ein nahezu homogenes Magnetfeld. Durch den Spulenstrom kann ein Gegenfeld gerade so erzeugt werden, dass das verbleibende Restfeld im Bereich der Störfestigkeit des zu schützenden Gerätes (z. B. Monitore, Messgeräte) liegt.

Literatur

- [1] 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV) vom 16. Dezember 1996. Bundesgesetzblatt, Teil 1, Nr. 66, S. 1966-1968.
- [2] Berechnungsprogramm Winfield, Magnetic and Electric Field Calculation, Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie, Berlin Version 2000.
- [3] Gehrke, R.: EMV – Beeinflussungsmechanismen, Störquellen und ihre Wirkung. Elektropraktiker Berlin, 57(2003)3, S. 199-202.
- [4] Habiger u. a.: Elektromagnetische Verträglichkeit – Grundlagen, Maßnahmen, Gestaltung. Berlin: Verlag Technik 1992.
- [5] Wilhelm, J. u. a.: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Ehlingen: expert Verlag 1992.
- [6] Handbuch: Transformatoren und Wandler. Berlin: Verlag Technik 1958.
- [7] Roseburg, D.: Einsatz von Kleinrechnern zur numerischen Streufeldberechnung in Großtransformatoren. Elektrik 10/87.
- [8] PowerMan Typenübersicht/Schirmwirkung <http://www.cfw.ch>
- [9] Systron EMV <http://www.systron.ch>
- [10] Weißgerber, W.: Elektrotechnik für Ingenieure, Vieweg Verlag 2000.
- [11] Prospekt s.a.m. Products (Stephan Albert Magnetic Products).
- [12] Schwab, A. J.: Elektromagnetische Verträglichkeit, Berlin Heidelberg: Springer Verlag 1994. ■

ANZEIGE

Aktuell für Sie im Internet:

www.bau-fachbuch.de
Aktuelle Fachinformationen

Bücher + Software und mehr ...