

14. Messung niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder EMVU-Kongress 29.03.1995

Referent: Dietmar Tandler
Wandel & Goltermann GmbH&Co
Tel. 07121/86-1523

Inhalt

1	Einleitung.....	2
2	Entstehung von niederfrequenten elektromagnetischen Feldern	2
	2.1 Elektrisches Feld.....	3
	2.2 Magnetisches Feld	4
	2.3 Elektrische und magnetische Ersatzfeldstärke	6
	2.4 Erzeuger von Feldern und Größenordnungen von Feldstärken.....	7
3	Meßmethoden und Meßfehler	10
	3.1 Meßprinzip zur Messung des magnetischen Feldes.....	10
	3.2 Meßprinzip zur Messung des elektrischen Feldes	14
4	W&G Geräte-Konzept zur Messung niederfrequenter elektromagn.Felder	18
	4.1 Entwicklungskriterien	18
	4.2 Gesamtkonzept.....	19
	4.3 Technische Daten des Basisgerätes.....	20
	4.4 Bedienung und Anwendung der Meßgeräte.....	21
	4.5 Kalibrierung der Meßgeräte	24
5	Meßgeräteversionen EFA-1, EFA-2 und EFA-3.....	25
6	Literaturanhang.....	25

1 Einleitung

In der Vergangenheit nahm die Frage an Bedeutung zu, ob und wie sich der Einfluß hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologisches Gewebe und Organismen bemerkbar macht. Diese Problematik nahm drastisch an Popularität zu, als z.B. Hochfrequenz-generatoren wie Mikrowellen-Herde der breiten Bevölkerung zugänglich wurden. Man macht sich in letzter Zeit sehr intensiv Gedanken darüber, wie sich die immer größer werdende Zahl an Sendeeinrichtungen (z.B. Mobilfunk-Netz oder Radar-Sendestationen) auf die Gesundheit der Bevölkerung auswirkt. In diesem Zusammenhang kommt zunehmend auch das nieder-frequente elektrische und magnetische Feld in die Diskussion. Der Verdacht, daß z.B. die durch Überlandleitungen verursachten niederfrequenten magnetischen Felder für verschiedene Krankheitsbilder verantwortlich seien, regte heftige Diskussionen in unterschiedlichen Gremien an.

Im vorliegenden Manuskript soll es nicht darum gehen, ob und wie sich solche nieder-frequenten Felder auf Organismen auswirken. Hier soll vielmehr die Meßtechnik dieser Felder im Vordergrund stehen. In der aktuellen Literatur wird viel über die Physik solcher Felder geschrieben. Dabei kommen allerdings verschiedene Problemansätze bzgl. der genauen Erfassung der Feldgrößen, d.h. der Meßtechnik, etwas zu kurz. Deshalb wird hier basierend auf den theoretischen Grundlagen elektromagnetischer Felder auf mögliche Meßfehler und Unzulänglichkeiten der Feldsensoren eingegangen, sodaß eine kritische Auswahl auf dem Markt befindlicher Meßgeräte durchgeführt werden kann.

Wandel & Goltermann bringt eine neue Meßgerätefamilie auf dem Markt, die speziell für die Erfassung niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder entwickelt wurde. Dieses Meßgerätekonzept wird im Zusammenhang der theoretischen Vorüberlegungen vorgestellt.

2 Entstehung von niederfrequenten elektromagnetischen Feldern

Wie sehen niederfrequente Felder aus, wo entstehen sie und in welcher Größenordnung bewegen sich die Feldstärken ?

Im Gegensatz zu statischen Feldern entstehen elektromagnetische Wechsel-Felder immer dann, wenn durch einen Leiter (Wechsel-) Strom fließt, daß heißt, wenn Ladungen bewegt werden. Dabei entsteht neben dem elektrischen Feld auch immer ein Magnetisches. Gemäß der Beziehung zwischen Stromstärke und Spannung verhalten sich auch die elektrischen und magnetischen Felder bei gleicher Leistung:

Hohe Spannung bewirkt ein relativ starkes elektrisches Feld bei relativ schwachem Magnetfeld und umgekehrt.

Im letzten Jahrhundert (1873) hat der englische Physiker James Clerk Maxwell eine in sich geschlossene Theorie zur mathematischen Beschreibung elektromagnetischer Felder aufgestellt, auf die hier an entsprechender Stelle Bezug genommen wird. Mit Hilfe dieser Theorie lassen sich viele Zusammenhänge in der Feldtheorie erklären.

2.1 Elektrisches Feld

In der Elektrostatik und Elektrodynamik geht man von der Existenz zweier Arten von elektrischer Ladung aus, die sinnvollerweise als positiv und negativ unterschieden werden und sich gegenseitig neutralisieren können. Zwischen zweien (oder mehreren) solcher elektrischen (elementar-) Ladungen wirkt eine Kraft, deren Größe umgekehrt proportional des Abstandes dieser Ladungen ist. Diese elektrostatische Kraft zwischen Körpern mit den Ladungen Q_1 und Q_2 kann als Fernwirkung vorgestellt werden, die irgendwie den Abstand zwischen den Körpern überbrückt. Besser ist aber die Vorstellung eines Feldes: Die Ladung setzt den umgebenden Raum in einen Spannungszustand, das elektrostatische Feld genannt wird; dieses Feld am Ort der anderen Ladung ist es, das auf sie die beobachtete Kraft auswirkt. In der Feldtheorie lassen sich Feldverläufe anschaulich durch Feldlinien darstellen, wobei die Dichte der Feldlinien ein Maß für die Feldstärke ist. Eine Feldlinie folgt an jedem Punkt der Richtung der elektrischen Feldstärke oder der Kraft. Im elektrostatischen Feld, in dem alle Ladungen ruhen, verbinden die Feldlinien immer positive und negative Ladungen; sie enden nie frei im Raum und auch geschlossene Feldlinien treten in der Elektrostatik nie auf (im Gegensatz zu schnellveränderlichen Wechselfeldern). Die Feldlinien einer punktförmigen (positiven) Ladung bzw. die eines Dipols sind in Abb. 2.1 dargestellt.

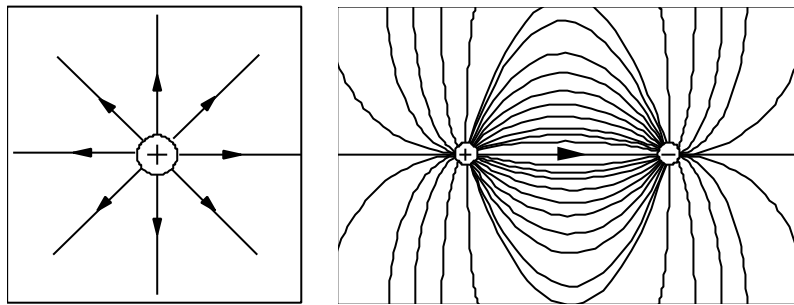


Abb.2.1: a) Feldlinien einer punktförmigen Ladung
b) Feldlinien eines Dipols

Mit wachsendem Abstand von den Ladungen nimmt die Dichte der Feldlinien und somit die Feldstärke ab. Die hier gezeigten Felder sind Beispiele für inhomogene Felder. Das elektrische Feld eines Plattenkondensators ist dagegen bis auf den Randbereich homogen (Abb. 2.2).

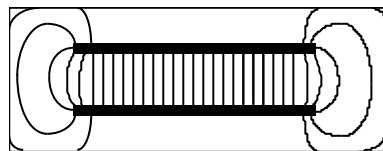


Abb. 2.2: Das elektrische Feld eines Plattenkondensators

Zur Beschreibung des elektrischen Feldes wird die Feldstärke E mit der Einheit V/m eingeführt:

$$[E] = \text{V/m}$$

Zwischen den Platten eines Kondensators beträgt die elektrische Feldstärke dann 1V/m, wenn an die Platten eine Spannung von 1V angelegt wird, und der Abstand der Platten 1m beträgt. Die elektrische Feldstärke wird in der Feldmeßtechnik im allgemeinen als Effektivwert angegeben. Man unterscheidet zwischen elektrischen Quellenfeldern, die durch Ladungen hervorgerufen werden,

und elektrischen Wirbelfeldern, die in der Umgebung von sich zeitl. ändernden magnetischen Feldern auftreten.

Elektrische Felder werden je nach Frequenz als stationäre, quasistationäre und schnell-veränderliche Felder (Wellenfelder) unterschieden, wobei die schnellveränderlichen Felder im hier betrachteten Frequenzbereich keine Rolle spielen. Im Niederfrequenzbereich sind prinzipiell die quasistationären Felder von Interesse, bei denen die Feldverteilung in jedem Augenblick identisch ist mit der Feldverteilung eines statischen Feldes mit ruhenden Ladungen .

2.2 Magnetisches Feld

Wie bereits erwähnt, entstehen magnetische Felder, wenn Strom fließt. Als Magnetfeld bezeichnet man den Zustand des Raumes, der durch Bewegung elektrischer Ladungen entsteht, bzw. verändert wird. Diese magnetischen Felder können folgendermaßen anhand von (fiktiven) Feldlinien charakterisiert werden:

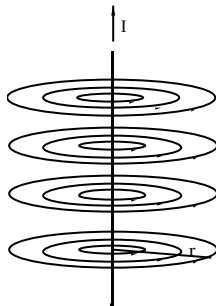


Abb. 2.3: Magnetische Feldlinien um einen geraden stromdurchflossenen Leiter

Dabei bilden die magnetischen Feldlinien konzentrische Kreise um einen geraden stromdurchflossenen Leiter.

Um das magnetische Feld zu beschreiben, wird die magnetische Feldstärke H eingeführt. Die quantitative Untersuchung eines geraden stromdurchflossenen Drahtes ergibt, daß die magnetische Feldstärke proportional der Stromstärke I und umgekehrt proportional dem Abstand vom Draht r ist:

$$H \sim I; H \sim 1/r$$

Das Magnetfeld eines Stromes hat immer in sich geschlossene Kraftlinien, besitzt also weder Quellen noch Senken. Magnetische Felder sind immer **Wirbelfelder**.

Über das Durchflutungsgesetz kann nun eine direkte Beziehung der Magnetfeldstärke zum Leiterstrom hergestellt werden:

$$\oint_K \vec{H} \cdot d\vec{s} = I \quad (2.1)$$

Das Linienintegral der Magnetfeldstärke über jede geschlossene Kurve K ist gleich dem Gesamtstrom, der die von K umschlossene Kurve durchsetzt. Für einen geraden Draht wird man S als Kreisfläche vom Radius r wählen, die der Draht senkrecht durchsetzt. Aus Symmetriegründen ist das Magnetfeld H überall auf dem Rand dieser Kreisfläche gleich. Da es überall tangential gerichtet ist, ergibt sich das Linienintegral über die Kreislinie K zu

$$\oint_K \vec{H} \cdot d\vec{s} = 2\pi r H \quad (2.2)$$

Das muß aber gleich dem Strom sein, der die Kreisfläche S durchsetzt.
Also ist

$$\oint_K \vec{H} \cdot d\vec{s} = 2prH = I \quad (2.3)$$

Daraus ergibt sich für die magnetische Feldstärke

$$H = \frac{I}{2pr} \quad (2.4)$$

Die Einheit der magnetischen Feldstärke ist [A/m]. Sie beträgt im Abstand $r = 15,9$ cm von einem Leiter, durch den der (zeitl. konstante) Strom von 1 A fließt, 1 A/m. Solche statischen Felder werden nicht nur von Strömen erzeugt, sondern auch von Permanentmagneten. So wird beispielsweise die Erde von einem zeitl. nahezu konstanten Magnetfeld umgeben, dessen Feldstärke in Mitteleuropa etwa 32 A/m beträgt.

Bisher wurden nur magnetische Felder betrachtet, die resultierend aus einem zeitl. konstanten Strom erzeugt werden. Ein von Wechselstrom durchflossener Leiter erzeugt ebenfalls magnetische (Wechsel-) Felder. Über das sog. Induktionsgesetz lassen sich solche Wechselfelder mathematisch beschreiben.

Wenn in einer geschlossenen Drahtschlinge eine Änderung des hindurchgreifenden Magnetfeldes stattfindet, so wird in ihr ein Strom erzeugt, der während der Magnetfeldänderung fließt. Durch Versuche kann man beweisen, daß die Folge der Magnetfeldänderung primär eine Spannungsinduktion ist, die nur dann ein Strom hervorruft, wenn die Drahtschlinge geschlossen ist. Man kann ferner zeigen, daß nicht allein die magnetische Feldstärke für die Induktionserscheinungen maßgeblich ist, sondern eine andere mit dieser eng verknüpfte Vektorgröße \mathbf{B} , die Induktionsflußdichte. Die mathematische Beschreibung dieses Sachverhalts findet im Induktionsgesetz (= zweite Maxwell-Gleichung) Ausdruck:

$$\oint_K \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{a} \quad (2.5)$$

Links steht die in der Drahtschlinge induzierte Gesamtspannung, die gleich der Änderung des Induktionsflusses ist. Wie schon erwähnt, hat im Gegensatz zum statischen Feld das induzierte elektrische Feld geschlossene Feldlinien. Es handelt sich hier also um ein Wirbelfeld. Man beachte, daß nach dem Induktionsgesetz überall im Raum ein induziertes elektrisches Wirbelfeld existiert, auch wenn kein Leiter da ist, in dem es einen Strom hervorrufen könnte.

Diverse Versuche und Überlegungen zeigen, daß zwischen der Flußdichte \mathbf{B} , die, wenn sie sich zeitl. ändert, elektrische Felder induziert, und der magnetischen Feldstärke \mathbf{H} , die jeden, auch einen konstanten Strom umgibt, ein fester Zusammenhang bestehen muß. Im materiefreien Raum stellt man folgende exakte Proportionalität fest:

$$B = m_0 H \quad (2.6)$$

μ_0 heißt Induktionskonstante oder magnetische Feldkonstante. Ihr Zahlenwert und ihre Dimension betragen:

$$\mu_0 = 1,256 E^{-6} \frac{Vs}{Am}$$

Häufig wird anstelle der magnetischen Feldstärke H auch die magnetische Flußdichte B als Maß für die Stärke eines Magnetfeldes benutzt. Die Einheit der magn. Flußdichte ist [T] (Tesla) bzw. Gauss (in den USA; $1 \text{ G} = 100 \mu\text{T}$).

Die oben angegebene Gleichung (Gl.2.6) ändert sich, wenn Materie im Spiel ist. Dann kommt noch ein materialabhängiger Proportionalitätsfaktor hinzu:

$$B = \mu_r \mu_0 H$$

In Luft ist diese sog. relative Permeabilität ungefähr 1. Somit gilt die Umrechnung:

$$1 \frac{A}{m} \approx 1,257 \text{ mT}$$

2.3 Elektrische und magnetische Ersatzfeldstärke

Bisher wurde nur prinzipiell an einfachen Beispielen die Entstehung elektromagnetischer Felder gezeigt. Dabei handelte es sich im Prinzip nur um zweidimensionale Darstellungen von Feldverläufen. Das elektrische und magnetische Feld sind aber 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:

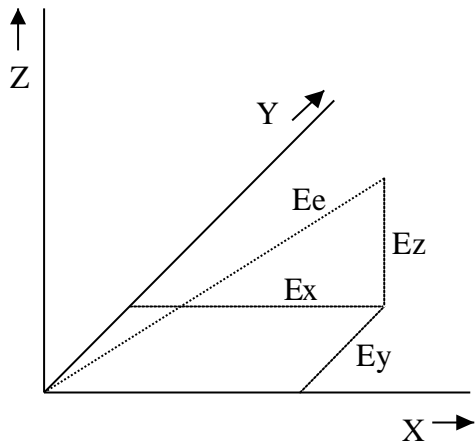


Abb. 2.4: Vektorkomponenten der elektrischen Feldstärke

$$E_e = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

$$H_e = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} \quad (2.8)$$

Diese Ersatzfeldstärke setzt sich aus dem quadratischen Mittelwert der drei Feldkomponenten zusammen, wobei die Phasendifferenzen der drei Komponenten unberücksichtigt bleiben.

Die Vernachlässigung der Phaseninformation hat natürlich auch Konsequenzen bzgl. der genauen Beschreibung des Feldes. Aufgrund der sog. Nahfeldbetrachtung - leitungsgebundene Felder (Niederfrequenzfelder) sind Nahfelder - sind die unterschiedlichen zeitlichen Phasendifferenzen der Feldkomponenten zu berücksichtigen; die Spitze des Feldvektors beschreibt eine Ellipse im Raum: man spricht deshalb auch von einem elliptisch polarisierten Feld. Ändert der Feldstärkevektor seine Richtung nicht (-die Feldkomponenten sind phasengleich-), spricht man von linearer Polarisation. In diesem Sonderfall ist die Ersatzfeldstärke E_e bzw. H_e gleich dem Betrag der Feldstärke E bzw. H . In einem linear polarisierten Feld ist die Lage einer Feldsonde dann nicht von Bedeutung, wenn diese das Feld korrekt in seine drei orthogonalen Komponenten zerlegt. Da in diesem Fall die Ersatzfeldstärke E_e bzw. H_e gleich dem Betrag der Feldstärke E bzw. H ist, wird dieser Sensor immer die richtige Feldstärke E bzw. H messen. Durch die Bildung des quadratischen Mittelwertes aus den drei Feldkomponenten ist ein solcher Sensor bei linearer Polarisation ideal isotrop. Auf das Thema Isotropie wird später noch im Zusammenhang mit dem E-Feld Sensor eingegangen..

Wird ein solcher Sensor in einem elliptisch polarisierten Feld eingesetzt, so liefert dieser (aufgrund der Vernachlässigung der Phasenbeziehungen) zu große Werte, sodaß im Prinzip nur die worst-case Feldstärke ermittelt wird, was im Personenschutz ausreichend ist.

2.4 Erzeuger von Feldern und Größenordnungen von Feldstärken

Wo treten nun solche Felder mit welcher Intensität auf? Ein sehr naheliegendes Beispiel für starke 50 Hz Felder sind natürlich zum einen die Energieübertragungssysteme (wie Überlandleitungen, Transformatoren) und zum anderen die Energieverbraucher (wie elektrische Maschinen aller Art).

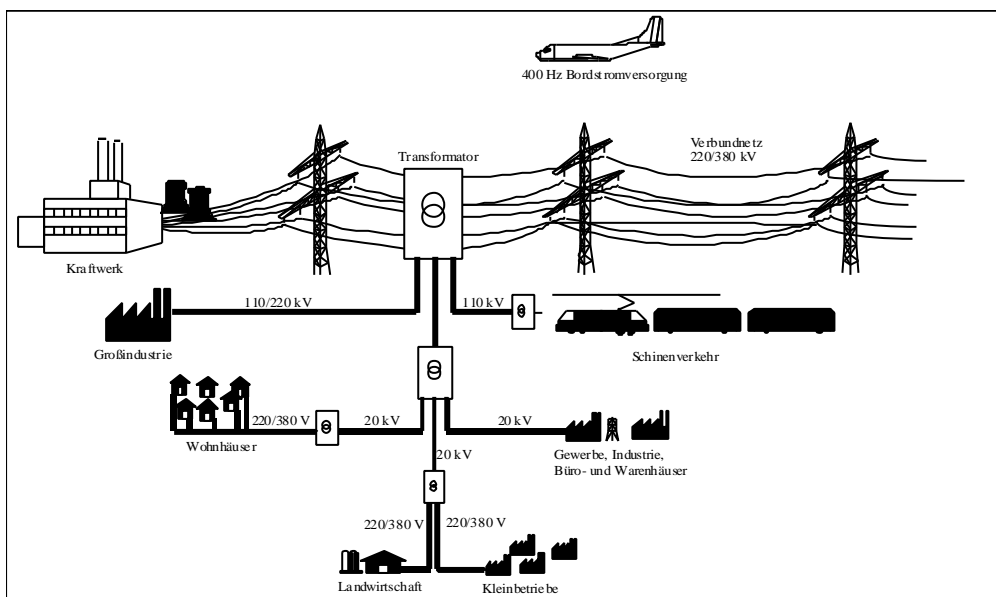


Abb. 2.5 Aufbau der Stromversorgung: vom Kraftwerk zum Verbraucher [1]

Ein Beispiel für die Feldverteilung einer Hochspannungsleitung zeigt folgendes Bild (Abb. 2.6), welches in vielen Veröffentlichungen zum Thema niederfrequente elektromagnetische Felder zu finden ist:

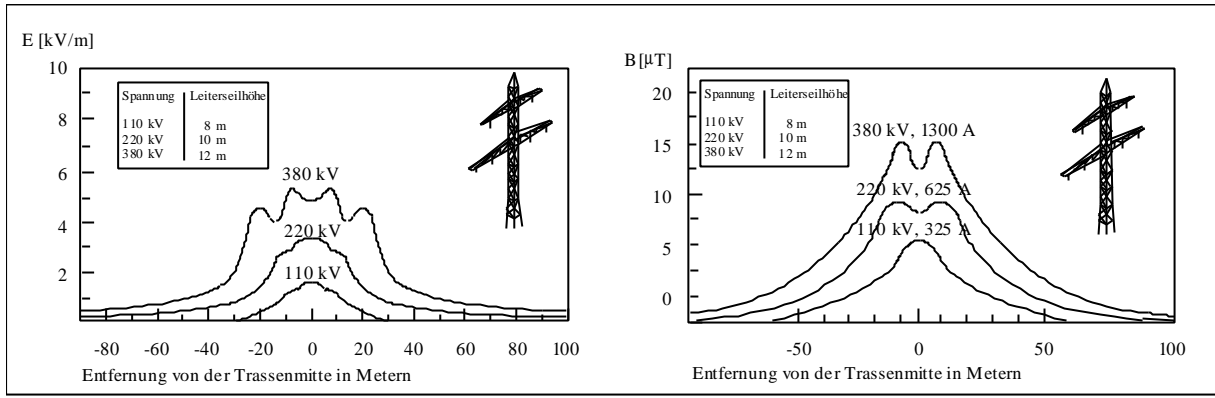


Abb 2.6: Charakteristisches Querprofil elektrischer und magnetischer Felder im Nahbereich von Freileitungen [1]

Das Bild zeigt das charakteristische Querprofil im Nahbereich von Freileitungen. Man sieht hier, daß sich die maximal auftretende magnetische Feldstärke in der Größenordnung $15 \mu\text{T}$ (bei 380 kV Leitung) bewegt und sehr stark mit der Entfernung vom Leiter abnimmt. Der Feldstärkeverlauf ist darüberhinaus sehr stark von der Behängung der Masten abhängig. Die Angaben der magnetischen Feldstärke beziehen sich auf eine 380 kV Leitung mit einem Strom von 1,3 kA je Stromkreis. Der Maximalwert der elektrischen Feldstärke bei gleichen Voraussetzungen beträgt $5,5 \text{ kV/m}$, welcher wiederum von der Phasenordnung der Leiter abhängt.

Ein relevantes Thema bei der Betrachtung elektrischer und magnetischer Felder ist die Abschirmung. Hier stellt sich einerseits die Frage, welche Maßnahmen ergriffen werden müssen, um eine möglichst gute Dämpfung bzw. Abschirmung dieser Felder zu erreichen, und andererseits nach der Beeinflussung der Felder durch Gegenstände.

Im Gegensatz zum magnetischen Feld läßt sich das elektrische Feld durch leitfähige Materialien

relativ leicht beeinflussen und abschirmen.

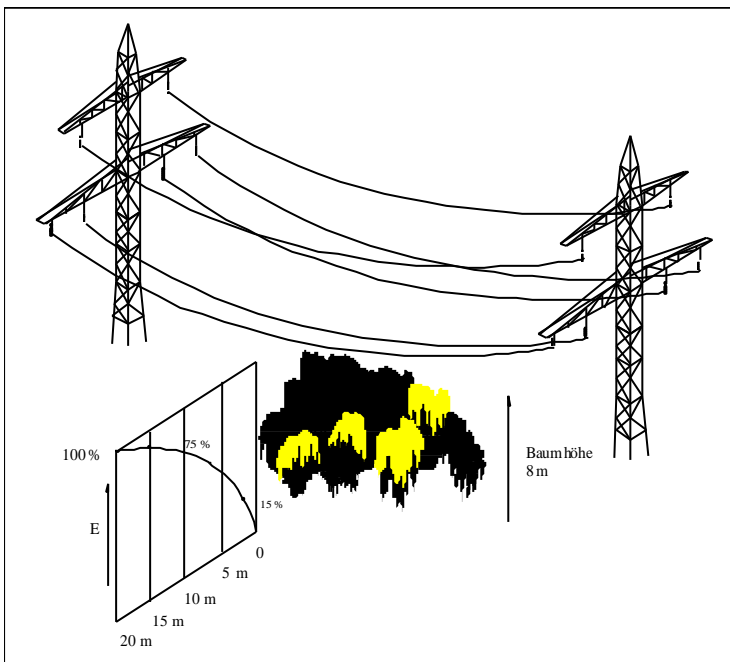


Abb. 2.7: Einfluß eines Baumes auf das elektrische Feld in unmittelbarer Umgebung einer Freileitung [1]

Bis auf 15% reduziert bereits ein Baum das elektrische Feld einer 380kV Leitung in seiner unmittelbaren Umgebung. Die abschirmende Wirkung läßt allerdings mit zunehmender Entfernung nach. Wie später noch gezeigt wird, ist die Schirmwirkung von Gegenständen bzgl. dem elektrischen Feld problematisch für die Messung des Feldes, da bei Anwesenheit von Personen im Feld dieses verzerrt wird.

Abschließend zu dieser Thematik noch eine Auflistung verschiedener (in der Umwelt-) vorkommender Feldstärken im NF-Bereich:

Elektrisches Feld in [V/m]	Verursacher	Magnetisches Feld in [μ T]	Verursacher
15000	380 kV-Station		
10000	380 kV Leitung	2500	Trockenhaube
3000	110 kV Leitung	1000	Elektroherd
500	10 kV Leitung	500	Fernsehgerät
>10000	personengeb. Felder	50	380 kV-Leitung
5 - 40	elektr. Installation	20	110 kV-Leitung
300	Leuchtstoff- röhren	15	el. Fußbodenheizung
300 - 700	Fernsehgeräte	10	Tischlampe
30	U-Bahn (Bodennähe)	6	10 kV-Leitung
		2	220 V Installation

Man sieht, daß sich der Bereich von magnetischen Feldstärken von einigen nT (ca. 50...70 nT im Haushalt bei ausgeschalteten Geräten) bis zu ca. 1..2 mT erstreckt. Für den Bereich der elektrischen Feldstärke ergeben sich Grenzwerte von einigen V/m bis zu einigen 10 kV/m.

Man könnte diese Auflistung natürlich noch fortsetzen. Sie zeigt aber einen Überblick über tatsächlich vorkommende Feldstärken, die für folgende Betrachtungen relevant sein dürften. Dabei geht es um das im Augenblick vieldiskutierte Thema "Personenschutz." Im Gegensatz zu den hochfrequenten Feldern sind Einflüsse von niederfrequenten Feldern auf biologisches Gewebe schwer bzw. kaum nachzuweisen. Die Wärmeentwicklung, die bei organischem Material in hochfrequenten Feldern zu beobachten ist, treten bei (starken-) niederfrequenten Feldern nicht auf. Wie aus vielen Studien bzw. Veröffentlichungen hervorgeht, wurden ausgiebige Versuche mit Tieren und Menschen sowie epidemiologische Untersuchungen durchgeführt (man untersuchte das Auftreten von Krankheiten in der menschlichen Bevölkerung mit dem Ziel, eine Verbindung zwischen einer Krankheit und einem oder mehreren verursachenden Faktoren aufzuklären). Dabei wurden ausgiebige Versuche durchgeführt, bei denen Versuchspersonen magnetischen Feldern in der Größenordnung von 5mT bei einer Frequenz von 50Hz ausgesetzt wurden. Die Ergebnisse waren wie bei vielen anderen Versuchen nicht eindeutig. Es konnten keine eindeutige Schäden oder Beeinträchtigungen dieser Versuchspersonen im Vergleich mit anderen Personengruppen, die keinem Feld ausgesetzt waren, festgestellt werden. Im Gegensatz dazu untersucht man u.a. gehäufte Fälle von Leukämie Erkrankungen, die -so glaubt man- aufgrund von Hochspannungsleitungen aufgetreten seinen, die in der Nähe der Wohnhäuser der Betroffenen verliefen. Eine Schwierigkeit solcher retrospektivischer

Untersuchungen besteht darin, eine Gruppe von Erkrankten als repräsentativ zu betrachten, da Vergleiche mit anderen (gefährdeten) Personengruppen nur dann sinnvoll ist, wenn die "Umgebungsparameter" übereinstimmen.

Da selbst mittlerweile etwa 12000 Veröffentlichungen zu keiner klaren Stellungnahme geführt haben, soll hier noch abschließend zu diesem Thema noch kurz auf diverse Grenzwerte eingegangen werden, die von verschiedenen Gremien in Form von Empfehlungen bzw. Gesetzestexten vorgeschlagen wurden. Diese Grenzwerte sollen Personen für eine Dauerexposition vor evtl. Schäden schützen. Die Grenzwerte sind frequenzabhängig definiert (von 0 Hz bis 30 kHz) und je nach Gremium unterscheiden sie sich im Verlauf. Die Grenzwerte für eine Dauerexposition im magnetischen 50 Hz Feld liegen folgendermaßen:

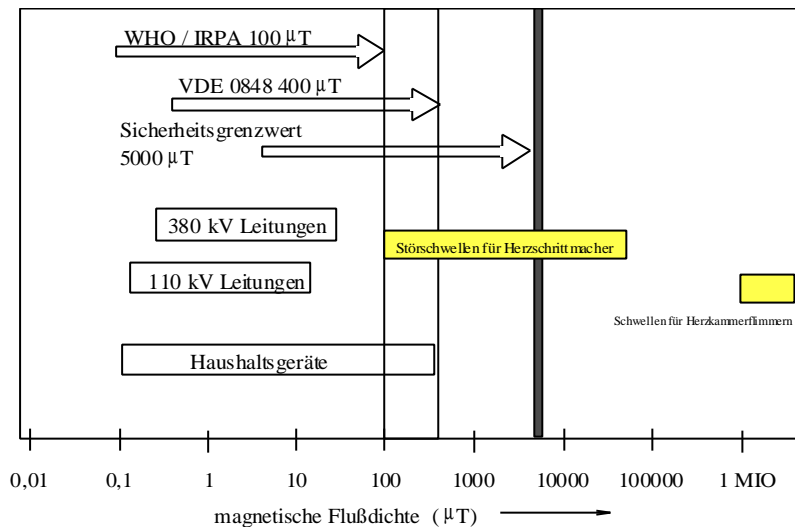


Abb. 2.8 Grenzwerte für eine Dauerexposition im magnetischen 50 Hz Feld [1]

Aus diesen Daten erkennt man, daß geeignete Meßmittel den Bereich einige 10 nT ... 10 mT (magnetisches Feld; 5 mT obere Schwelle) und einige 10 V/m ... 20 kV/m (nach der Deutschen Elektrotechnischen Kommission DKE) messen können sollten.

Nach IRPA liegen diese Maximalwerte für den Daueraufenthalt von Personen bei 5 kV/m (elektrisches Feld) und 100 μT (magnetisches Feld).

Wie diese Grenzwerte letztendlich einmal aussehen werden, ist für die Meßtechnik solange nicht von Bedeutung, wie daß Meßkonzept die entsprechenden Feldstärken (-Bereiche) mit der vorgeschriebenen Genauigkeit und Meßmethodik abdeckt.

3 Meßmethoden und Meßfehler

Aufbauend auf den Kenntnissen der theoretischen Physik bzgl. elektromagnetischer Felder können Meßverfahren bzw. Sensoren zur Erfassung der Feldgrößen entwickelt werden. Im folgenden Kapitel werden die Meßmethoden näher untersucht, die nach heutigem Stand der Technik die besten Ergebnisse in der Feldmeßtechnik liefern. Dabei soll auf verschiedene Problematiken aufmerksam gemacht werden, die sowohl prinzipbedingt als auch durch falsche Handhabung von Feldmeßgeräten zu Meßfehlern führen können.

3.1 Meßprinzip zur Messung des magnetischen Feldes

Eine weitverbreitete Methode zu Messung des magnetischen Feldes ist die praktische Umsetzung des Induktionsgesetzes. Dabei nutzt man die Eigenschaft aus, daß magnetische Wechselfelder eine Spannung in einer Spule induzieren, die proportional der Feldgröße ist:

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

$$U_{ind} = n2pfBA \quad \text{Gl. 3.1}$$

- 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:

$$B = \frac{U_{ind}}{n2pfA} \quad \text{Gl. 3.2}$$

Wie aus der Formel hervorgeht, ist die induzierte Spannung nicht nur von der magnetischen Induktion abhängig, sondern auch noch von der Frequenz. Um die induzierte Spannung von der Frequenz unabhängig zu machen, muß der Frequenzgang durch ein entsprechendes Integrationsglied kompensiert werden (je besser diese Frequenzgangkorrektur ist, umso geringer ist die Einflußnahme der Frequenz auf die Meßgenauigkeit). Die Genauigkeit des Meßergebnisses hängt natürlich 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. Die induzierte Spannung ist abhängig von der wirksamen Fläche der Spule, die durch Einführung eines "Fehlerwinkels" beschrieben werden kann:

$$U_{ind} \approx \cos \alpha$$

Wird die Spule genau senkrecht zum Feld ausgerichtet, ist der Fehlerwinkel gleich null und somit $\cos \alpha = 1$, sodaß die gesamte Spulenfläche wirksam ist. Die cos-förmige Abhängigkeit der Fläche bedeutet, daß kleine Abweichungen auch nur relativ kleine Fehler verursachen.

Für eine korrekte Magnetfeldmessung mit nur einer Spule muß diese solange gedreht werden, bis die Anzeige einen Maximalwert zeigt, der dann der Feldgröße an dieser Stelle entspricht.

Besser als diese eindimensionalen Magnetfeldsonden sind die isotropen Feldsonden, bei denen drei Spulen senkrecht zueinander angeordnet sind.

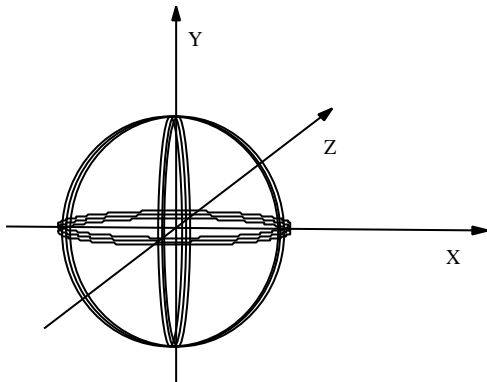


Abb. 3.1 Dreidimensionale isotrope Spulenanordnung

Diese Anordnung hat den Vorteil, daß der Sensor lageunabhängig immer den gleichen Wert der Ersatzfeldstärke liefert. Ist dies der Fall, spricht man von idealer Isotropie des Sensors.

Die Zerlegung des Feldes durch den Sensor in seine Komponenten erfolgt dabei bezogen auf ein kartesisches Koordinatensystem, dessen Orientierung durch die Lage

des Sensors selbst festgelegt wird.

Bei der dreidimensionalen Anordnung kommt noch ein weiterer Einfluß auf die Meß-genauigkeit hinzu: nämlich die exakte senkrechte Ausrichtung der drei Spulen zueinander.

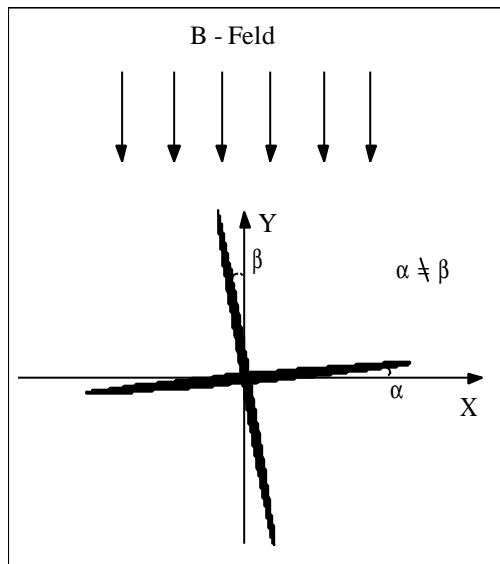


Abb. 3.2: Isotropiefehler durch fehlerhafte Ausrichtung der Spulen

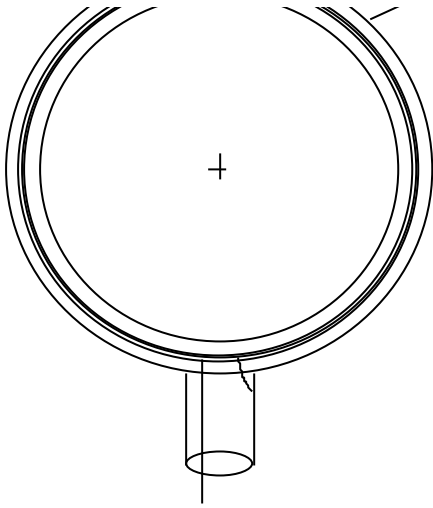
Stehen diese nicht exakt senkrecht aufeinander, wird das Meßergebnis aufgrund des dadurch entstehenden Isotropie-Fehlers ungenau. Im Gegensatz zur eindimensionalen Messung geht nun eine Spule mit der Genauigkeit proportional $\cos\alpha$ und die dazu senkrecht stehende aber mit proportional $\sin\beta$ in den Meßfehler ein (Bemerkung: Der Fehlerwinkel α sei hier durch falsche Ausrichtung des Sensors entstanden. Der Winkel, der den Isotropiefehler verursacht, ist dann $\beta - \alpha$). Bereits geringfügige Abweichungen von der idealen Spulenstellung (zueinander) verursachen u.U. bereits

Meßfehler, die in der Größenordnung 1%...2% und mehr liegen. Deshalb sollte man beim Vergleich von Meßgeräten darauf achten, unter welchen Voraussetzung die Kenndaten eines Meßgerätes zutreffen. Bei Fehlerangaben bzgl. eindimensionaler Meßeinrichtungen fällt der Isotropiefehler gänzlich aus der Fehlerrechnung heraus.

Ein weiteres Kriterium für einen qualitativ guten Magnetfeld - Sensor ist die Abschirmung des Sensors (und des Basisgerätes) gegen elektrische Felder. Abschirmmaßnahmen sind in der Regel sehr teuer, sodaß hier -bei Wegfall- sehr leicht Herstellkosten gespart werden können. Allerdings ist ein solches Magnetfeldmeßgerät bei gleichzeitiger Anwesenheit eines (starken) elektrischen Feldes praktisch unbrauchbar, da daß elektrische Feld den Meßwert u.U. stark beeinflusst. Prinzipiell kann eine Schirmung einer eindimensionalen Spule so aussehen [2]:

Abb. 3.3: Elektrische Schirmung eines B-Feld Sensors

Die Abschirmung eines dreidimensionalen Gebildes ist allerdings etwas aufwendiger, was sich naturgemäß auch auf den Preis auswirkt.



Eine weitere Problematik ergibt sich, wenn die Abmessungen eines Magnetfeldsensors sehr klein werden sollen bzw. müssen, um diesen einerseits direkt in das Gerät einbauen zu können oder andererseits um damit räumlich kleine Feldverteilungen messen zu können ("Schnüffelsonde": Anwendungen im KFZ-Bereich, Flugzeug-Stromversorgungen, etc.). Soll dieser Sensor die gleiche Empfindlichkeit haben wie ein großer, so muß dieser zwangsläufig aufgrund seines geringeren

Querschnittes wesentlich mehr Windungen pro Spule erhalten (siehe Gl. 3.1). Aufgrund der erhöhten Windungszahl werden aber die kapazitiven Einflüsse drastisch steigen, d.h., daß dieser Sensor empfindlicher gegen elektrische Felder reagiert. Ist ein solcher Sensor in einem Gerät direkt eingebaut, so müssen die Umgebungseinflüsse (d.h. die Bauteile des Gerätes) mit in die Fehlerrechnung einbezogen werden. Ferner ist die rechtwinkelige Positionierung der Feldspulen problematisch, sodaß sich hier der Isotropiefehler gegenüber einer großen Präzisionssonde u.U. erheblich vergrößert.

Abschließend sei noch etwas zum Meßvorgang selbst erwähnt. Aufgrund der Tatsache, daß das niederfrequente magnetische Feld fast alle Materialien durchdringt, ist die Messung an sich nicht sehr kompliziert. Je nach Ausführung der nachgeschalteten Auswerteelektronik ist der Meßvorgang mehr oder weniger komfortabel. Die Meßsonde bestimmt dabei den Meßbereich und trägt einen wesentlichen Beitrag zur Empfindlichkeit der Geräteanordnung bei.

Zusammenfassung:

Ein guter Sensor zu Messung der magnetischen Feldstärke sollte also folgendermaßen aussehen:

- große wirksame Fläche (um kleine Wirbelfelder auszuschließen)
- Empfindlichkeit durch entsprechend viele Wicklungen
- kleine Kapazität der Wicklungen
- gute Schirmung bzgl. des elektrischen Feldes
- geringer Isotropiefehler durch exaktes Positionieren der drei Spulen
- normengerechte Abmessungen
- mechanisch stabil
- flexibel

Allerdings darf der Sensor nicht allein betrachtet werden, da die Eingangsverstärker, die die induzierte Spannung des Sensors verarbeiten, mitberücksichtigt werden müssen. So kann z.B. die Empfindlichkeit der Meßanordnung nicht nur durch die Anzahl der Windungen des Sensors verändert werden, sondern natürlich auch von der Empfindlichkeit der Eingangskreise.

Die Lösung bzgl. der Magnetfeldsensoren, die das Meßgerätekonzept von Wandel & Goltermann anbietet, sieht folgendermaßen aus:

Um die Größenordnung eines Magnetfeldes auch ohne externen Sensor feststellen zu können, wurde ein kleiner dreidimensionaler isotroper Sensor direkt in das Basisgerät eingebaut. Ist keine externe Präzisionssonde angeschlossen, wird automatisch über diese interne B-Feld Sonde gemessen.

Diese internen Sensor-Spulen werden so zueinander positioniert, daß das Gerät selbst auf die Isotropie einen möglichst kleinen Einfluß hat. Da z.B. die Anwesenheit von Batterien bzw. Akkus das

magnetische Feld "verbiegen", kann diese Feldverzerrung durch entsprechende Spulenanordnung zwar nicht eliminiert, aber minimiert werden. Durch zusätzliche Abschirmmaßnahmen gegenüber dem elektrischen Feld erreicht diese Anordnung immerhin eine Meßgenauigkeit von ca. 5%, was als sehr gut einzustufen ist. Dieser interne Sensor wird für jedes Gerät separat in der Fertigung kalibriert.

Für normengerechtes (und präzises) Messen des Magnetfeldes steht eine Präzisionssonde zur Verfügung, die nach VDE 0848 eine wirksame Querschnittsfläche von 100cm^2 hat. Mit dieser Sonde wird die höchste Meßgenauigkeit erzielt. Der Isotropiefehler dieser dreidimensionalen Sonde beläuft sich auf nur ca. 0,5%...1%. Die Sonde ist gut geschirmt gegen elektrische Felder und mechanisch robust aufgebaut. Die Einwirkung eines elektrischen Feldes von 100 kV/m ergibt einen Meßwertfehler von ca. 50nT ... 100nT . Die gute Reproduzierbarkeit in der Fertigung gestattet es uns, nur einen Kalibriersatz repräsentativ für alle Präzisionssonden im Gerät abzulegen. Mit dieser Sonde sind Meßgenauigkeiten von 2%...3% zu erzielen.

Für die Messung von magnetischen Feldern an schwer zugänglichen Stellen bzw. für die Erfassung lokaler Felder auf kleinem Raum beinhaltet das Zubehör noch eine kleine Sonde, die ebenfalls dreidimensional und isotrop aufgebaut ist. Um eine möglichst präzise Messung mit dieser Sonde zu ermöglichen (Problematik kleiner Sonden s.o.), werden diese speziell kalibriert und die Kalibrierdaten direkt in der Sonde abgelegt.

Aufgrund dieser Maßnahmen und der Schirmung gegenüber dem elektrischen Feld bewegen sich die gemessenen Werte auf der Genauigkeitsskala bei ca. 4%...5%.

Die Angaben über die Meßgenauigkeit der Sonden beziehen sich immer auf einen Frequenz- und Feldstärkebereich. Es ist vorgesehen, nach Wunsch auch eine spezielle Kalibrierung bei bestimmten Frequenzen anzubieten, was die Meßgenauigkeit dann sicherlich (bei dieser Frequenz) verbessert.

3.2 Meßprinzip zur Messung des elektrischen Feldes

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 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 (Grundsätzlich ist ein Sensor um so besser für die Messung bei hohen Frequenzen geeignet, je kleiner er ist).

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.

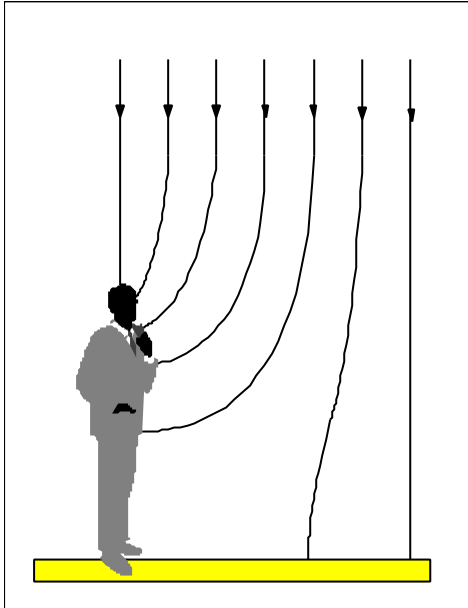


Bild 3.4: Verzerrung des elektrischen Feldes durch einen menschlichen Körper

Da die Anwesenheit einer Person im Feld dieses bereits derart verzerrt, daß praktisch der gemessene Wert mit dem tatsächlichen nicht mehr allzuviel zu tun hat, ist eine Isolierung des Sensors vom Basisgerät nicht nur unumgänglich, sondern zwingend erforderlich. Messungen haben ergeben, daß bereits eine Feldverzerrung stattfindet, wenn sich Personen im Abstand von 7m von der Meßstelle entfernt bewegen.

Wie sieht nun ein Sensor zur Messung des elektrischen Feldes prinzipiell aus?

Im Rahmen der Dissertationsarbeit von Hr. Dr. Bahmeier wurde die Messung elektrischer Felder intensiv untersucht [2]. Bei der Beschreibung der Thematik von Messung

elektrischer Felder wird sich auf diese Arbeit bezogen. Die Nutzung etwaiger Patentrechte bzgl. des dreidimensionalen E-Feld Sensors sind der Fa. Wandel & Goltermann vorbehalten.

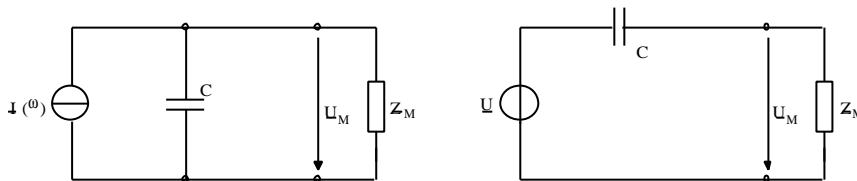
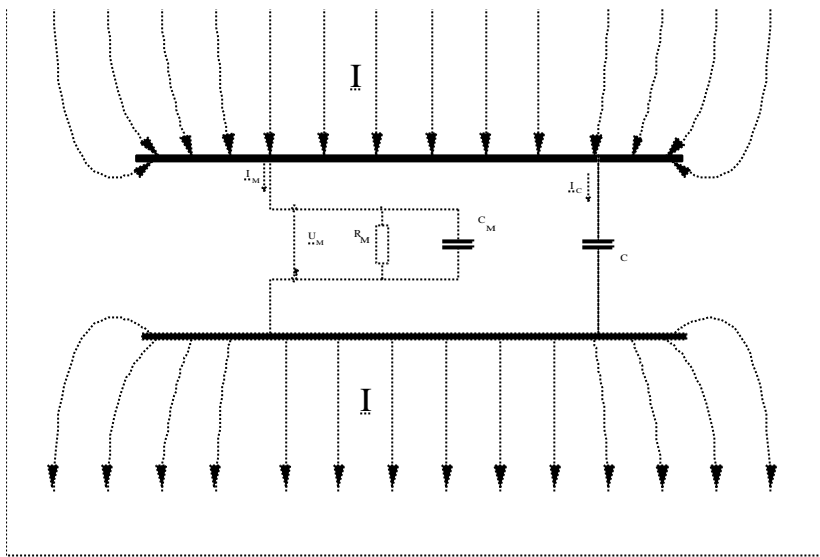


Abb. 3.5: Ersatzschaltbilder für kapazitive Dipole

An dem Plattenkondensator tritt ein Wechselspannungssignal 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, was bei NF-Feldern vorausgesetzt werden kann. Für die Berechnung der Ausgangsspannung kapazitiver Dipole, die mit einer Meßimpedanz Z belastet sind, sind grundsätzlich die in den Bildern dargestellten Ersatzschaltungen geeignet. In der ersten Ersatzschaltung wird der Dipol als Stromquelle mit Parallelkapazität aufgefaßt. Der frequenzabhängige Strom I der Stromquelle ist dabei der Verschiebungsstrom, der in einem elektrischen Feld auf den Sensor einströmt (siehe Abb. 3.6). Die zweite Ersatzschaltung geht dagegen von einer Spannungsquelle mit kapazitiver Serienimpedanz aus. Die Spannung U der Spannungsquelle ist frequenzabhängig und ergibt sich aus dem Produkt der elektrischen Feldstärke und der effektiven Länge des Dipols. Die parallele bzw. serielle Kapazität C ist für beide Ersatzschaltbilder identisch mit der Kapazität des Dipols, die mit einem Impedanz- oder Kapazitätsmeßgerät bei niedrigen Frequenzen gemessen werden kann. Da der hier exemplarisch betrachtete Sensor sehr flach gestaltet ist, bietet es sich an, das Ersatzschaltbild mit Stromquelle und Parallelkapazität zu verwenden. Der auf den Sensor einströmende Verschiebungsstrom kann durch die Integration der elektrischen Feldstärke über eine Elektrodenoberfläche berechnet werden:



$$I = j\omega e \frac{A}{d} \quad \text{Gl. 3.3}$$

$e_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$
 As/Vm ($\epsilon = \epsilon_0$ in Luft)
 A : wirksame Fläche der Elektroden

Abb. 3.6; Stromfluß durch einen kapazitiven Sensor [2]

Der Strom I erzeugt eine Spannung an den Elektroden bzw. an der Eingangsimpedanz der parallel zu den Elektroden liegenden Meßschaltung. Die Eingangsimpedanz der **Meßschaltung** wird durch einen hochohmigen Source-Folger bestimmt, um einen möglichst großen Frequenzbereich frequenzunabhängig zu machen. Diese Eingangskapazität C_M des Source-Folgers liegt parallel zur Plattenkapazität. Die Spannung U_M , die an den Sensorplatten und damit am Eingang der Meßschaltung auftritt, ergibt sich aus:

$$U_M = I_M Z_M = I Z_{ges} = \frac{j\omega e \frac{A}{d}}{\frac{1}{R_M} + j\omega(C + C_M)} \quad \text{Gl. 3.4}$$

Mit der angenommenen Meßimpedanz Z_M stellt der Sensor einen Hochpaß 1. Ordnung dar (siehe Ersatzschaltbild). Seine Grenzfrequenz ist

$$f_g = \frac{1}{2\pi R_M (C + C_M)} \quad \text{Gl. 3.5}$$

Bei Frequenzen deutlich oberhalb der Grenzfrequenz kann der Eingangsleitwert der Meßschaltung gegenüber dem Blindleitwert der kapazitiven Elemente vernachlässigt werden:

$$1/R_M \ll \omega(C + C_M)$$

Damit vereinfacht sich Gleichung 3.4 wie folgt:

$$U_M = \frac{e \frac{A}{d}}{C + C_M} \quad \text{Gl. 3.6}$$

Diese Gleichung zeigt, daß die Messung der elektrischen Feldstärke oberhalb der unteren Grenzfrequenz frequenzunabhängig erfolgt. Um eine niedrige untere Grenzfrequenz und damit einen

möglichst breitbandigen Sensor zu erhalten, muß deshalb der ohmsche Eingangswiderstand der Meßschaltung möglichst groß gemacht werden.

Da hier nur niederfrequente Felder betrachtet werden sollen, spielen die theoretischen Überlegungen bzgl. einer oberen Grenzfrequenz, die bei ca. 180 MHz liegt, keine Rolle.

Anhand dieser theoretischen Überlegungen sollte gezeigt werden, wie der Mechanismus eines kapazitiven Sensors zur Messung des elektrischen Feldes funktioniert. In der Literatur bzw. in den (jetzt aktuellen) Veröffentlichungen findet man - wenn überhaupt - diese Meßanordnung.

Es soll hier nicht weiter auf die theoretischen Überlegungen zu diesem Thema eingehen, da diese ausführlich in der genannten Literatur zu finden sind.

Im folgenden wird die praktische Umsetzung dieses Meßprinzips in einen Sensor dargestellt, der die Palette verfügbarer Sensoren in unserer Feldmeßtechnik abrundet. Soweit wir informiert sind, ist dieser Sensor einzigartig auf dem Markt. Er hat nämlich die Eigenschaft, daß elektrische Feld dreidimensional und selektiv zu erfassen, er ist also voll isotrop. Dabei wird eine Meßgenauigkeit erreicht, die z.T. weitaus besser ist als viele sich auf dem Markt befindlicher eindimensionaler Sensoren. Besonders markant dürfte die würfelförmige Form dieses Sensors sein.

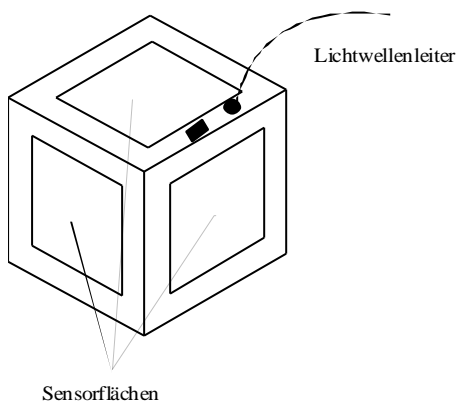


Abb. 3.7: Dreidimensionaler isotroper Sensor zur Messung der elektrischen Feldstärke

Dieses Prinzip wurde von Hr. Dr. Bahmeier im Rahmen seiner Dissertation sowohl theoretisch als auch praktisch untersucht. Wir haben eine Zusammenarbeit mit Hr. Dr. Bahmeier angestrengt und dieses Prinzip weiterentwickelt und zur Serienreife gebracht. Alle theoretischen Überlegungen und die dazugehörigen praktischen Meßergebnisse können in seiner Dissertation nachgelesen werden [2].

Das beschriebene Prinzip der kapazitiven Meßwertaufnahme findet hier in drei Dimensionen seine Anwendung. Der Sensor besitzt drei senkrecht zueinanderstehende Platten, die gegenüber dem "Würfelkern" jeweils eine Kapazität bilden. Aus Symmetriegründen wurde gegenüber diesen 3 "aktiven" Platten jeweils eine weitere Platte montiert, die allerdings nicht in die Messung eingreift. Die drei Feldkomponenten ergeben sich durch Messung des Verschiebungsstromes der einzelnen Platten. Über drei Eingangsverstärker und Multiplexerstufen werden diese Signale abgetastet und von einem Signalprozessor weiterverarbeitet. Dadurch ist eine spektrale Zerlegung der Feldkomponenten und somit eine selektive Messung des Feldes möglich. Die gesamte Elektronik für die digitale Signalverarbeitung befindet sich im Sensor selbst. Zum Basisgerät werden dann nur noch die berechneten Komponenten übertragen. Dadurch wird der Datenstrom auf ein Minimum reduziert, was der Lebensdauer der im Sensor fest eingebauten Akkus zugute kommt. Um das elektrische Feld möglichst wenig zu verzerren, werden die Daten vom Sensor über Lichtleiter (max. 20 m) übertragen. Über diese Lichtwellenleiter läßt sich der Sensor vom Basisgerät aus komplett fernsteuern.

Eine sehr interessante Frage ist die der Isotropie dieser Struktur. Isotrop heißt, der Sensor liefert in jeder Position zum Feld immer den gleichen Wert für die Ersatzfeldstärke. Der theoretische Nachweis ist recht kompliziert und kann in o.g. Arbeit nachgelesen werden. Die praktische Beweisführung zum Isotropieverhalten des Sensors sei hier kurz dargestellt:

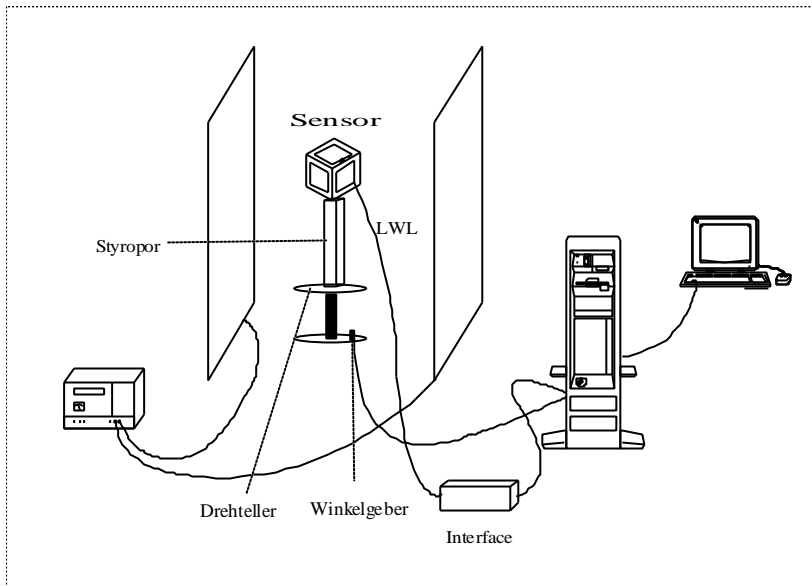


Abb. 3.8: Meßaufbau zur Isotropiemessung [2]

Der Meßaufbau besteht aus zwei gegenüberliegenden Platten, mit deren Hilfe ein definiertes elektrisches Feld generiert werden kann. Im Feld selbst befindet sich ein Drehteller, der von außen über einen Rechner gesteuert wird. Der Sensor wird zunächst auf eine Seite gelegt und dann gedreht. Die

Auswerteschaltung befindet sich außerhalb der Feldanordnung und ist über einen Lichtwellenleiter mit dem Sensor verbunden. Diese Auswerteschaltung liefert dem Rechner die aktuellen Meßdaten, der diese dann zu dem Ersatzfeldstärkewert umrechnet. Das Ergebnis dieser Berechnung zeigt folgendes Bild:

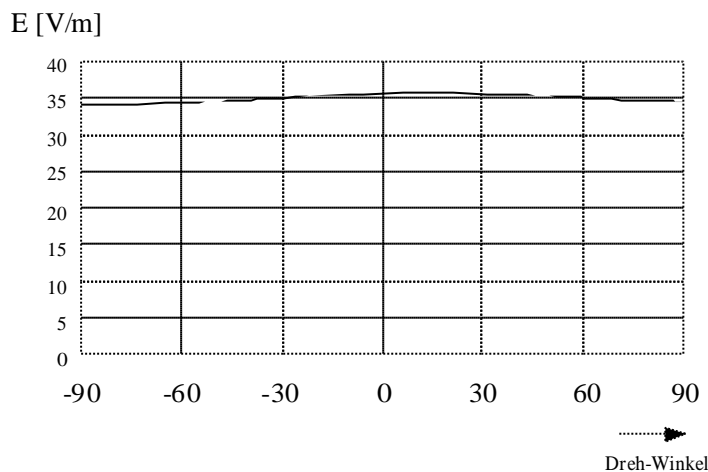


Abb. 3.9: Ergebnis der Isotropiemessung für einen auf der Seite stehenden Sensor [2]

In diesem Diagramm ist der Verlauf der Ersatzfeldstärke der drei Würfelkomponenten dargestellt, der sich über den Winkel betrachtet kaum ändert.

Im nächsten Versuch wird der Würfel auf eine Spitze gestellt und dann wieder gedreht. Das Meß- und Rechenergebnis ist im folgenden Diagramm zu sehen:

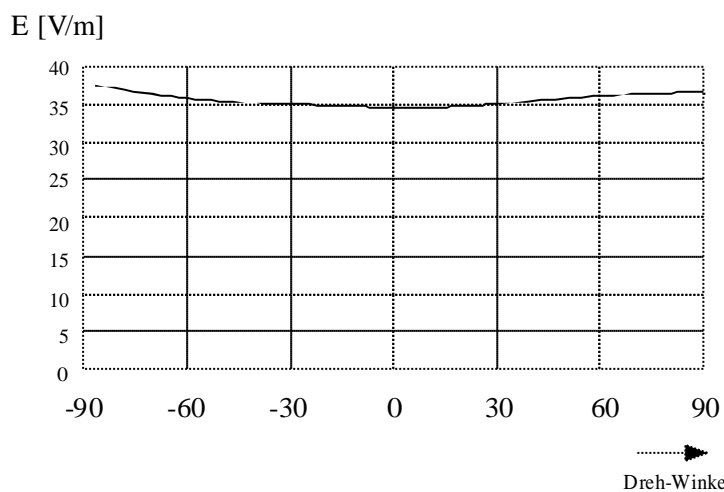


Abb. 3.10: Ergebnis der Isotropie-messung für einen auf der Spitze stehenden Sensor [2]

Auch hier zeigt sich wieder das gute Isotropieverhalten dieses Sensors.

Wie sieht es nun mit der Meßgenauigkeit bei diesem Meßprinzip aus? Ausschlaggebend ist die exakte mechanische Fertigung mit

nachfolgender Kalibrierung des Sensors. Wichtig dabei ist, daß der Abstand der Elektroden nach der Kalibrierung nicht verändert wird. Kleinste Veränderungen im Abstand der "Meßkondensatoren" haben sofort eine Meßungenauigkeit von mehreren % zur Folge. Deshalb wird der Sensor mit fest eingebauten Akkus montiert, die über eine seitlich angebrachte Ladebuchse

zugänglich sind. Aufgrund der eben genannten mechanischen Bedingungen muß nach jedem Akku-Wechsel der Sensor neu kalibriert werden, was wir grundsätzlich nur im Haus durchführen. Um eine möglichst gute Abschirmung gegenüber niederfrequenten magnetischen Feldern zu erzielen, wurde eine umfangreiche MU-Metall Schirmung eingebaut.

Durch die genannten mechanischen und elektrischen Maßnahmen wird eine Meßgenauigkeit des elektrischen Feldes von ca. 5%...10% erreicht, was als äußerst gut einzustufen ist. (Meßungenauigkeiten des elektrischen Feldes von 30 % und mehr sind bei vielen auf dem Markt befindlichen Sensoren keine Seltenheit)

4 W&G Geräte-Konzept zur Messung niederfrequenter elektromagn.Felder

4.1 Entwicklungskriterien

Die Entwicklungskriterien für die Gerätefamilie EFA-1, EFA-2 und EFA-3 orientierten sich an den Bedarf solcher Meßgeräte in der Praxis. Durch viele Gespräche mit Anwendern von niederfrequenten Feldmeßgeräten kristallisierten sich folgende wesentliche Entwicklungsziele heraus:

- Entwicklung einer Komplettlösung (Messung von E- und B-Feld)
- einfache Bedienung (Bedienung muß auch von "Nicht Fachpersonal" möglich sein)
- Möglichkeit der normengerechten Messung
- Meßbereich angepaßt an die real vorkommenden Feldstärken
- isotrope Messung der Felder
- Möglichkeit der selektiven Messung bei relevanten Frequenzen
- Dokumentations - Möglichkeit der gemessenen Daten
- Alarmfunktion
- gut handhabbar (klein und robust)
- gutes Preis/Leistungsverhältnis

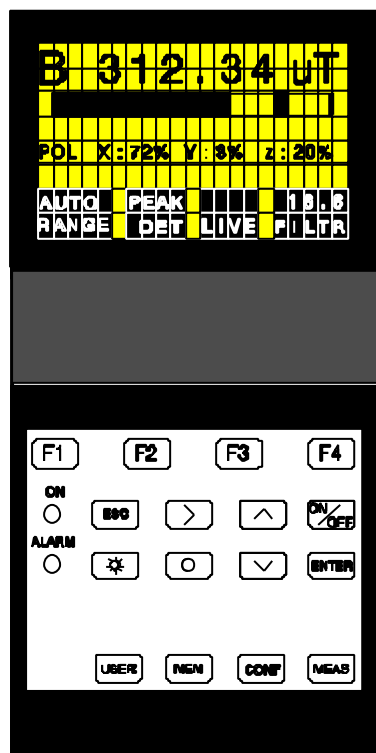
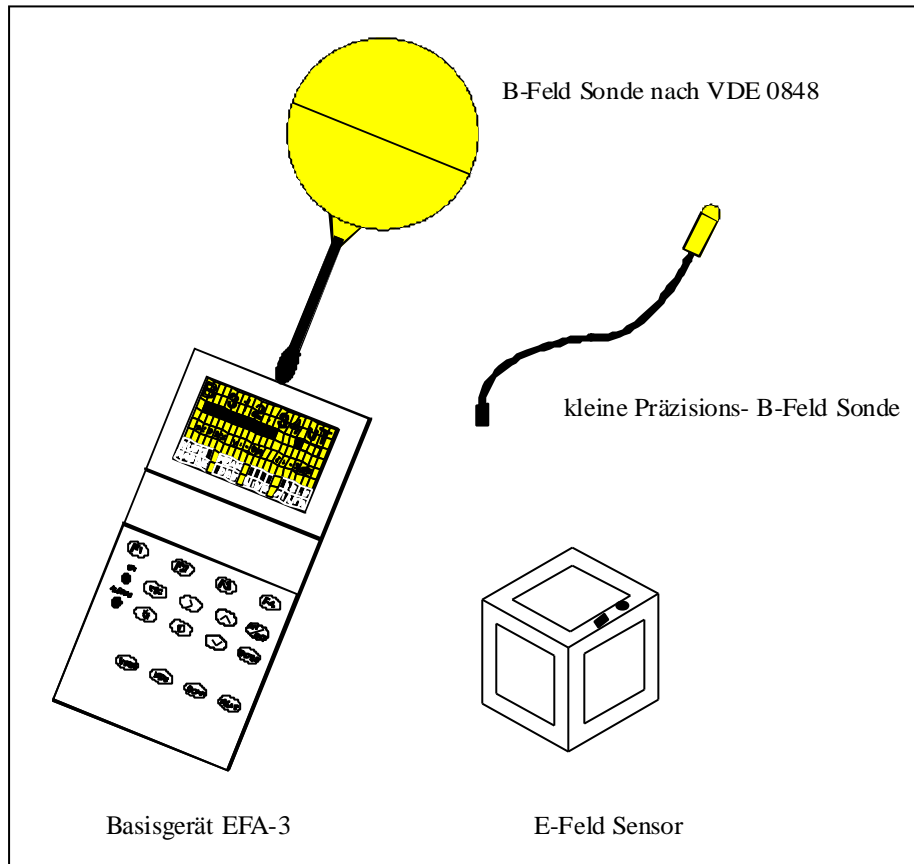
4.2 Gesamtkonzept

Das Gesamtkonzept besteht aus einem Basisgerät, den beiden externen Präzisionsmeßsonden zur Messung der magnetischen Feldstärke und dem beschriebenen dreidimensionalen Sensor zur

Messung der elektrischen

Feldstärke.

Abb. 4.1: Feldstärkemeßgerät mit Zubehör



Die große externe B-Feld Präzisionssonde hat eine wirksame "elektrische" Fläche von 100 cm² (nach VDE 0848) und ist somit für das normengerechte Messen des B-Feldes geeignet. Dagegen besitzt die kleine B-Feld Sonde einen Durchmesser von ca. 3 cm und kann somit für die Ausmessung kleiner lokaler Magnetfelder herangezogen werden.

Das Basisgerät gibt es in drei verschiedenen Ausführungen bzw. Ausbaustufen:

EFA-1, EFA-2 und EFA-3, die alle im gleichen Gehäuse erscheinen. Die Geräte werden über 16 Tasten bedient, die nach folgender Darstellung in Abb. 4.2 angeordnet sind.

Die Anordnung der Tasten ist so gewählt, daß Meßparameter direkt über sog. Softkeys eingestellt werden.

Das Meßergebnis wird sowohl numerisch als auch auf einem Bargraph groß auf einem hinterleuchtbaren LCD-Display dargestellt.

Abb. 4.2: Anordnung der Bedienelemente beim Basisgerät EFA-3

Die Bedienphilosophie, auf die später noch eingegangen wird, sieht eine menügesteuerte Einstellung der Meßparameter vor, die über die o.g. Softkeys geschieht. In der Beschriftung dieser Softkeys im Display wird der gerade aktive Meßparameter ebenfalls angezeigt, sodaß sehr schnell die Randparameter, die zum angezeigten Meßergebnis führen, abgelesen werden können. Alle drei Geräteausführungen sind mit einer internen dreidimensionalen B-Feld Sonde und einer automatischen Sondenkennung für die extern anzuschließenden Sensoren ausgestattet. Über die Sondenkennung wird automatisch der zu der entsprechenden Sonde gehörende Kalibrierdatensatz geladen. Die Geräteausführung EFA-3 besitzt gegenüber den anderen Ausführungen noch eine optische Schnittstelle zum Anschluß der E-Feld Sonde. Die Anzeigeparameter werden entsprechend des zu messenden Feldes automatisch aktualisiert (Anzeige von B- bzw. E-Feld, Einheiten, etc.). Ferner können die Meßdaten über eine optische RS232-Schnittstelle direkt zu einem Drucker bzw. einem Rechner übertragen werden. Die Geräte können wahlweise mit Batterien oder Akkus betrieben werden, wobei die Akkus über eine am Gerät angebrachte Ladebuchse im Gerät geladen werden können.

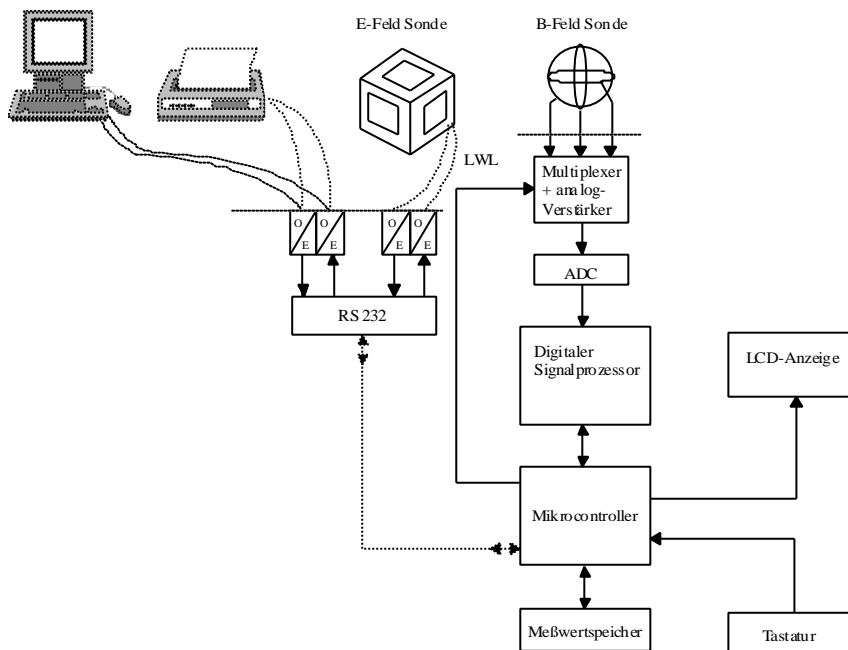


Abb. 4.3: Vereinfachtes Blockschaltbild des Meßkonzepts EFA

4.3 Technische Daten des Basisgerätes

Die Besonderheiten dieser Gerätefamilie kurz zusammengefaßt:

- * Meßbereich B-Feld: 100nT...10mT aufgeteilt in 6 Bereiche
- * Meßgenauigkeit $3\% \pm 1 \text{ nT}$ (mit Präzisionssonde)
- * Frequenzbereich 5 Hz ... 30 kHz
- * Richtungsunabhängige (isotrope) Messung
- * Echte Effektivwert oder Spitzenwert Messung
- * Autoranging (EFA-2 und EFA-3)
- * Spektrale Erfassung der Feld-Komponenten

- * Benutzerdefinierbare Filterfrequenz im Bereich von 15 Hz bis 2kHz (Auflösung: 0,1 Hz)
- * Einstellbare Alarmschwelle
- * Vollautomatische zeitgesteuerte Meßwertaufnahme (EFA-2 und EFA-3)
- * Vordefinierbare Geräteeinstellungen (EFA-2 und EFA-3)
- * Schnittstelle für Druckeranschluß
- * Eingebauter Frequenzzähler (Auflösung 1Hz)
- * Eingebaute B-Feld Sonde

Die Abtastung des Signals von der Sonde erfolgt über einen A/D-Wandler, der die digitalen Daten an einen Signalprozessor liefert. Dieser Signalprozessor bereitet die Daten je nach eingestellter Betriebsart auf und liefert die Ergebnisdaten an einen leistungsfähigen Mikro-controller. Der Controller ist zuständig für die Meßablaufsteuerung, die Bedienung der Tastatur und der Anzeige sowie für die Erkennung und Parametereinstellung der Sonden. Über zwei optische Schnittstellen erfolgt die Anbindung der E-Feld Sonde (EFA-3) und der Anschluß eines Druckers bzw. Rechners. Die Schnittstelle für den Rechneranschluß ist konfigurierbar.

Wie bereits erwähnt, ist die Stärke des Magnetfeldes direkt abhängig von der Stromstärke in dem Leiter, der das Magnetfeld erzeugt. Für eine komfortable Messung des Magnetfeldes über einen längeren Zeitraum wurde in den Geräteversionen EFA-2 und EFA-3 eine voll-automatische zeitgesteuerte Meßwertaufnahme eingebaut, die bei EFA-3 auch für die Messung des elektrischen Feldes zur Verfügung steht. Über die Datenübertragung zu einem Rechner können die über einen Zeitraum von max. 24h aufgenommenen Meßdatensätze komfortabel bearbeitet werden.

4.4 Bedienung und Anwendung der Meßgeräte

Die Bedienung der Meßgeräte wird durch die Menüführung und die übersichtliche Anzeige der Meßparameter vereinfacht. Über die vier abgesetzten Tasten lassen sich sofort aus jeder Geräteeinstellung die folgenden vier Hauptmenüs aufrufen:

Meßmenü:	Anzeige der Meßergebnisse und Einstellung von Meßparametern
Konfigurationsmenü:	Einstellung der Geräteparameter
Speichermenü:	Programmierung der automatischen zeitgesteuerten Meßwertaufnahme
USER-Menü:	Speicherung und Reaktivierung von Geräteeinstellungen

Am Beispiel des Meßmenüs, welches nach dem Einschalten des Gerätes erscheint, sei hier kurz die Bedienphilosophie der Geräte erläutert:

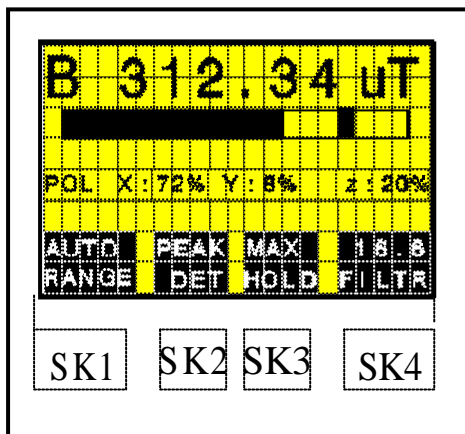


Abb. 4.4: Meßmenü EFA-3

Neben dem Meßwert, der mit doppelter Größe auf dem Display dargestellt wird, erscheint die Anzeige, welche Art von Sonde an das Gerät angeschlossen ist. Ist keine externe Sonde angeschlossen, wird automatisch die interne B-Feld Sonde aktiv. Unterhalb der Meßwertanzeige befindet sich ein Bargraph, der in der Betriebsart "AUTO RANGING" logarithmisch den gesamten Meßbereich des Gerätes anzeigt und in der Betriebsart "MANUAL RANGING" dem eingestellten Meßbereich angepaßt wird. Geht die Akku-Kapazität zu Ende, wird der Bargraph durch die Meldung "LOW BATTERY" ersetzt.

Außer der Anzeige der Ersatzfeldstärke werden zusätzlich noch die Feldkomponenten prozentual dargestellt, sodaß die Feldkomponente der größten aufgetretenen Feldstärke ermittelt werden kann. Am unteren Rand des Displays befindet sich die Beschriftung der schon erwähnten "Softkeys (SK1...SK4)", die sich abhängig von der Parametereinstellung ändert.

Die Bedienung der Parameterauswahl erfolgt generell so, daß mit den UP/DOWN Tasten die gewünschte Einstellung in dem Untermenü selektiert und dann mit der Taste ENTER abgeschlossen wird. Soll die alte Einstellung allerdings erhalten bleiben, kann das Menü über die ESC Taste verlassen werden, ohne das eine Änderung der eingestellten Meßgrößen durchgeführt wurde.

Über SK1 wird der Meßbereich eingestellt.

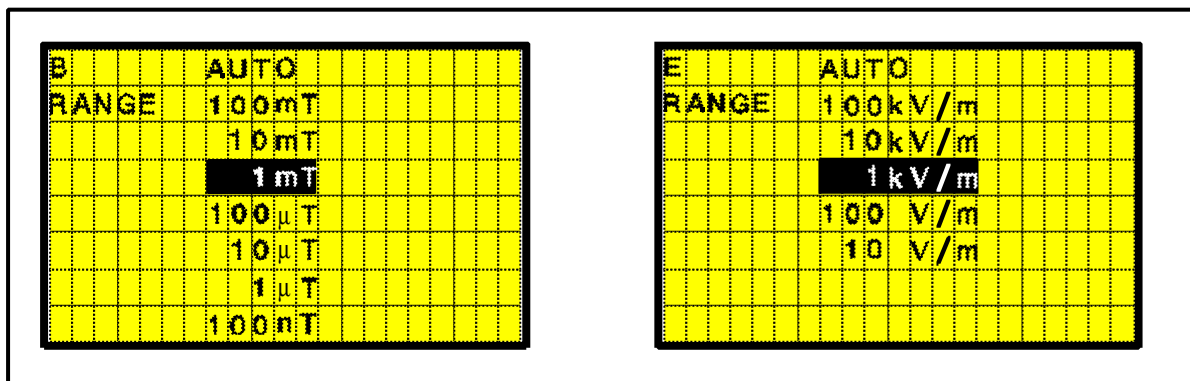


Abb. 4.5: Menü zur Meßbereichseinstellung

Die Tabelle der zur Verfügung stehenden Meßbereiche wird in der Geräteversion EFA-3 automatisch der angeschlossenen Sonde angepaßt. Mit den beiden Cursor-Tasten wird der gewünschte Bereich selektiert und mit der ENTER-Taste als Meßparameter übernommen.

Im Untermenü, welches durch SK2 erreicht wird, läßt sich die Art der Detektion zwischen echter Effektivwert Messung (RMS) und Spitzenwertdetektion (PEAK) umschalten. Ferner besteht hier die Möglichkeit, zwei Dimensionen der B-Feld Sonden abzuschalten, sodaß dadurch die Richtungsbestimmung der maximal auftretenden Feldstärke vereinfacht wird.

Zur komfortablen Bestimmung der maximal aufgetretenen Feldstärke dient weiterhin die Umschaltung der Anzeige auf MAX HOLD, wobei der Bargraph weiterhin die Daten laufend aktualisiert. In der Meßwertanzeige erscheint nun der vom Zeitpunkt der Umschaltung an aufgetretene Maximalwert der gemessenen Feldstärke.

Eine herausragende Neuheit dieser Geräte ist die Möglichkeit, daß das Feld sowohl selektiv als auch breitbandig gemessen werden kann. Dazu stehen folgende Bandgrenzen bzw. Filter-frequenzen zur Verfügung:

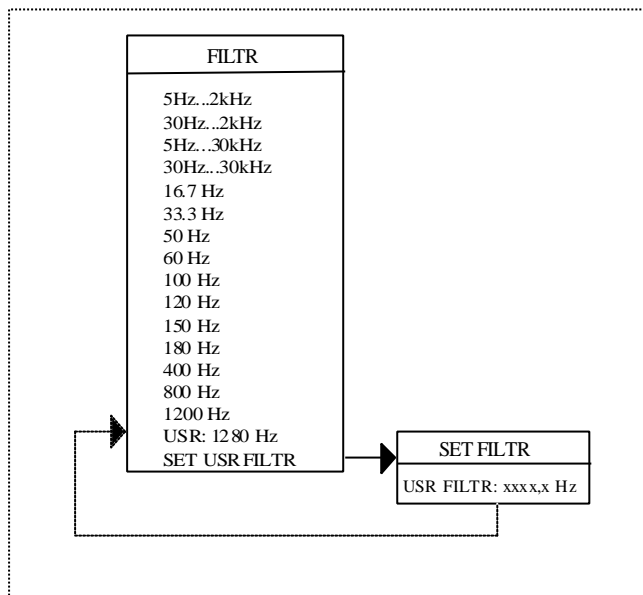


Abb. 4.6: Filterfunktionen im EFA

Für die Unterdrückung des Erdmagnetfeldes, welches sich durch die Bewegung der Meßsonden bemerkbar machen könnte, wurde ein zusätzlicher Hochpaß mit einer Grenzfrequenz von 30Hz eingebaut, der sich natürlich für Messungen z.B. im Bereich der Bundesbahn (16,6Hz) abschalten läßt. Dadurch bietet das Gerät 4 mögliche Frequenzbereiche für die breitbandige Messung der Felder an. Ist einer dieser Frequenzbereiche aktiviert, wird automatisch

der eingebaute Frequenzzähler aktiv, der die Frequenz der maximal auftretenden Feldstärke anzeigt. Dadurch läßt sich schnell der Verursacher der stärksten Felder ermitteln, wenn mehrere Felderzeuger unterschiedlicher Frequenz vorhanden sind.

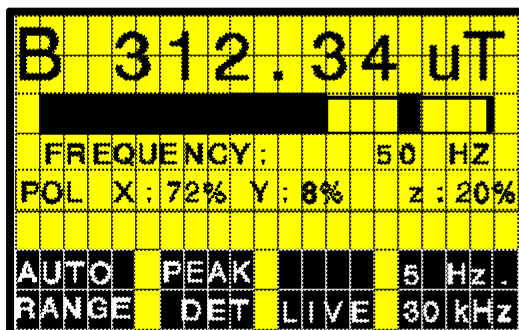


Abb. 4.7: Einblendung der Frequenz des größten auftretenden Pegels bei Breitbandmessung

Um die Feldstärke bei einer definierten Frequenz genauer untersuchen zu können, wurden die in der Tabelle (Abb. 4.6) aufgeführten selektiven Filter in die Geräte implementiert. Die Filterfrequenzen sind so gewählt, daß die gängigen Grundwellen sowie die bis zur jeweiligen 2. Oberwelle gemessen werden können.

Zur selektiven Untersuchung von magnetischen Feldern einer anderen, hier nicht aufgeführten Frequenz steht die Option der im Bereich von 15Hz...2kHz frei definierbaren Filterfrequenz zur Verfügung.

Abschließend zu dieser Thematik sollen hier noch kurz die Parameter zusammenfassend dargestellt werden, die sich in den anderen drei Hauptmenüs einstellen lassen:

Konfigurations - Menü:

* Einstellung der Alarmschwelle

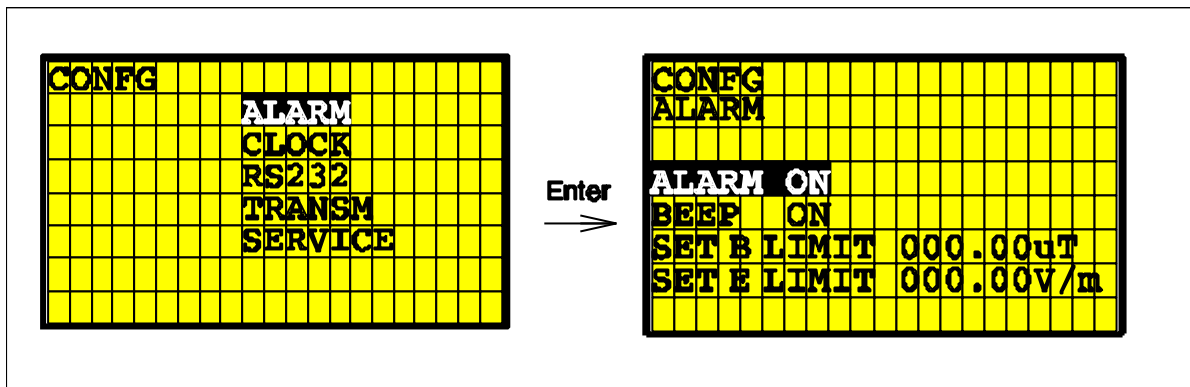


Abb. 4.8: Menü zur Einstellung der Alarmschwelle

Der Einstellbereich der Alarmschwelle umfaßt den gesamten Meßbereich. Der Alarm wird dann ausgelöst, wenn diese Schwelle überschritten wird. Zusätzlich zum optischen Alarm kann auch noch (wahlweise) ein akustisches Signal im Alarmfall aktiviert werden.

Anmerkung: In der Geräteversion EFA-3 wird in Abhängigkeit der angeschlossenen Sonde die entsprechende Alarmschwelle bei eingeschaltetem Alarm aktiv.

- * Einstellung der eingebauten Uhr (Clock)
- * Konfiguration der optischen RS232 Schnittstelle (RS232)
- * Konfiguration der (Meßwert-) Übertragungsrates (an den Drucker) (TRANS)
- * Umschaltung der Meßwert-Einheit TESLA - GAUß (SERVICE)

Speicher - Menü:

Im sog. MEM-MENÜ wird die automatische Meßwertaufzeichnung programmiert. Es können bis max. 2000 Meßdatensätze abgespeichert werden, wobei sich aus einem Meßdatensatz die zu dem Meßwert gehörende Geräteeinstellung reproduzieren läßt:

- * Eingabe der Uhrzeit "Start Meßwertaufzeichnung"
- * Eingabe der Uhrzeit "Stop Meßwertaufzeichnung"
- * Eingabe der Schrittweite zweier aufeinanderfolgender Meßwerte
- * Show-Funktion zum Anzeigen der gespeicherten Werte
- * Print-Funktion zum Ausdrucken des Speichers
- * Clear-Funktion zum Löschen des gesamten Speichers bzw. einzelner Zellen

USER - Menü:

- * Aufruf zur Standard-Einstellung des Gerätes
- * Funktion zur Speicherung von Geräteeinstellungen
- * Funktion zum Auslesen einer vorher gespeicherten Geräteeinstellung

Es können bis zu vier frei definierbare Geräteeinstellungen gespeichert werden.

4.5 Kalibrierung der Meßgeräte

Ein wichtiges Kriterium für die Reproduzierbarkeit von Meßergebnissen und der normengerechte Nachweis von Feldstärken ist die Kalibrierung der Geräte. In den Geräten der EFA-Serie wird für jeden verwendeten Sensor ein Korrekturdatensatz abgelegt, der in Abhängigkeit des angeschlossenen Sensors in die Berechnungen mit einbezogen wird. Dieser Korrekturdatensatz beinhaltet Daten über die Frequenzgang- und Pegelkorrektur der Sonden. Dabei werden die Meßdaten der Sonden in den drei Dimensionen getrennt aufgenommen und gespeichert. Im Fertigungsablauf integriert ist die Messung der Isotropie der eingebauten Sonde, sodaß die angegebenen Kenndaten garantiert werden können.

Um eine Paarung von Gerät und externer Sonde zu vermeiden, wird der Korrekturdatensatz direkt in der (externen) Sonde gespeichert.

Kalibriert werden die Magnetfeld-Sonden in einem "Norm-Magnetfeld", welches über einen Helmholtzrahmen erzeugt wird. Über ein von der PTB (Physikalisch Technischen Bundesanstalt) kalibriertes Vergleichsnormale kann die notwendige Präzision der Felderzeugung laufend kontrolliert und nachgemessen werden.

Die Kalibrierung des Sensors für die Messung des elektrischen Feldes wird ähnlich wie die des B-Feld Sensors in einem "Norm-Feld" durchgeführt, welches prinzipiell aus einer Plattenkonstruktion besteht und wieder auf ein "Feldnormal" der PTB zurückzuführen ist.

5 Meßgeräteversionen EFA-1, EFA-2 und EFA-3

Alle Geräteversionen besitzen die gleiche Meßgenauigkeit sowie die gleichen Sonden zur Messung von niederfrequenten magnetischen Feldern. Die Basisgeräte EFA-2 und EFA-3 sind bis auf die Anschlußmöglichkeit des Sensors zur Messung der elektrischen Feldstärke (EFA-3) gleich, und besitzen die oben beschriebenen Eigenschaften.

In der Low-Cost Version EFA-1 stehen neben der automatischen Meßbereichswahl auch die zeitgesteuerte Meßwertaufnahme und die Speicherung der Gerätekonfiguration nicht zur Verfügung.

6 Literaturanhang

- [1] Elektrische und magnetische Felder
Strom im Alltag
IZE Informationszentrale der Elektrizitätswirtschaft E.V.
Frankfurt
- [2] Dissertation Dipl. Ing. Georg Bahmeier
VDI Verlag

Reihe 8, Nr. 438
ISBN 3-18-343808-9