

Messtechnische Möglichkeiten der Elektrobranche

Reinhold Bräunlich

Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH), Zürich

1 Messgrössen, Begriffe, Definitionen

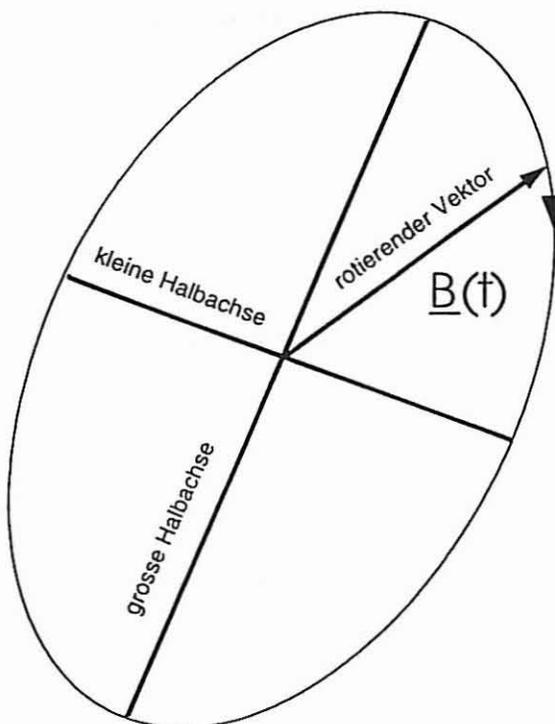
1.1 Allgemeines

Dass E/M-Felder überhaupt postuliert und eingeführt wurden und dass für ihre Wirkung physikalische Gesetze gefunden werden konnten (die Maxwell'schen Gesetze), liegt daran, dass sie messbare Kräfte auf elektrische Ladungen ausüben können. Auf dem Markt befindliche E- und B-Feld-Messgeräte nutzen in der Regel diese Kraftwirkungen für die Quantifizierung von elektromagnetischen Feldern aus. Die aus der Wechselwirkung mit Ladungen folgenden Gesetze für Influenz und Induktion erlauben eine unmittelbare Umsetzung von Feldgrössen in Ströme und Spannungen.

Quasistationäre elektromagnetische Felder besitzen eine Reihe physikalischer Eigenschaften, welche bei Messung und Bewertung berücksichtigt werden müssen:

1.2 Die Frage der Quantifizierung elektrischer und magnetischer Felder

Sowohl elektrische wie auch magnetische Felder sind räumlich ausgerichtete Grössen (Vektorgrössen). Die interessierenden technischen Wechsel-Felder zeichnen sich dadurch aus, dass sich sowohl ihre **Intensität** wie auch **ihre Richtung** im Raum periodisch mit ihrer Betriebsfrequenz ändert. Wird eine elektromagnetische Feldgrösse \vec{F} in einem Raumpunkt als Pfeil (Vektor) dargestellt, so kann die Pfeilspitze je nach Quelle des Feldes fast beliebige Raumkurven durchlaufen.



Vektoren monofrequenter Felder von Drehstromeinrichtungen beschreiben im allgemeinen Fall eine im Raum liegende rotierende Ellipse (siehe Abbildung 1).

Es ist leicht einsehbar, dass ein elektrisches oder magnetisches Drehfeld in einem Punkt des Raums **nicht mehr durch einen einzelnen Wert** vollständig beschrieben werden kann.

Abbildung 1

Drehfeldellipse in einem Raumpunkt. Beispiel anhand der magnetischen Flussdichte B eines Dreiphasensystems.

Zur Beschreibung eines monofrequenten Drehfelds in einem Raumpunkt werden im allgemeinen Fall **sechs Parameter** benötigt: In allen drei Raumrichtungen je eine Phase und eine Amplitude¹.

Bei der Beschreibung eines Feldpunktes einer linearen Feldquelle (Starkstromleitung) fällt die Richtung der Leitungsachse fort, so dass noch vier Parameter nötig sind.

Bei Messungen in der Umgebung von niederfrequenten Feldemittenten benötigt man aber eine einfache und übersichtliche Angabe für die räumliche Feldverteilung. Eine vollständige Beschreibung des elektrischen oder magnetischen Felds durch Auflistung von sechs Parametern pro Raumpunkt ist kompliziert und nicht praktikabel. Eine vereinfachte Quantifizierung der Feldgrößen drängt sich deshalb auf, und es hat sich in solchen Fällen eingebürgert, nur den **Effektivwert** einer Feldgröße \bar{F} anzugeben.

Der Effektivwert einer Feldstärke ist der quadratische Mittelwert des Momentanwerts über eine Netzperiode.

Sind die sechs Parameter der Feldstärke \vec{F} , (Real- (R) und Imaginärteil (I) in den drei Raumrichtungen) in einem Raumpunkt bekannt, so errechnet sich der Effektivwert aus der Wurzel der Quadratsumme wie folgt:

$$F_{eff} = \sqrt{\Re F_x^2 + \Re F_y^2 + \Re F_z^2 + \Im F_x^2 + \Im F_y^2 + \Im F_z^2}$$

Qualitativ hochstehende Messgeräte mit Sensoren in allen drei Raumrichtungen bewerkstelligen diese Berechnung intern automatisch, so dass direkt der räumliche Feldeffektivwert angezeigt werden kann. Bei eindimensionalen Geräten müssen Messungen in allen drei Raumrichtungen und eine nachträglich Berechnung des Effektivwerts vom Benutzer durchgeführt werden.

Bei der praktischen Benutzung von eindimensionalen Geräten wird deshalb in der Praxis oft nur die Richtung höchster Feldstärke gesucht und der dabei angezeigte Wert dann als Messwert angesehen. Es handelt sich in diesem Fall um den Feldeffektivwert der grossen Ellipsenhalbachse. Dieser Wert kann dann um einen Faktor von maximal $\sqrt{2}$ (41%) tiefer als der räumliche Effektivwert liegen.

Dem Autor ist keine öffentliche Begründung oder Diskussion bekannt, weshalb sich in der Praxis der räumliche Effektivwert durchgesetzt hat, und weshalb der Spitzenwert bzw. die Polarisation einer Feldgröße in der Regel nicht betrachtet wird. Eine einleuchtende Begründung für die Wahl des Effektivwerts als wichtigste Messgröße ist immerhin, dass der Effektivwert ein direktes Mass für die deponierte Energie in einem dissipativen Körper wie beispielsweise biologisches Gewebe darstellt (F_{eff}^2 ist proportional zur umgesetzten Leistungsdichte).

Oft werden Drehfelder auch durch Lage und Länge der grossen und kleinen Halbachse der Drehfeldellipsen beschrieben. Diese Angabe ist jedoch ebenfalls bereits nicht mehr vollständig, indem die Angabe über die Phasenlage fehlt (siehe Abbildung 1).

1 Beziehungweise je ein Real- und ein Imaginärteil: $\vec{F} = \{\Re F_x, \Im F_x, \Re F_y, \Im F_y, \Re F_z, \Im F_z\}$.

1.3 Elektrische Felder

Das elektrische Vektorfeld E ist bei Einrichtungen der Energieversorgung meist konstant, da es nur von der Betriebsspannung abhängt. Es besitzt die Einheit Volt pro Meter:

$$\vec{E} [V / m]$$

Aus der physikalischen Einheit wird ersichtlich, dass nebst der Spannung die Geometrie massgebend ist. Es ist im wesentlichen der Abstand zwischen unter Spannung stehenden Teilen und Teilen auf Erdpotential.

1.4 Magnetische Felder

Das magnetische Feld um einen stromdurchflossenen Leiter ist formal gleich wie das elektrische Feld als rotierender Vektor anzusehen. Es kann grundsätzlich durch zwei physikalisch verschiedene Feldgrössen beschrieben werden: die **magnetische Feldstärke** \vec{H} in [A/m] und die **magnetische Flussdichte oder magnetische Induktion** \vec{B} in Tesla [1 T = 1 Vs/m²]¹

Der Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke (auch H-Feld) und der magnetischen Flussdichte (auch B-Feld) ist durch nachstehende Beziehung gegeben:

$$\vec{B} = \vec{H} \cdot \mu_0 \cdot \underline{\underline{\mu_r}} \quad (\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am} \cong 1.26 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am})$$

Wenn keine ferromagnetischen und anisotropen Materialien betrachtet werden müssen, kann die relative Permeabilität μ_r stets als skalare Zahl "1" angesehen werden. In diesem Fall besitzen Angaben über H- und B-Felder grundsätzlich gleiche Aussagekraft. Werte beider Feldgrössen können mit obiger Beziehung in die jeweils andere Feldgrösse umgerechnet werden.

2 Messgeräte

2.1 Messprinzipien, Gerätetypen

Auf dem Markt sind zahlreiche Messgeräte in allen Preisklassen für elektrische Felder, für magnetische Felder und auch für Strahlungsleistungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern verfügbar.

Zur direkten Messung eines Feldvektors bzw. einer Drehfeldellipse sind dreidimensional messende Geräte verfügbar. Eindimensionale Geräte können jeweils nur eine Raumrichtung erfassen, was für eine echte Effektivwertmessung drei Einzelmessungen und eine geometrische Summierung erforderlich macht (siehe Abschnitt 1).

Das elektrische Wechselfeld (E-Feld) wird am einfachsten über den Verschiebungsstrom zwischen zwei Metallelektroden gemessen, die möglichst potentialfrei in den Feldraum gebracht werden müssen.

B-Feldmessgeräte für Wechselfelder bestehen in der Regel aus einer oder mehreren Drahtspulen in denen eine Spannung induziert wird, die der magnetische Flussdichte am Ort der Spule proportional ist.

¹ Für das Magnetfeld H ist auch die Einheit Oersted (1 Oe = 10³/4π A/m), für die magnetische Flussdichte B auch die Einheit Gauss (1 G = 10⁻⁴ Vs/m²) üblich.

Noch im Prototyp-Stadium befinden sich Messgeräte, die auf elektrooptischen oder magnetooptischen Eigenschaften beruhen. Die Preise für solche Geräte sind (hauptsächlich aufgrund der Stückzahlen) noch nicht konkurrenzfähig. Es darf aber angenommen werden, dass solche Geräte in naher Zukunft auf dem Markt erhältlich sein werden. Der Vorteil liegt bei diesen Messgeräten vor allem an der vollständig rückwirkungsfreien Messung. Zum Teil können auch grössere Bereiche der Frequenz und der Amplitude abgedeckt werden als mit rein elektrischen Messprinzipien.

Für die Messung von Hochfrequenzfeldern werden je nach Frequenzbereich unterschiedliche Antennen mit Messempfängern verwendet. Mit Hilfe dieser Geräte können Feldstärken, Strahlungsleistungen, Modulationsarten, Polarisationsrichtung der Felder und Ausbreitungsrichtung gemessen werden.

Hinsichtlich der Erfassung elektromagnetischer Felder sind drei verschiedene Aufgaben und damit Grundanforderungen bzw. Typen von EMF-Messgeräten zu unterscheiden:

1. Erfassung von Einzelmesswerten.
2. Registrierung von Feldverläufen zur Ermittlung statistischer Daten für einen interessierenden Ort.
3. Dosis-Messgeräte, die Einzelpersonen mit sich tragen zwecks Ermittlung von Daten über die Personenbelastung mit Feldern (nur bei magnetischen Feldern gebräuchlich).

2.2 Gerätedaten, Auswahlkriterien

Einige beim Kauf oder Einsatz von EMF-Messgeräten wichtige Geräteeigenschaften und -daten sind in Tabelle I zusammengestellt.

Parameter	Wünschbare Mindestanforderungen
Potentialfreier Betrieb	Bei E-Feldmessgeräten entscheidendes Kriterium (nur bei wenigen Geräten der Fall)
Richtungsempfindlichkeit	1-dimensional oder 3-dimensional. Bei B-Feldmessgeräten sind 3-dimensionale Geräte vorzuziehen (Anzeigemöglichkeit der Feldrichtungskomponenten von Vorteil).
Messwiederholungsrate	eine bis mehrere Sekunden
Feldstärke-Auflösungsvermögen und höchster messbarer Wert	E-Felder: 1 V/m / 20 kV/m B-Felder: 5 nT / 500 μ T
Messunsicherheiten	E-Felder: 5% vom gemessenen Wert B-Felder: 2% vom gemessenen Wert
Frequenzbereiche	Messbereich fest z.B. 15 Hz bis 1 kHz (besser: wählbare Frequenzbereiche, allenfalls Möglichkeit zur Spektralanalyse)
Messwertspeicher	Erforderlich für Langzeitmessungen und tragbare "Dosis"-Messgeräte. In diesem Fall sind die Ausgabemöglichkeiten (Schnittstelle, Software etc. entscheidend).

Tabelle I Wichtige Geräteparameter

Bei der Angabe der Geräte-Daten sind insbesondere folgende Begriffe zu unterscheiden:

- Messbereiche: Angabe der (Anfangs- und) Endwerte der Messbereiche.
- Auflösungsvermögen: Kleinste Änderung, auf die das Gerät noch reagiert (bei digitalen Geräten normalerweise Wertigkeit der letzten Stelle).
- Messunsicherheit: Maximale Abweichung des angezeigten zum tatsächlichen Wert. Diese Angabe schliesst Linearitätsabweichungen und Nullpunktverschiebungen ein. Eine Angabe in Prozenten des gemessenen Werts ist vorzuziehen. In der Praxis wird allerdings die Messunsicherheit meist in Prozenten des Endwerts im betreffenden Messbereich angegeben¹.

3 Vorgehensweise bei EMF-Messungen

3.1 Phase der Messvorbereitung

- Festlegung des Ziels und der Art des Messvorhabens und Wahl der Geräte und Aufzeichnungsmethoden:
 - Erfassung von Mittelwerten, Maximalwerten, Langzeitverläufen.
 - Feldverteilung: Finden des Ortes höchster und niedrigster Feldstärke in einem bestimmten Betriebsfall und in einem definierten Raum.
 - Vergleichsmessungen, Herstellung von Relationen zwischen kritisch beurteilten (neuen Einrichtungen) und den als unkritisch empfundenen (bestehenden) Einrichtungen.
 - Suche von Feldquellen.
 - Messungen im Freien: Ermittlung der Reichweite von emittierenden elektrischen Leitungen und Trafostationen, Profilmessungen.
- Hinterfragen der Aussagekraft und Relevanz der Messung:
Probleme: Zeitlich stark fluktuierende Felder.
Ortsabhängigkeit an der interessierenden Stelle sehr hoch.
- Berücksichtigung der Grösse der Feldquelle (bestimmt das Abklingen der EMF mit zunehmender Distanz).
- Eigenschaften der Quelle: Frequenzbereiche, Intensitätsbereiche, Ausrichtung, Polarisierung.
- Sicherstellung der Registrierung von Kontrolldaten der Feldquellen (Ströme, Leistungen).
- Kontrolle der Umgebungsbedingungen und Vergleich mit Betriebsbedingung (Temperatur, Feuchte, Taupunkt ist besonders bei E-Feldmessgeräten sehr wichtig).
- Geeignete Wahl der Messpositionen.

¹ Bei einer Anzeige von $2 \mu\text{T}$ im $100\text{-}\mu\text{T}$ -Bereich eines Geräts mit 2% Messunsicherheit bezogen auf den Bereichsendwert beträgt der mögliche Fehler (der noch in der Gerätespezifikation liegt): $\pm 2 \mu\text{T}$. In diesem Fall kann die magnetische Flussdichte praktisch Null sein. Das Messgerät suggeriert jedoch eine Flussdichte von $2 \mu\text{T}$, welche mit grosser Wahrscheinlichkeit bereits Bildschirmstörungen verursachen würde.

3.2 Messung

- Funktionskontrolle: Nullmessung, Kontrollmessungen (evtl. Ausschalten von einzelnen Feldquellen), Überprüfung der Reproduzierbarkeit.
- Untersuchung der Ortsabhängigkeit der Feldintensität.
- Durchführung der geplanten Messungen.

3.3 Protokollierung Auswertung

- Kontrolle der Plausibilität:
Entsprechen die Grössenordnung und die Feldverteilung der vermuteten Charakteristik der Feldquelle ?
Liegen unbekannte Beeinflussungen vor ?
- Protokollierung.
- Visualisierung.
- Bewertung.

4 Probleme und Fehlerquellen

Die Schwierigkeiten von E/M-Feldmessungen werden oft unterschätzt, so dass in der Praxis häufig unerkannte Messfehler auftreten. Nebst den Unzulänglichkeiten der Messgeräte selbst werden im folgenden die wichtigsten Messfehlerquellen aufgezählt:

4.1 Allgemeine Fehler

- Unberücksichtigte Richtungsabhängigkeit des Felds. (Bei eindimensionalen Messgeräten muss die Richtungsabhängigkeit zunächst untersucht werden.)
- Die Feldgrössen liegen ausserhalb des Frequenz- oder Intensitätsbereichs des Messgeräts.
- Überlagerung unbekannter Feldquellen.

4.2 B-Felder

- Einfluss des Erdmagnetfelds bei B-Feldmessungen durch Bewegung des Messgeräts während der Messung.
- Einzelmessungen bei veränderlichen Strömen (einzelne gemessenen Werte womöglich nicht repräsentativ).
- Durch Beeinflussung mit unbekanntem Strömen oder Streuströmen wie Erdbodenwirbelströme oder induzierten Kreisströmen in elektrischen Leitern können die tatsächliche B-Felder von den theoretisch abgeschätzten Feldern stark abweichen.

4.3 E-Felder

- Bei der Messung elektrischer Felder wird das Gerät nicht potentialfrei betrieben.
- Verzerrung des elektrischen Feldes durch das Messgerät selbst, durch den Bediener oder durch andere Objekte.
- Verschmutzung oder Feuchtigkeit an der Isolation zwischen den Feldelektroden.

4.4 In der Praxis erreichbare Messunsicherheiten

Bei sorgfältig ausgeführten Magnetfeld-Messungen werden in der Praxis Abweichungen von einigen wenigen Prozenten erreicht. Bei elektrischen Feldern sind aufgrund des nur ungenügend bekannten Umgebungseinflusses Messabweichungen von 5% bis 20% durchaus typisch.

5 Darstellung von Messresultaten

5.1 Einzelmesswerte

Im weitaus häufigsten Fall interessieren bei den Kunden magnetische oder elektrische Felder nur an ganz bestimmten Orten: an Arbeitsplätzen, Betten, Kinderspielorten etc. In solchen Fällen lassen sich die Resultate am besten mit Tabellen festhalten. Ein **Plan**, in welchen die Orte der Messungen eingezeichnet werden können, kann dabei hilfreich sein. Er präzisiert die gemachten Angaben und ermöglicht die Interpretation von Messkampagnen auch nach längerer Zeit.

5.2 Profile

Energie-Kabelleitung oder Freileitungen sind häufig untersuchte niederfrequente Feld-Emissionsquellen. Für die Quantifizierung der für Personen relevanten E- und B-Feld-Emissionen hat sich in diesen Fällen die Betrachtung von **horizontalen Querprofilen zur Leitungsachse in einer Höhe von einem Meter über Boden** durchgesetzt (siehe Abbildung 2).

Abbildung zeigt ein Beispiel eines über einem Erdkabel vorliegenden Feldverteilung in Form eines Querprofils. Die Feldstärken lassen sich in solchen Fällen rechnerisch sehr exakt bestimmen, wobei Abweichen zu gemessenen Werten bei wenigen Prozenten liegen.

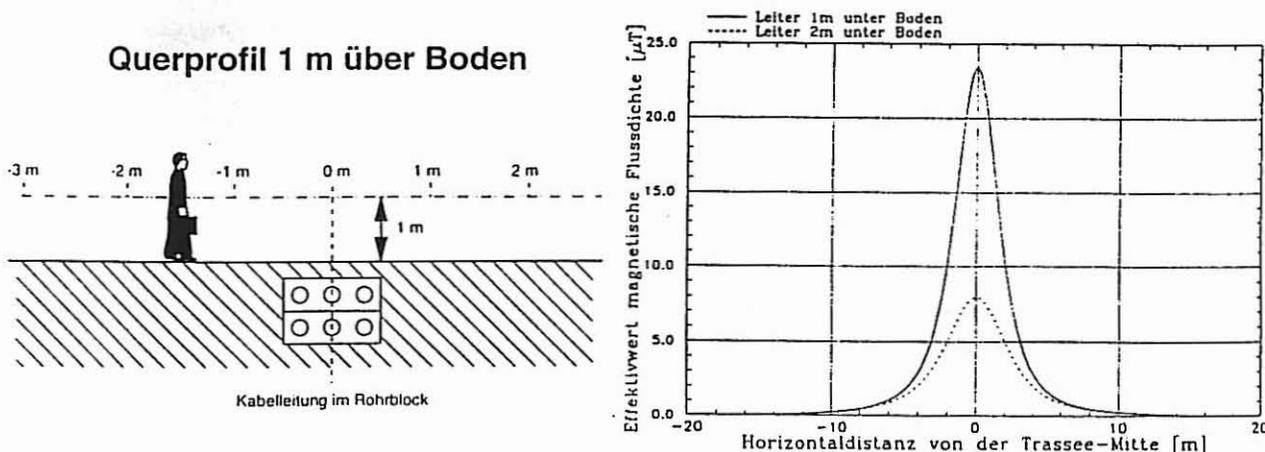


Abbildung 2 Beispiel eines B-Feldprofils: Verlauf des Effektivwerts der magnetischen Flussdichte 1 m über Boden quer über eine Kabelanlage mit optimierter Phasenbelegung bei Betriebsströmen von 2×1000 A. Die zwei Profilverläufe beziehen sich auf eine Rohrblockverlegetiefe von 1 m und 2 m (Abstand: Mitte Rohrblock \leftrightarrow Erdoberfläche).

5.3 Flächengrafiken, Kataster, Feldkarten

Ist die Kenntnis einer flächenhaften oder gar räumlichen Feldverteilung gewünscht, so können Messungen in einem mehr oder weniger festen Raster ausgeführt werden, welche anschliessend in Form von Karten dargestellt werden können. Der relativ grosse Aufwand kann sich auszahlen, wenn ausgeschlossen werden muss, dass in einem bestimmten Bereich eine vorgegebene Feldstärke nicht überschritten wird oder wenn in einem Gebäude Bildschirmarbeitsplätze mit möglichst niedrigen magnetischen Feldern ausgewählt werden sollen.

Ein entsprechendes Beispiel einer flächendeckenden Messung ist in Abbildung 3 dargestellt.

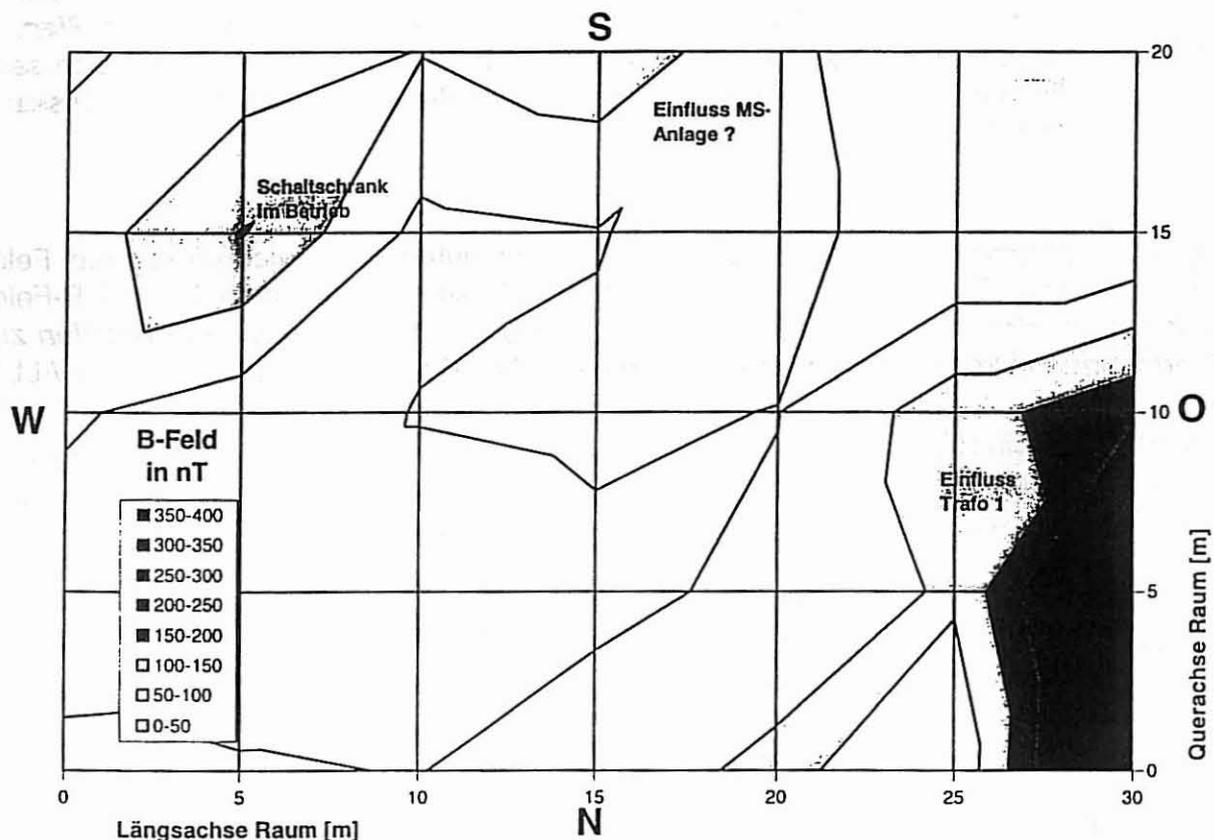


Abbildung 3 Beispiel einer Flächengraphik: Gemessene Feldverteilung in einer Schaltwarte, die sich in einem Raum oberhalb einer SF₆-gekapselten Schaltanlage befindet.

6 Beurteilung von Messresultaten

6.1 Allgemeine Beurteilung, empfohlene Grenzwerte

Bei einer Beurteilung von EMF-Messungen sollten die quantitativ festgehaltenen, eventuell graphisch dargestellten Werte mit den empfohlenen Grenzwerten und den für die betreffende Umgebung typischen Feldstärken verglichen werden (siehe VSE-Informationsbrochüre [2.4]). Bei der Gewichtung der Ergebnisse muss insbesondere auf die Nutzung des untersuchten Ortes Rücksicht genommen werden (technische Beeinflussungsmöglichkeiten bzw. Häufigkeit des Personenaufenthalts an den untersuchten Stellen).

Im Bereich der Feldemissionen im Personenaufenthaltsbereich existieren in der Schweiz Arbeitsplatz-Grenzwerte für 50-Hz-E/M-Felder der Schweizerischen Unfallversicherungsanstalt (SUVA) [1.3]:

Elektrisches Feld	12.3 kV/m
Magnetisches Feld bzw. magnetische Flussdichte	400 μ T

Im Weiteren bestehen internationale Empfehlungen der IRPA (International Radiation Protection Association) [2.3] für die zulässige Personen-Belastung mit elektrischen und magnetischen Feldern bei Kurzzeit- und Langzeitbelastungen für die Allgemeinbevölkerung sowie für Berufsleute. Die Dauerbelastung der Allgemeinbevölkerung bei einer Frequenz von 50 Hz sollte nach der IRPA-Empfehlung folgende Werte nicht überschreiten:

Elektrisches Feld	5 kV/m
Magnetisches Feld bzw. magnetische Flussdichte	100 μ T

In einem vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) in Auftrag gegebenen Expertenbericht aus dem Jahre 1993 [2.1] werden diese Werte als Empfehlung für die Schweiz übernommen. Bei kombinierter E- und B-Feldbelastung soll nach dem BUWAL-Bericht zudem auch die Summe der auftretenden E- und B-Feldstärken in Prozenten der Grenzwerte 100% nicht überschreiten.

Aufgrund möglicher (zur Zeit noch nicht nachgewiesener) gesundheitlicher Risiken schlägt der Bericht **Vorsorgemassnahmen** vor, wonach die emittierten Werte neuer Anlagen in vertretbarem Mass möglichst tief, noch deutlich unter den Grenzwerten liegen sollen (vgl. auch Umweltschutzgesetz, USG [1.1]). Eine Bundesverordnung, über Immissionsgrenzwerte von E/M-Feldern, die sich an den BUWAL-Bericht hält, ist zur Zeit in Vernehmlassung. Dabei werden auch Vorsorgegrenzwerte diskutiert, bei deren Überschreitung eine genaue Erfassung und der Nachweis für eine erfolgte Minimierung der E/M-Feldemissionen erforderlich wird (vgl. auch [3.1]).

Bereits im Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG) [1.1], ist die Einhaltung individueller Grenzwerte für Emissionen und auch die Vorsorge-Strategie verankert. Diese besagt, dass Emissionen auch dann auf das minimal vertretbare Mass limitiert werden müssen, wenn die vorliegenden Emissionswerte innerhalb der verordneten Grenzwerte liegen und ihre Schädlichkeit nicht nachgewiesen ist.

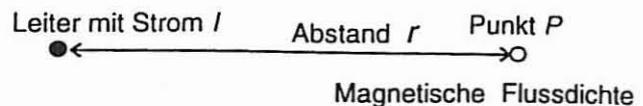
6.2 Plausibilitätsüberprüfung einer Messung, einfache analytische Formeln für magnetische Felder linearer Quellen

Eine wichtige Aufgabe der zur Messung beauftragten Person ist die Kontrolle der Plausibilität der gemessenen Werte. Im wesentlichen ist dabei zu prüfen, ob die gemessenen Werte von der ursprünglich betrachteten Quelle oder allenfalls auch noch von einer anderen Quelle elektromagnetischer Felder herrühren könnten. Eine grobe rechnerische Abschätzung der Feldstärken, kann dabei behilflich sein.

Im Unterschied zu den weniger leicht abschätzbaren elektrischen Feldern kann die Berechnung magnetischer Felder insbesondere von gestreckten Leitern verhältnismässig einfach analytisch ausgeführt werden. Die meist gegebene Voraussetzung dazu ist eine Umgebung aus elektrisch schlecht leitfähigem Material konstanter Permeabilität.

Die magnetische Flussdichte B in einem Raumpunkt P in der Nähe eines einzelnen Leiters, der mit dem Strom I durchflossen wird, berechnet sich wie folgt:

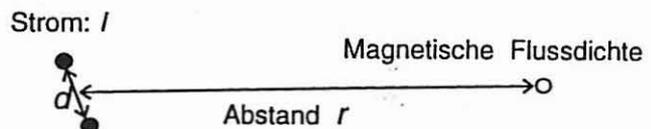
$$B = \frac{\mu}{2\pi \cdot r} \cdot I$$



Dabei ist r der kürzeste Abstand der Leiterachse zum betrachteten Raumpunkt P .

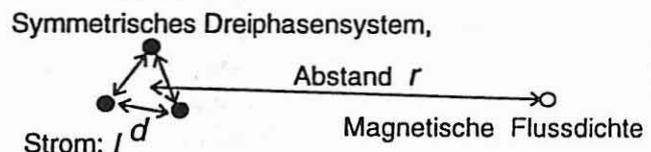
Für ein einfaches Kabel mit parallelem Hin- und Rückleiter ergibt sich eine magnetische Flussdichte von:

$$B \cong \frac{\mu \cdot d}{2\pi \cdot r^2} \cdot I$$



Für die magnetische Flussdichte in der Umgebung einer elektrisch und geometrisch symmetrischen Dreiphasenleitung ergibt schliesslich:

$$B \cong \frac{\mu \cdot \sqrt{6} \cdot d}{4\pi \cdot r^2} \cdot I$$



Für die oben angegebenen Beziehungen sind MKS-Einheiten zu verwenden:

B : [T] bzw. [Vs/m²], $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am, d, r : [m], I : [A].

Beispiele:

- Leiter in einem Meter Abstand, der mit 1 A durchflossen ist: 200 nT
- Doppelleitung in 1 m Abstand, Phasenabstand: 1 cm, I : 1 A: 2 nT
- Dreiphasenleitung in 1 m Abstand, Phasenabstand: 1 cm, I : 1 A: 2.45 nT

7 Anlaufstellen für EMF-Messungen

Alle Überlandwerke, die meisten Kantonswerke.

Schweizerischer Elektrotechnischer Verein (SEV), Luppmenstr. 1, 8320 Fehraltorf.

Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH), Voltastr. 9, 8044 Zürich.

Universitäts- und Hochschulinstitute.

Spezialisierte Ingenieurbüros und Elektroinstallationsunternehmen.

8 Literatur

8.1 Gesetze und Verordnungen

(SR: Systematische Sammlung des Bundesrechts)

- 1.1 **SR 814.01** Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG) vom 7. Oktober 1983.

1.2 **SR 734.35** Verordnung über den Schutz gegen elektromagnetische Störungen (Störschutzverordnung) vom 1 Mai 1979.

1.3 "Grenzwerte am Arbeitsplatz", SUVA, Schweizerische Unfallversicherungsanstalt, Luzern 1994.

8.2 Berichte, Empfehlungen und Informationsschriften zum Thema biologische Wirkungen von E/M-Feldern

2.1 Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), "Biologische Auswirkungen nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung auf den Menschen und seine Umwelt, 1. Teil: Frequenzbereich 100 kHz bis 300 GHz", Schriftenreihe Umweltschutz, Nr. 121, 1990.

2.2 Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), "Biologische Wirkungen elektromagnetischer Felder, 2. Teil: Frequenzbereich 10 Hz bis 100 kHz", Schriftenreihe Umwelt, Nr. 214, 1993.

2.3 International Radiation Protection Association: "Interim Guidelines on Limits of Exposure to 50/60 Hz Electric and Magnetic Fields." Health Physics, 58, 1990, S. 113 - 122.

2.4 Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke, Kommission für medizinische Fragen, "Gesundheitliche Wirkungen elektrischer und magnetischer Felder", Informationsschrift VSE 4.10, 17. Juli 1995.

2.5 Paul Scherrer Institut, Forschungsbereich Biowissenschaften, "50-Hz-Magnetfelder im täglichen Leben", PSI-INFO 020/95.

2.6 Informationszentrale der Elektrizitätswirtschaft E.V., Frankfurt/Main, "Elektrische und Magnetische Felder, Strom im Alltag", Informationsschrift, 1994.

2.7 Andreas Stamm, "Elektromagnetische Verträglichkeit biologischer Systeme, Band 3: Untersuchungen zur Magnetfeldexposition der Bevölkerung im Niederfrequenzbereich", Herausgeber: K. Brinkmann, H. Schaefer, VDE-Verlag, Berlin 1993.

2.8 K. Brinkmann, H.C. Kämer, H. Schaefer; "Elektromagnetische Verträglichkeit biologischer Systeme, Band 4: Elektromagnetische Verträglichkeit biologischer Systeme in schwachen 50-Hz-Magnetfeldern", Herausgeber:, VDE-Verlag, Berlin 1995.

2.9 FKH und VSE; "Niederfrequente elektromagnetische Felder (EMF), Vorstellung, Erläuterungen und Diskussion des neuen BUWAL-Berichts", FKH/VSE-Fachtagung, 21. September 1994, ETH Zürich, VSE-Druckschrift 5.49 d/f.

8.3 Technische Regeln

3.1 VDE, "Sicherheit in elektromagnetischen Feldern", DIN/VDE 0848, Teile 1-4.