

### 3. Die Meßgerätefamilie EFA zur Messung niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder

Die bei W&G entwickelte Meßgerätefamilie stellt eine Komplett-Lösung zur Messung elektrischer und magnetischer Felder in einem Frequenzbereich von 5Hz...30kHz dar. Die kompakten Handmeßgeräte der Gerätefamilie EFA (Elektromagnetic Field Analyzer) zeichnen sich durch einfache Bedienung, normenkonformes Messen und eine hohe Meßgenauigkeit aus, wobei die Kalibrierung der Geräte bezogen auf ein nationales Normal erfolgt. In den folgenden Abschnitten soll kurz dargestellt werden, wie diese Meßgeräte arbeiten und auf welchen physikalischen Gesetzmäßigkeiten die Feldsensoren beruhen.

#### Meßmethode zur Erfassung niederfrequenter magnetischer Felder

Für die Messung magnetischer Wechselfelder im Frequenzbereich von 5 Hz...30 kHz ist ein Sensor basierend auf dem Prinzip der Induktionsspule geeignet. Nach dem Induktionsgesetz wird in einer geschlossenen Leiterschleife dann eine Spannung induziert, wenn sich das durch die Leiterschleife hindurchdringende Magnetfeld ändert:

$$\oint_s \vec{E} d\vec{s} = - \iint_{(A)} \dot{B}_n dA \quad (\text{GL. 1})$$

Da nur bei einer Magnetfeldänderung eine Spannung induziert wird, ist ein Sensor basierend auf dem Induktionsprinzip ausschließlich zur Aufnahme von Wechselfeldern geeignet. Zur Messung magnetischer Gleichfelder muß auf ein anderes Prinzip (z.B. die Ausnutzung des sog. Hall-Effekts) zurückgegriffen werden. Da aber die (meisten) relevanten technischen Felder Wechselfelder sind, soll im folgenden nur auf die Problematik der Messung magnetischer Wechselfelder mit Hilfe von Induktionsspulen eingegangen werden.

Ein Magnetfeld, das senkrecht durch eine Spule hindurchtritt, induziert in der Spule die Spannung:

$$U_{ind} = n2pfBA \quad (\text{GL. 2})$$

- n : Windungszahl
- f : Frequenz
- B : magnetische Induktion
- A : Querschnittsfläche der Spule

Bei hochohmigen Abschluß der Spule kann direkt durch Messen der induzierten Spannung die magnetische Feldstärke ermittelt werden:

$$B = \frac{U_{ind}}{n2pfA} \quad (\text{GL. 3})$$

Wie aus der Gleichung hervorgeht, ist die induzierte Spannung nicht nur von der magnetischen Induktion sondern auch noch von der Frequenz abhängig. Um die induzierte Spannung von der Frequenz unabhängig zu machen, muß der Frequenzgang durch ein entsprechendes Integrationsglied kompensiert werden (je besser diese Frequenzgangkorrektur ist, um so geringer ist die Einflußnahme der Frequenz auf die Meßgenauigkeit). Um die induzierte Spannung möglichst unabhängig von den nachfolgenden Verstärkerstufen zu machen, setzt dieses Meßverfahren eine hochohmige Ankopplung der Induktionsspule voraus, was die Abschirmung von Störsignalen erschwert.

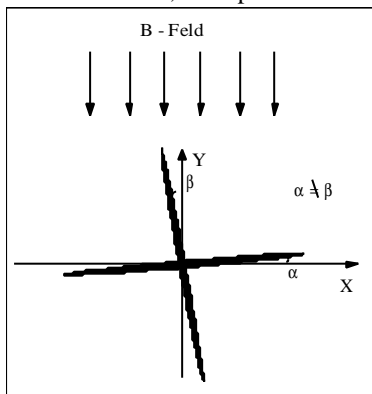
Die Genauigkeit des Meßergebnisses hängt sehr stark davon ab, wie genau die Spule im rechten Winkel zum Feld gehalten wird. Die Messung stimmt nur, wenn das Magnetfeld genau senkrecht durch die Spule hindurchtritt. In der Praxis würde eine korrekte Messung des Feldes so aussehen, daß die Sensorspule solange gedreht wird, bis sich ein Maximum der Induktionsspannung ergibt. Erst dann ist der Sensor so ausgerichtet, daß er senkrecht zum resultierenden Hauptfeldvektor steht. Ein solches (eindimensionales) Meßsystem bringt also schon Fehlerquellen mit sich, die bei der Handhabung solcher Geräte entstehen können. Eine wesentlich bessere Methode der Feldmessung bietet die sog. isotrope Sonde, die das Feld gleichzeitig dreidimensional aufnehmen kann. Das elektrische und magnetische Feld sind sog. Vektorfelder, d.h., sie haben an jedem Punkt des Raumes eine gewisse

Stärke und Richtung, welche bei quasistationären Feldern auch noch zeitabhängig sind. Um ein Feld an einem bestimmten Ort untersuchen zu können, ist es am günstigsten, wenn alle drei orthogonalen Feldkomponenten nach Betrag und Phase (über die Zeit) gemessen werden könnten. Für den Personenschutz (eine Anwendung von Feldstärkemeßgeräten) ist eine so genaue Untersuchung der Felder nicht notwendig. Es ist völlig ausreichend, einen Feldstärkewert zu ermitteln, der als Maß für eine etwaige Gefährdung von Personen ausreichende Information gibt. Deshalb wurde die sog. **Ersatzfeldstärke** für das elektrische und magnetische Feld (VDE 0848 Teil 1) definiert:

$$H_e = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} \quad (\text{GL. 4})$$

Die Vernachlässigung der Phaseninformation hat zur Konsequenz, daß bei elliptisch polarisierten Feldern ein zu großer Wert erfaßt wird ("worst-case Feldstärke"), was aber im Personenschutz toleriert wird.

Ein idealer Sensor zerlegt das Feld in seine Komponenten bezogen auf ein kartesisches Koordinatensystem, dessen Orientierung durch die Lage des Sensors selbst bestimmt wird. Dieser Sensor ist dann ideal isotrop, wenn er unabhängig von seiner Position zum Feld immer den richtigen Wert der Ersatzfeldstärke liefert. Eine solche Sonde zur Messung des Magnetfeldes besteht im wesentlichen aus drei senkrecht zueinanderstehenden Induktionsspulen, die alle die gleiche wirksame Fläche besitzen. Im Gegensatz zur eindimensionalen Messung des Feldes ergeben sich bei der isotropen Felddaufnahme nicht die Schwierigkeiten der genauen Positionierung des Sensors, wohl aber der Einfluß des Isotropiefehlers auf die Meßgenauigkeit. Der Isotropiefehler macht sich dahingehend bemerkbar, daß sich durch Drehung der Sonde im Feld der Wert der Ersatzfeldstärke ändert. Der Isotropiefehler ist auf eine unzureichende mechanische Positionierung der einzelnen Induktionsspulen zueinander zurückzuführen, und später nicht mehr korrigierbar (siehe Abb.).



Ein wichtiger und nicht zu vernachlässigender Punkt ist die Abschirmung eines Magnetfeldsensors gegenüber elektrischer Feldeinwirkung. Soll ein magnetisches Feld bei Vorhandensein von elektrischen Feldern gemessen werden, kann eine unzureichende Abschirmung zu derart großen Meßfehlern führen, daß das Meßergebnis unbrauchbar ist.

Die Meßgeräte der Reihe EFA bieten drei verschiedene Sonden zur Messung des magnetischen Feldes im Frequenzbereich 5 Hz...30 kHz bei einem Meßbereich von 10nT...10mT an. Für die normengerechte Messung steht eine isotrope Präzisionssonde zur Verfügung, die nach VDE 0848 eine wirksame Fläche von 100 cm<sup>2</sup> besitzt. Gemäß der Beziehung nach Gl. 2 ist die induzierte Spannung u.a. proportional der Fläche des Sensors. Deshalb wird mit dieser Präzisionssonde die höchste Meßgenauigkeit und die größte Empfindlichkeit erreicht. Die Abschirmung der Sonde gegenüber dem

elektrischen Feld ist so dimensioniert, daß sich bei einem elektrischen Feld der Größe 100 kV/m ein Fehler von nur ca. 30...60nT ergibt. Die Meßgenauigkeit des gesamten Meßgerätes liegt mit dieser Sonde bei ca. 2%...3% (im Frequenzbereich von 15Hz...2kHz) bei einem (schon eingerechneten) Isotropiefehler von nur 0,5%. Neben dieser Präzisionssonde ist im Basisgerät bereits eine isotrope Sonde eingebaut, wobei trotz der kleinen Abmessungen immer noch eine Meßgenauigkeit von ca. 5% erreicht wird. Zur Messung lokaler Felder auf kleinem Raum steht noch eine kleine (Ø 3cm) externe isotrope Sonde zur Verfügung, die eine Messung des Feldes mit einer Genauigkeit von 4%...5% gestattet. Alle Sonden werden rückführbar auf ein "Feldnormal" bezogen kalibriert.

Das Basisgerät erkennt automatisch die angeschlossene Sonde und bezieht die zu der entsprechenden Sonde gehörenden Kalibrierdatensätze mit in die Berechnung des Ersatzfeldstärkewertes ein.

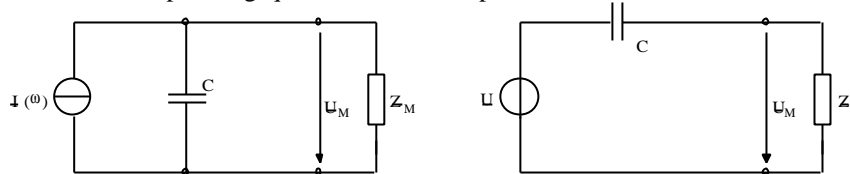
## Meßmethoden zur Erfassung niederfrequenter elektrischer Felder

Die häufigste Methode zur Messung des elektrischen Feldes ist die Kapazitive. Dabei bringt man zwei Elektroden (Dipol, Antennen) in das zu messende elektrische Feld, wobei der an den Elektroden auftretende Verschiebungsstrom gemessen wird. Die Form der Elektroden kann je nach Anwendungszweck unterschiedlich sein. Da hier nur niederfrequente elektrische Felder betrachtet werden sollen, ist die Größe des Sensors praktisch unerheblich. Die Messung des elektrischen Feldes ist gegenüber der des Magnetischen etwas komplizierter. Aufgrund der Tatsache, daß Körper im elektrischen Feld dieses verzerren, müssen spezielle Vorkehrungen für eine einwandfreie Messung getroffen werden. So sollte der Sensor einen Anschluß für einen Lichtwellenleiter besitzen, sodaß von einem Basisgerät aus, welches sich außerhalb des zu messenden Feldes befindet, die Messung gesteuert werden kann. Nur so ist gewährleistet, daß weder Personen noch elektrische Zuleitungen zu

diesem Sensor die Messung des Feldes beeinträchtigen. Äquivalent zur Messung des magnetischen Feldes ist auch hier eine isotrope Messung des elektrischen Feldes wünschenswert. In Zusammenarbeit mit Hr. Dr. Bahmeier von der Uni BW München wurde bei W&G ein dreidimensionaler isotroper Sensor entwickelt, der das elektrische Feld im Frequenzbereich 10Hz...30kHz in einem Meßbereich von 10V/m...100kV/m aufnehmen kann.

Das Meßprinzip sieht im Detail folgendermaßen aus:

An einem Plattenkondensator tritt ein Wechselfeld auf, wenn er sich in einem Wechselfeld befindet. Damit verhält er sich wie ein kapazitiver Dipol, solange seine Abmessungen sehr viel kleiner als die Wellenlänge des betrachteten Signals sind. Ein kapazitiver Dipol läßt sich wie folgt in einem Ersatzschaltbild mit Stromquelle und Parallelkapazität oder mit Spannungsquelle und Serienimpedanz darstellen /1/:



Der frequenzabhängige Strom I der Stromquelle ist dabei der Verschiebungsstrom, der in einem elektrischen Feld auf den Sensor einströmt. Dieser Verschiebungsstrom kann durch die Integration der elektrischen Feldstärke über eine Elektrodenoberfläche berechnet werden:

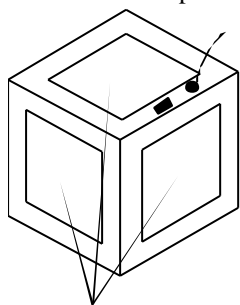
$$I = j\omega\epsilon \int_A \vec{E} d\vec{A} \quad (\text{GL. 5})$$

$\epsilon_0$  =  $8,854 \cdot 10^{-12}$  As/Vm ( $\epsilon = \epsilon_0$  in Luft)  
A : wirksame Fläche der Elektroden

Wird nun die Meßspannung der Anordnung in Abhängigkeit der Verschiebungsstromes und der folgenden Meßschaltung mit der Eingangskapazität  $C_M$  berechnet, so ergibt sich der Zusammenhang zwischen elektrischer Feldstärke und Meßspannung oberhalb der unteren Grenzfrequenz nach /1/ zu

$$U_M = \frac{\epsilon \int_A \vec{E} d\vec{A}}{C + C_M} \quad (\text{GL. 6})$$

Diese Meßprinzip wurde zu einen isotropen Sensor weiterentwickelt, der die Form eines Würfels besitzt. Dabei stehen im Prinzip drei Kapazitäten senkrecht zueinander, die das Feld in orthogonale Feldkomponenten zerlegen.



Sensorflächen

Lichtwellenleiter

Durch einen in der Sonde integrierten digitalen Signalprozessor besteht die Möglichkeit, daß Feld in einem Frequenzbereich von 10Hz...2kHz sowohl breitbandig als auch selektiv zu messen. Für die Messung des elektrischen Feldes stehen alle Funktionen zur Verfügung, die das Basisgerät auch bei der Magnetfeldmessung bietet.

## Besonderheiten der Meßgerätefamilie EFA

Die Meßgeräte der EFA-Reihe bieten die Möglichkeit, die Felder sowohl breitbandig als auch selektiv (bis 2 kHz) zu messen. Besteht das zu untersuchende Feld aus Komponenten unterschiedlicher Frequenz, lokalisiert der eingebaute Frequenzzähler bei aktivierter breitbandiger Messung die Frequenz derjenigen Feldkomponente, die den größten Anteil (die größte Amplitude) am Gesamtfeld besitzt. Im selektiven Meßbetrieb kann dann diese einzelne Feldkomponente genauer untersucht werden. Dazu werden die standardmäßig fest eingebauten relevanten Filterfrequenzen 16,6Hz, 50Hz, 60Hz, 100Hz und 400Hz sowie deren zweite und dritte Oberwelle angeboten. Ferner besteht die Möglichkeit, jede Filterfrequenz im Frequenzbereich 10Hz...2kHz auf 0,1Hz genau einstellen zu können.

Die angezeigte Ersatzfeldstärke wird wahlweise aus den echten Effektivwerten oder den Spitzenwerten der einzelnen Feldkomponenten berechnet. Zusätzlich zum Wert der Ersatzfeldstärke werden die einzelnen Komponenten des Feldes bezogen auf das kartesische Koordinatensystem des Sensors prozentual dargestellt, sodaß die Lokalisierung der Richtung des Hauptfeldstärkevektors erleichtert wird. Die Suche der größten aufgetretenen Feldstärke wird durch die "MAX HOLD" Funktion noch unterstützt.

Die Wahl eines der 6 Meßbereiche geschieht wahlweise automatisch oder manuell. Da das Gerät auch für den Personenschutz konzipiert wurde, kann durch Definition einer Alarmschwelle die Überschreitung einer bestimmten Feldstärke überwacht werden.

Da die magnetische Feldstärke vom Strom abhängig ist, und dieser sich wiederum sehr stark über der Zeit ändern kann (z.B. Felder unter Hochspannungsleitungen), besteht die Möglichkeit einer automatisch gesteuerten Langzeitaufnahme über 24 Stunden. Dazu wird das Meßgerät entsprechend programmiert und die so ermittelten Daten später über die eingebaute optische RS-232 Schnittstelle an einen Rechner übertragen, wo sie dann aufbereitet werden können. Die Möglichkeit der Langzeitaufnahme besteht selbstverständlich auch bei der Messung der elektrischen Feldstärke.

Die Bedienung der Geräte erfolgt menügeführt und ist somit auch von ungeschultem Personal leicht zu handhaben. Ein PC-Transfer Set zur Übertragung von Meßdaten über die optische serielle Schnittstelle rundet das Meßgeräte-Konzept EFA ab.

#### Literatur:

- /1/     Dissertation Dipl. Ing. Georg Bahmeier  
          VDI Verlag  
          Reihe 8, Nr. 438  
          ISBN 3-18-343808-9