

## **Messung niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder im Bereich von Hochspannungsanlagen**

W. Köhler, Universität Stuttgart

### **1. Einführung**

Netzfrequente elektrische und magnetische Felder entstehen zwangsweise, sobald elektrische Leiter bzw. Apparate an Spannung liegen bzw. entsprechende Strombelastungen aufweisen.

Feldsensoren zur Messung elektrischer und magnetischer Felder können für eine Reihe unterschiedlicher Anwendungen eingesetzt werden:

- Kontrolle der Dimensionierung von hochspannungstechnischen Geräten und Konstruktionen (z. B. Abschirmelektroden)
- Messung der auftretenden Felder während des Betriebes von Geräten und Anlagen
- Kontrolle von Grenzwerten für das elektrische und magnetische Feld im Rahmen des Personenschutzes /1/
- Indirekte Spannungs- und Strommessung durch eine entsprechende Kalibrierung der Feldsensoren (z. B. rückwirkungsfreie Messung der Spannung an Zwischenflanschen von Geräten, Kontrolle der Spannungs-verteilung)

Beim Bau von hochspannungstechnischen Apparaten steht in der Regel die Reduktion der elektrischen Feldstärke durch eine entsprechende Formgebung und Materialauswahl im Vordergrund. Eine Berechnung des elektrischen und magnetischen Feldes ist dabei meist möglich. Eine Überprüfung der Feldverteilung durch den Einsatz von Feldsonden kann jedoch von Nutzen sein, da bei der Berechnung immer eine Reihe vereinfachender Annahmen getroffen wird, deren Einfluß auf die Genauigkeit nicht immer einfach abschätzbar ist. Dabei kann entweder an speziellen Punkten die Feldstärke gemessen werden oder es wird an Elektroden (z.B. an Zwischenflanschen) durch eine spezielle Spannungskalibrierung die Spannung gemessen.

Eine praktisch rückwirkungsfreie Spannungs- und Strommessung ist mit Feldsensoren ebenfalls möglich. Zur Spannungsmessung wird der Feldsensor möglichst nahe an den Punkt gebracht, dessen Spannung gemessen werden soll (z. B. Elektrode oder Flansch). Dadurch wird erreicht, daß das elektrische Potential dieser Elektrode den wesentlichen Beitrag zum elektrischen Feld am Sensorort liefert (selektive Messung). Durch Anlegen einer bekannten Spannung kann der elektrische Feldsensor auf diesen Spannungswert kalibriert werden. Falls nachfolgend die Anordnung des Sensors und seine Umgebung gleich bleiben, ist dieser Kalibrierfaktor konstant und es kann so eine Spannungsmessung durchgeführt werden. Auf

prinzipiell dieselbe Art und Weise kann mit magnetischen Feldsensoren eine indirekte Strommessung durchgeführt werden.

Netzfrequente elektrische und magnetische Felder und deren Auswirkungen auf biologische Systeme werden seit einigen Jahren verstärkt diskutiert. Oft werden die in den Vorschriften /1/ definierten Grenzwerte als zu hoch betrachtet. Der Bereich der dabei interessierenden Feldstärken umfaßt mehrere Größenordnungen. So werden beispielsweise niederfrequente magnetische Felder bis zu Werten von wenigen 10 nT noch für als wichtig betrachtet, während in den derzeit gültigen Vorschriften /1/ Grenzwerte von mehreren mT enthalten sind. Durch den Einsatz ausreichend empfindlicher Feldsensoren können die im Einzelfall auftretenden elektrischen und magnetischen Felder gemessen werden. Dabei ist es besonders vorteilhaft, wenn die Messung über einen längeren Zeitraum automatisiert ablaufen kann, da die im Einzelfall auftretenden Felder u.U. in ihrer Amplitude und auch zeitlich sehr stark variieren.

Falls die räumliche Lage der felderzeugenden Quellen unbekannt ist, oder falls eine Vielzahl unterschiedlicher Quellen mit zeitlich verschiedenen Aktivitäten vorhanden ist, sollten dreidimensionale Feldsonden verwendet werden. Anderenfalls besteht eine u.U. recht große Unsicherheit darüber, ob auch wirklich die tatsächlich auftretenden Maximalwerte der betreffenden Felder gemessen wurden.

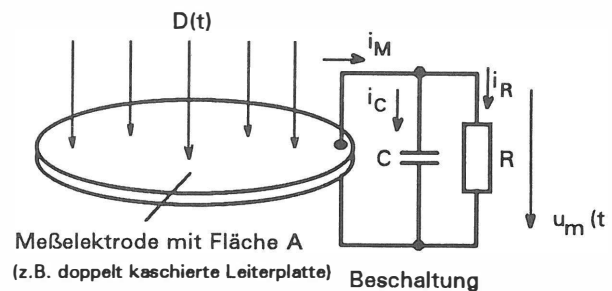
Die Messung elektrischer und magnetischer Felder erfolgt mit speziellen Feldsonden, welche durch ihre Form das zu messende Feld möglichst wenig beeinflussen sollten. Der Aufbau und die Wirkungsweise dieser Feldsensoren wird im folgenden beschrieben und anhand einiger ausgewählter Anwendungsbeispiele erläutert.

## 2. Messung niederfrequenter elektrischer Felder

### 2.1 Aufbau und Eigenschaften elektrischer Feldsensoren

Zur Messung niederfrequenter elektrischer Felder werden meist kapazitive Feldsensoren verwendet. Andere Verfahren, wie beispielsweise Meßverfahren mit Pockelszellen, werden hier nicht betrachtet. Bild 1 zeigt das Prinzip eines solchen Feldsensors:

$D(t)$ : zu messendes elektrisches Feld  
 $i(t)$ : Strom in die Beschaltung  
 $u_M(t)$ : Meßspannung  
 $i_C(t)$ : kapazitiver Stromanteil  
 $i_R(t)$ : resistiver Stromanteil



**Bild 1:** Prinzipieller Aufbau eines kapazitiven elektrischen Feldsensors

Auf die dem zu messenden Feld ausgesetzte Meßelektrode wird durch die zeitliche Änderung der elektrischen Verschiebungsdichte  $D$  der Meßstrom  $i_M$  eingepreßt:

$$i_M = A \cdot \frac{dD}{dt}$$

Die Meßelektrode ist üblicherweise mit einer RC-Kombination beschaltet. Die Kapazität und der Ableitwiderstand des Sensors selbst sind hierin enthalten.

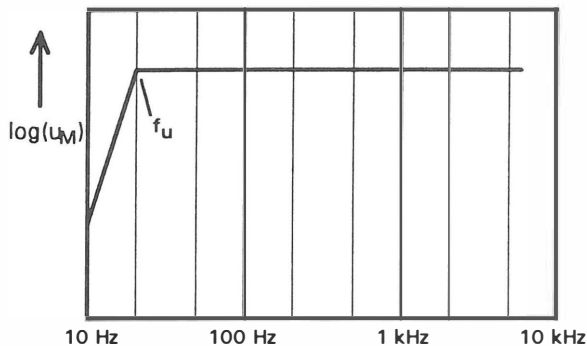
Prinzipiell gibt es 2 unterschiedliche Arten der Beschaltung (vgl. Bild 2).

Wird der Sensor hochohmig beschaltet ( $i_C \gg i_R$ ), so weist der Sensor integrierendes Verhalten auf, d.h. der eingepreßte Meßstrom  $i_M$  wird durch die Beschaltungskapazität integriert und das Meßsignal  $u_M$  ist direkt proportional zum zu messenden elektrischen Feld  $E(t)$  bzw.  $D(t)$ . Der integrierende kapazitive elektrische Feldsensor hat eine untere Grenzfrequenz  $f_U$ . Nur oberhalb dieser Frequenz liegt das gewünschte integrierende Verhalten vor, bei tieferen Frequenzen tritt differentiell Verhalten auf. Diese untere Grenzfrequenz sollte deutlich kleiner sein als die kleinste, noch zu messende Signalfrequenz.

Ist der Sensor dagegen niederohmig beschaltet ( $i_C \ll i_R$ ), so hat der Feldsensor differentiell Verhalten, d.h. der eingepreßte Meßstrom  $i_M$  fließt im wesentlichen durch den Widerstand  $R$  der Beschaltung. Das Meßsignal  $u_M$  ist dann direkt proportional zum Meßstrom  $i_M$  bzw. zur zeitlichen Ableitung des äußeren elektrischen Feldes. Bei sehr hohen Frequenzen erfolgt der Übergang vom differenzierenden zum integrierenden Verhalten des Sensors, d.h. der differenzierende elektrische Feldsensor hat eine obere Grenzfrequenz  $f_O$ . Um die gewünschte Feldgröße  $E(t)$  bzw.  $D(t)$  zu erhalten, muß das Meßsignal  $u_M$  noch integriert werden. Dies kann entweder durch einen entsprechenden Hardware-Integrierer oder numerisch mit einem Rechner erfolgen, falls digital abtastende Meßgeräte eingesetzt werden. Differenzierende elektrische Feldsensoren werden in der Regel bei der Messung

hochfrequenter Felder eingesetzt. Der ohmsche Widerstand der Beschaltung ist dann gleich dem Wellenwiderstand der verwendeten Meßkabel.

Bei der Messung niederfrequenter elektrischer Felder wird üblicherweise der hochohmig beschaltete kapazitive Feldsensor verwendet.



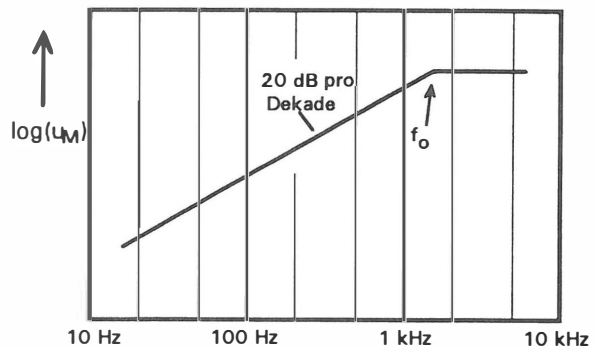
integrierender kapazitiver Feldsensor

untere Grenzfrequenz:  $f_u = \frac{1}{2\pi RC}$

Frequenzbereich:  $f > f_u$

Ausgangsspannung:  $u_M(t) = K \cdot D(t)$

Widerstand R möglichst groß, damit  $f_u$  klein



differentieller kapazitiver Feldsensor

obere Grenzfrequenz:  $f_o = \frac{1}{2\pi RC}$

Frequenzbereich:  $f < f_o$

Ausgangsspannung:  $u_M(t) = K \cdot \frac{dD(t)}{dt}$

Kapazität C möglichst klein, damit  $f_o$  groß

**Bild 2: Prinzipielle Übertragungseigenschaften kapazitiver elektrischer Feldsensoren**

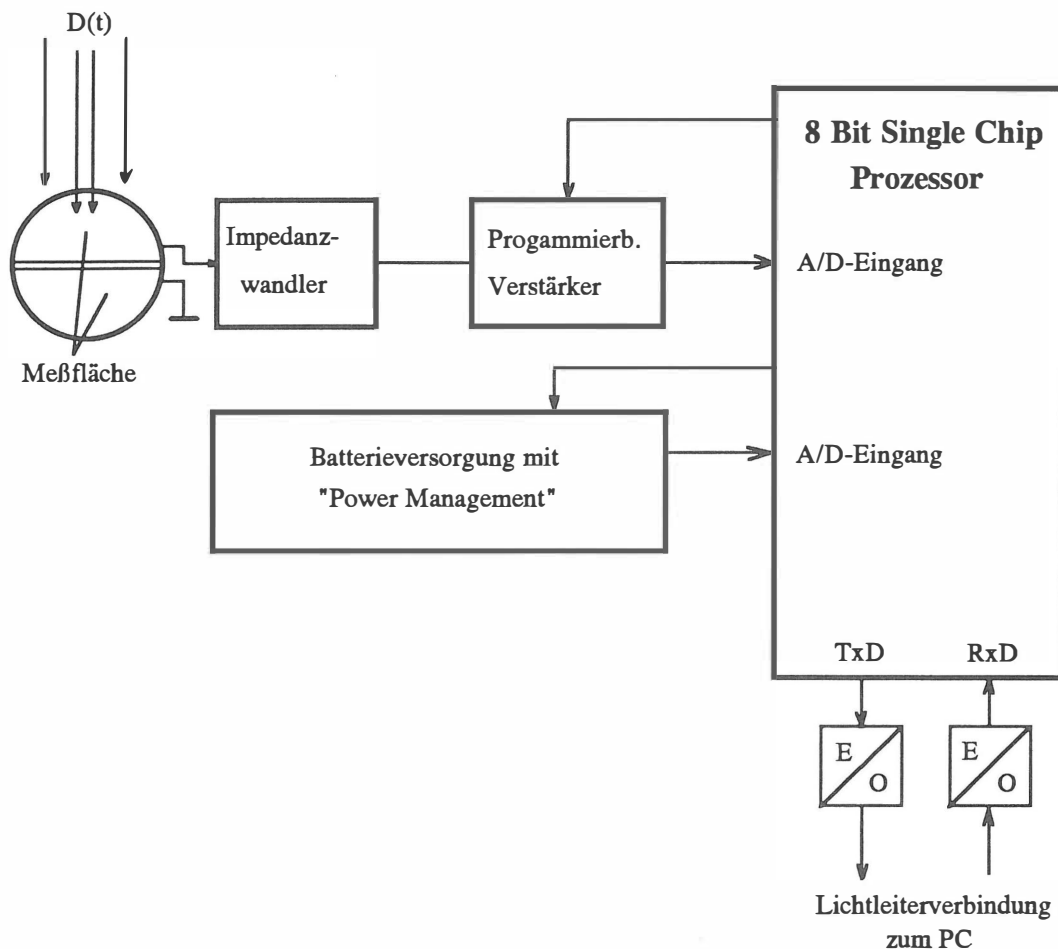
Es gibt eine Vielzahl von Ausführungsformen elektrischer Feldsensoren, welche hier nicht alle behandelt werden können.

Die prinzipiellen Anforderungen an Feldsensoren zur Messung niederfrequenter elektrischer Felder sind die folgenden:

- Frequenzbereich von wenigen Hz bis zu einigen kHz
- Empfindlichkeit von einigen V/m bis zu einigen 100 kV/m
- potentialfreie Meßwertübertragung über Lichtwellenleiter
- möglichst geringe Rückwirkung des Feldsensors (kleine Abmessungen)
- Batterieversorgung mit langer Betriebsdauer
- Bedienungskomfort

Sowohl eindimensionale als auch zwei- und dreidimensionale elektrische Feldsensoren sind gebräuchlich. Die äußere Form der Feldsensoren ist oft unterschiedlich. Die Kugelform bewirkt die kleinste Feldüberhöhung auf der Sensorfläche und ist damit auch zur Messung

sehr hoher elektrischer Feldstärken geeignet. Es sind aber auch andere Sensorgehäuseformen üblich (Würfelform, Zylinderform). Durch den Einsatz moderner Mikroelektronik mit extrem geringer Stromaufnahme wird teilweise auch ein hohes Maß an Bedienungskomfort erreicht. So gibt es beispielsweise Feldsonden, welche durch im Sensor integrierte Single-Chip-Prozessoren mit A/D-Umsetzern den zeitlichen Verlauf des elektrischen Feldes aufzeichnen, lokal zwischenspeichern und anschließend die Meßsignale digital über Lichtwellenleiter und Standardschnittstellen zu einem Note Book PC übertragen. Der Sensor ist komplett vom PC aus fernbedienbar (Empfindlichkeit, Speichertiefe, Abtastrate). Dadurch sind vollkommen automatisierte Meßabläufe möglich (z.B. Langzeitmessungen über mehrere Tage). Die aufgezeichneten Feldverläufe können gespeichert sowie beliebig ausgewertet und weiterverarbeitet werden (FFT, ...). Bild 3 zeigt das Prinzipschaltbild eines solchen Feldsensors.



**Bild 3:** Prinzipieller Aufbau eines elektrischen Feldsensors mit Lichtleiter-PC-Interface

Im Gegensatz zu elektrischen Feldsensoren, welche lediglich einen Meßwert (Mittelwert, Scheitelwert oder Effektivwert?) analog oder numerisch anzeigen und u.U. noch mangels einer potentialfreien Meßwertübertragung per Feldstecher abgelesen werden müssen, ist damit ein hohes Niveau am Meßkomfort erreicht.

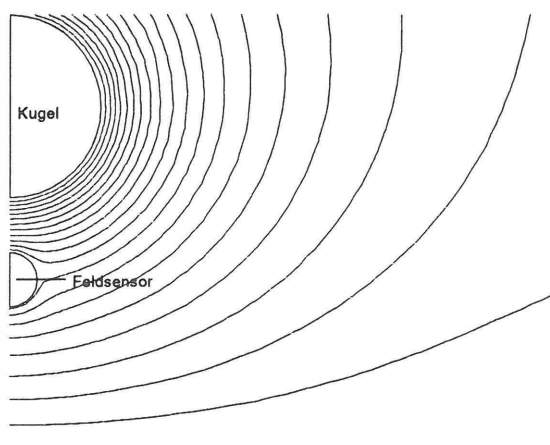
## 2.2 Rückwirkung des elektrischen Feldsensors auf das zu messende Feld

Prinzipiell hat jeder Körper im elektrischen Feld eine Verzerrung des ungestörten elektrischen Feldes zur Folge. Es ist also immer eine mehr oder weniger starke Rückwirkung des Feldsensors auf das zu messende Feld vorhanden. Diese ist direkt am Sensor in der Regel am größten. Falls der Feldsensor jedoch klein gegenüber der untersuchten Elektrodenanordnung ist, bleibt die "globale" Rückwirkung des Feldsensors genügend klein. Auf der Sensoroberfläche besteht zudem noch die Gefahr, daß dort die elektrische Feldstärke so groß wird, daß elektrische Entladungen einsetzen. Es ist daher besonders wichtig, für den Feldsensor eine Form zu wählen, bei der die Feldüberhöhung auf der Sensoroberfläche möglichst klein bleibt. Das Optimum liegt dabei in der Kugelform. Dennoch tritt dabei schon eine um den Faktor 3 größere Feldstärke gegenüber dem ungestörten Feld auf. Legt man eine Entladungseinsatzfeldstärke von 30 kV/cm in Luft zugrunde, so kann man also mit einem kugelförmigen Feldsensor maximal Feldstärken bis zu etwa 10 kV/cm messen.

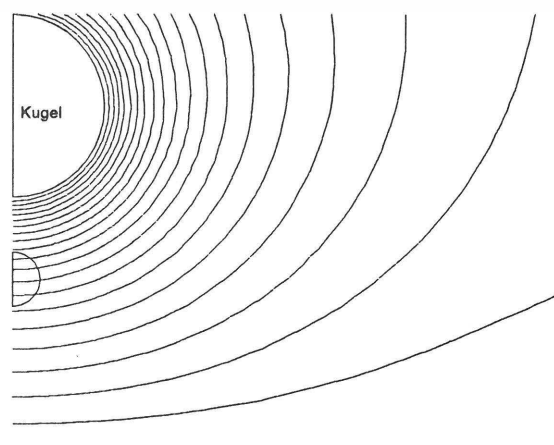
Bild 4 soll diesen Sachverhalt verdeutlichen. Es wurde der Einfluß eines kugelförmigen Feldsensors auf das elektrische Feld einer Kugel-Platte-Anordnung untersucht. Links ist das elektrische Feld der Anordnung mit dem kugelförmigen Feldsensor dargestellt.

Obwohl ein sehr deutlicher Einfluß des Feldsensors auf den Verlauf der berechneten Äquipotentiallinien festzustellen ist, ergibt sich nur eine recht geringe Erhöhung der elektrischen Feldstärke auf der Kugeloberfläche um etwa 2 %. Ähnlich gering ist die Änderung der elektrischen Feldstärke auf der Erdelektrode. Die wesentliche Feldverzerrung tritt im Bereich des kugelförmigen Feldsensors auf. Es ergeben sich Erhöhungen der elektrischen Feldstärke gegenüber dem ungestörten Feld um etwa den Faktor 3.

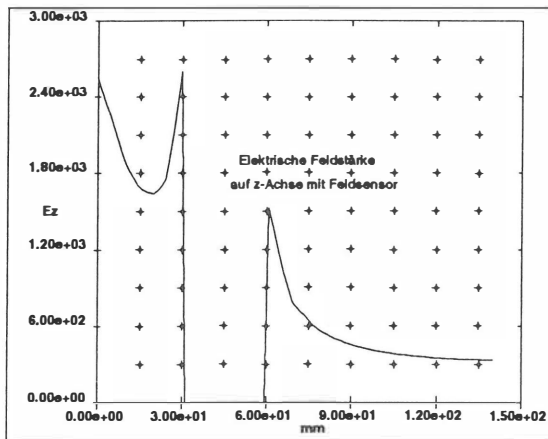
Bei noch geringeren Abständen des Feldsensors zur Kugelelektrode ergeben sich sowohl auf der Kugel- als auch auf der Sensoroberfläche deutlich höhere elektrische Feldstärken als im ungestörten Feld [3]. Die von den Sensoren gemessene Feldstärke entspricht aber trotz der starken Feldverzerrung im Bereich des Sensors noch recht genau dem Feldstärkewert am Sensorort im ungestörten Feld [3].



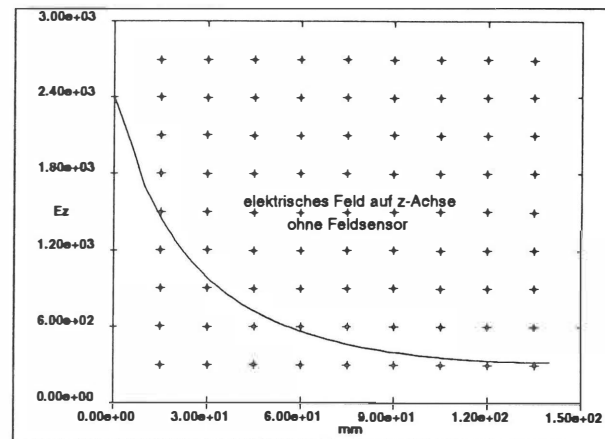
Berechnete Äquipotentiallinien der Elektrodenanordnung mit Feldsensor



Berechnete Äquipotentiallinien der Elektrodenanordnung ohne Feldsensor



Berechnete elektrische Feldstärke  
auf der z-Achse



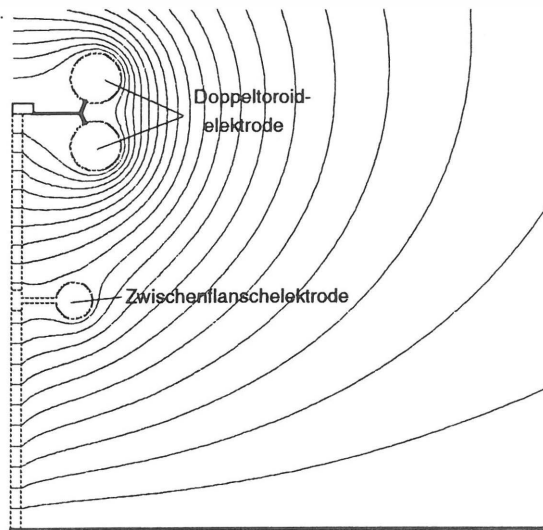
Berechnete elektrische Feldstärke  
auf der z-Achse

Bild 4: Einfluß eines kugelförmigen Feldsensors auf das elektrische Feld einer Kugel-Platte-Anordnung

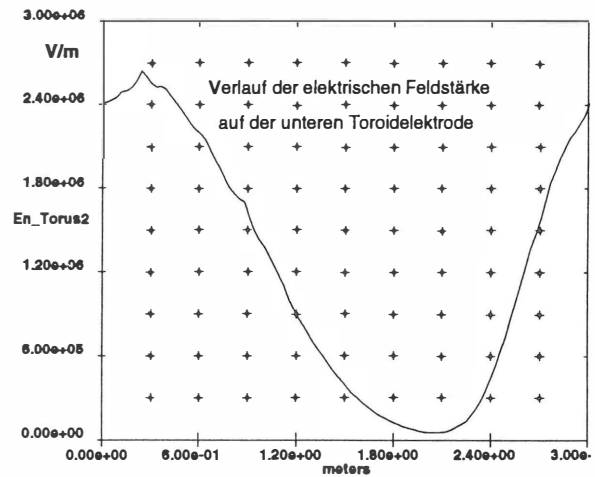
## 2.3 Anwendungsbeispiele elektrischer Feldsensoren

Im folgenden wird die Anwendung elektrischer Feldsensoren anhand einiger Beispiele erläutert.

Das erste Beispiel soll den Einsatz von elektrischen Feldsensoren zur Überprüfung der Dimensionierung von Elektroden aufzeigen. Üblicherweise werden Abschirmelektroden durch eine numerische Feldberechnung dimensioniert. Abhängig von der Art der Spannungsbeanspruchung werden dabei bestimmte Grenzwerte angesetzt. Da bei der numerischen Feldberechnung meist gewisse Unsicherheitsfaktoren vorhanden sind bzw. Vereinfachungen getroffen wurden, ist es oft wünschenswert, die Dimensionierung der ausgeführten Elektroden im realen Aufbau durch eine Feldmessung zu kontrollieren. Aufgrund der Linearität bezüglich der Spannung ist es ausreichend, wenn diese Messung bei relativ kleiner Spannung durchgeführt wird. Dadurch werden elektrische Entladungen aufgrund hoher Feldstärken am Feldsensor vermieden. Die verwendeten Sonden sollten dabei klein gegenüber den Abschirmelektroden sein. Die geringste Feldverzerrung haben kugelförmige Feldsensoren (vgl. Abschnitt 2.2). Es ist auf jeden Fall ein potentialfreier elektrischer Feldsensor einsetzbar. Bild 5 zeigt das berechnete elektrische Feld eines Spannungsteilers mit Kopfelektrode und mit Zwischenflanschelektrode sowie die elektrische Feldstärke auf der unteren Toriodelektrode am Teilerkopf.



Berechnete Äquipotentiallinien eines Spannungsteilers



Verlauf der elektrischen Feldstärke auf der unteren Toroidelektrode am Kopf des Teilers

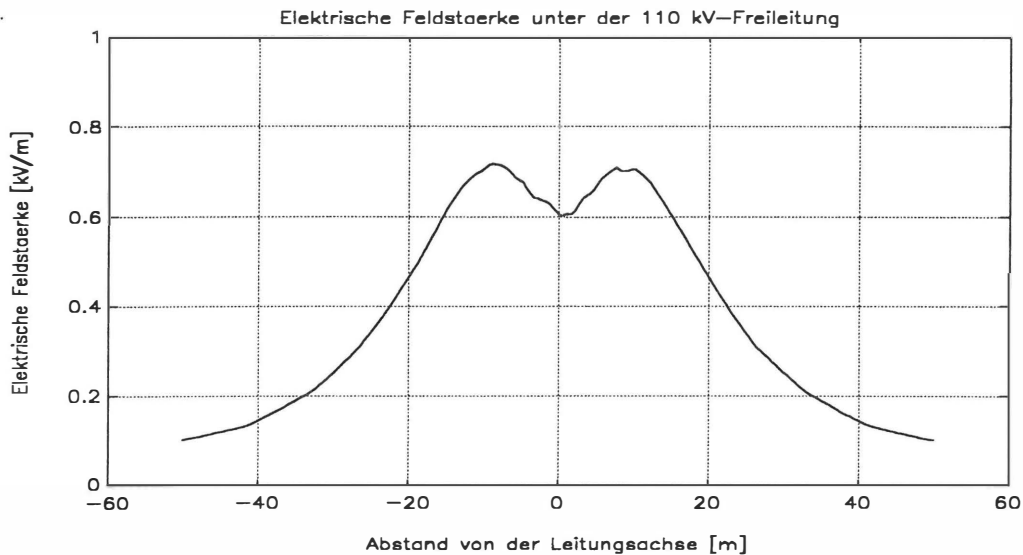
**Bild 5: Einsatz elektrischer Feldsensoren zur Kontrolle der Dimensionierung von Spannungsteilerelektroden**

Eine Überprüfung der Elektrodendimensionierung ist so auf relativ einfache Art und Weise möglich. Falls die Abmessungen der verwendeten Feldsensoren genügend klein sind, kann die elektrische Feldstärke auch im interessantesten Bereich nahe an den Abschirmelektroden ohne wesentliche Einflüsse des Sensors genau gemessen werden. Der Einfluß von bei der Berechnung gemachten Vereinfachungen (2D-Feldberechnung mit Annahme der Rotationssymmetrie, Einfluß der Umgebung und Zuleitung) kann dadurch ermittelt werden.

Ein anderes Beispiel für den praktischen Einsatz elektrischer Feldsonden zeigt Bild 6. Es wurde die im Bereich einer 110 kV-Freileitungstrasse am Erdboden gemessene elektrische Feldstärke aufgetragen. Eine Berechnung des elektrischen Feldes einer Hochspannungsfreileitung ist relativ aufwendig, vor allem dann, wenn der Einfluß der Umgebung berücksichtigt werden soll (Gelände, Bebauung, Einfluß von Bepflanzungen und benachbarten Masten).

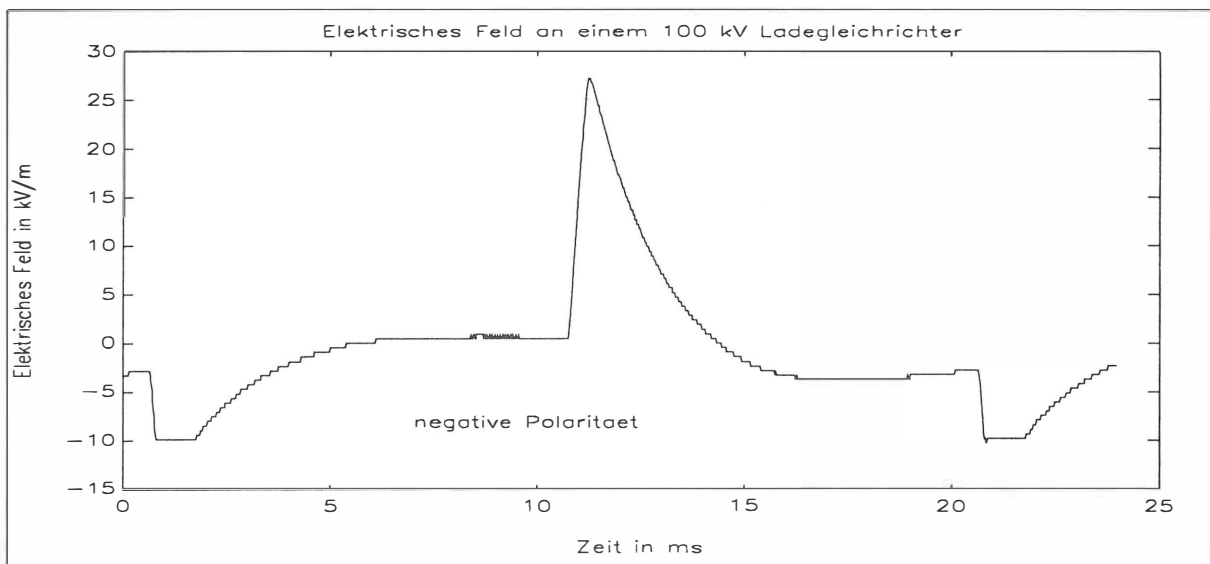
Dabei ist besonders von Interesse, ob die entsprechenden Grenzwerte oder empfohlenen, reduzierten Grenzwerte (z. B. für Neubaugebiete 5 kV/m und 100  $\mu$ T nach IRPA) eingehalten werden.





**Bild 6:** Gemessene elektrische Feldstärke im Bereich einer 110 kV Freileitung (Doppelleitung, 18 m Seilhöhe der unteren Leiterseile)

Bild 7 zeigt die am Wechselspannungsausgang eines Einweg-Ladegleichrichters für einen Stoßgenerator gemessene Feldstärke.



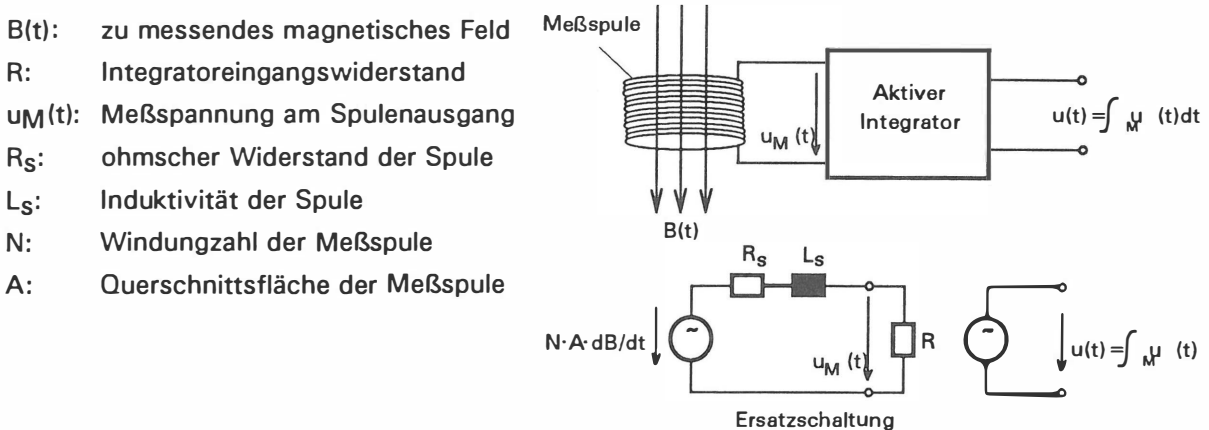
**Bild 7:** Feldstärke bzw. Spannungsverlauf zwischen Hochspannungstransformator und Gleichrichterdiode eines 100 kV Ladegleichrichters für einen 800 kV Stoßgenerator

Es ist deutlich zu erkennen, daß die Spannung in der negativen Halbwelle durch die Stoßkapazität begrenzt wird, während in der positiven Halbwelle der Hochspannungstransformator nicht durch den Stoßgenerator belastet wird. Der Zündwinkel des Thyristorstellers kann ebenfalls abgeschätzt werden.

### 3. Messung niederfrequenter magnetischer Felder

#### 3.1 Aufbau und Eigenschaften magnetischer Feldsensoren

Zur Messung niederfrequenter magnetischer Felder werden meist induktive Feldsensoren verwendet. Um bei niedrigen Frequenzen noch ein ausreichend großes Signal zu erhalten, werden konzentrierte Meßspulen mit entsprechend hohen Windungszahlen verwendet. Andere Verfahren, wie beispielsweise Hall-Sensoren oder elektro-optische Sensoren, haben in der Regel zu geringe Empfindlichkeiten und werden daher hier nicht betrachtet. Bild 8 zeigt das Prinzip eines solchen induktiven magnetischen Feldsensors:



**Bild 8:** Prinzipieller Aufbau eines induktiven elektrischen Feldsensors

Üblicherweise ist der Eingangswiderstand des Integrators deutlich größer als der ohmsche Widerstand der Meßspule, und bei den betrachteten kleinen Frequenzen ist die Grenzfrequenz des Meßspulenkreises sehr viel größer als die zu messenden Signalfrequenzen. Die Spannung  $u_M$  an der Meßspule ist dann ungefähr

$$u_M(t) = \frac{R}{R_S} \cdot N \cdot A \cdot \frac{dB}{dt}$$

Am Ausgang des aktiven Integrators steht dann ein Signal  $u(t)$  zur Verfügung, welches direkt proportional zur zu messenden magnetischen Induktion bzw. zum magnetischen Feld  $H(t)$  ist.

Aktive Integratoren haben gegenüber passiven Integratoren den Vorteil, daß mit derselben Meßspule sehr viel größere Ausgangsspannungen erreichbar sind. Bei einer magnetischen Induktion von 100 nT und einer Frequenz von 50 Hz beträgt die in einer Windung einer Spule (Durchmesser 10 cm) induzierte Spannung ca. 2,5  $\mu$ V. Unter Verwendung eines passiven Integrators (RC-Glied) beträgt die Ausgangsspannung nur noch ca. 0,25  $\mu$ V/Windung, so daß bei einer Meßspule mit 10000 Windungen nur eine Ausgangsspannung von 2,5 mV erreicht wird. Außerdem wird der ohmsche Widerstand und die Induktivität dieser Spulen sehr groß. Dies begrenzt die Bandbreite der Messung, da dann auch eine relativ große Wicklungskapazität wirksam ist.

Auch bei magnetischen Feldsensoren gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Ausführungsformen. Mit einem RC-Integrator beschaltete Meßspulen sind die einfachsten magnetischen Feldsonden. Es sind aber auch magnetische Feldsonden mit Mikroprozessorsteuerung und PC Interface erhältlich. Damit können die Meßabläufe automatisiert werden.

Die prinzipiellen Anforderungen an magnetische Feldsensoren zur Messung niederfrequenter Magnetfelder sind die folgenden:

- Frequenzbereich von wenigen Hz bis zu einigen kHz
- Empfindlichkeit von einigen nT bis zu einigen 1000  $\mu$ T
- evtl. potentialfreie Meßwertübertragung über Lichtwellenleiter
- möglichst geringe Rückwirkung des Feldsensors (kleine Abmessungen)
- Batterieversorgung mit langer Betriebsdauer
- Bedienungskomfort.

Eine potentialfreie Meßwertübertragung ist oft nicht erforderlich, da Messungen auf elektrischem Potential weniger oft durchgeführt werden müssen als Messungen auf Erdpotential.

Sowohl eindimensionale als auch zwei- und dreidimensionale magnetische Feldsensoren sind gebräuchlich. Die äußere Form der Feldsensoren ist dabei oft unterschiedlich.

Die Kugelform bewirkt die kleinste elektrische Feldüberhöhung auf der Sensorfläche und ist damit auch zur Messung magnetischer Felder im Bereich sehr hoher elektrischer Feldstärken geeignet. Es sind aber auch andere Sensorgehäuseformen üblich (z.B. zylinderförmige Meßspule).

### **3.2 Rückwirkung magnetischer Feldsensoren auf das zu messende Feld**

Wie bei elektrischen Feldsonden tritt auch bei magnetischen Feldsonden eine Rückwirkung des Feldsensors auf das zu messende Feld auf. Hat beispielsweise eine Feldsonde zur Messung magnetischer Felder elektrisch leitende Gehäuseteile, so treten in diesen Teilen in einem zeitlich sich ändernden Magnetfeld Wirbelströme auf. Diese Wirbelströme verursachen selbst ein magnetisches Feld, welches sich dem zu messenden Feld überlagert und damit dieses im Bereich des Feldsensors verändert.

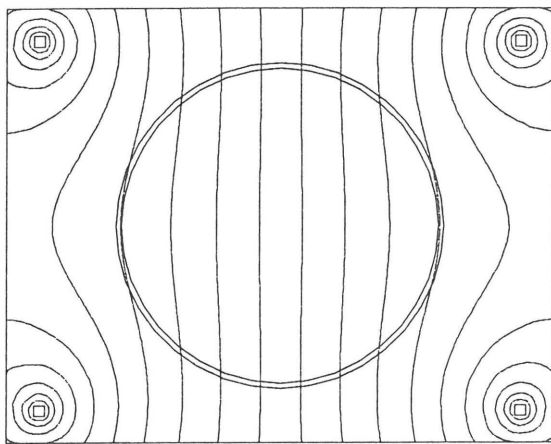
Als einfaches Beispiel sei eine magnetische Feldsonde in Form einer metallischen Kugel aus Kupfer betrachtet (Außendurchmesser 60 mm, Wandstärke 1 mm). Die Meßspule zur Messung des magnetischen Feldes befindet sich im Innern dieser Kugel. Bringt man diese magnetische Feldsonde in ein magnetisches Wechselfeld, so entstehen auf der Kugeloberfläche Wirbelströme, die mit zunehmender Frequenz des äußeren Magnetfeldes größer werden. Das äußere Magnetfeld wird durch ein Spulenpaar mit konstanter Stromstärke erzeugt (z.B. Helmholtzspule). Bild 9 zeigt den bei unterschiedlichen Frequenzen auftretenden Verlauf der magnetischen Feldlinien und den Verlauf der senkrechten magnetischen Feldstärkekomponente im Innern der Kugel.

Bei einer Frequenz von 10 Hz sind die auf der Kupferkugel auftretenden Wirbelströme noch sehr klein, so daß durch sie keine Rückwirkung auf das magnetische Feld entsteht. Schon bei einer Frequenz des Magnetfeldes von 100 Hz ist ein beachtlicher Einfluß der Wirbelströme auf der Kugeloberfläche zu erkennen. Die magnetische Feldstärke in der Kugel

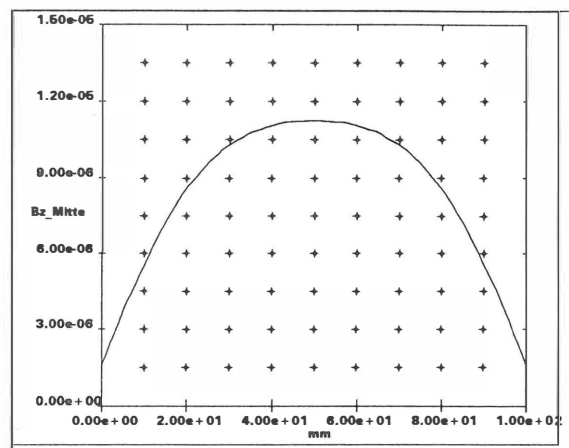
wird auf ca. 70 % reduziert. Eine in der Kugel angeordnete Meßspule würde also schon um 30 % zu kleine Werte registrieren.

Erhöht man die Frequenz auf 1 kHz, so ist die magnetische Feldstärke im Kugellinnern praktisch gleich Null, d.h. das elektrisch leitende Sondengehäuse schirmt das zu messende Magnetfeld nahezu total ab.

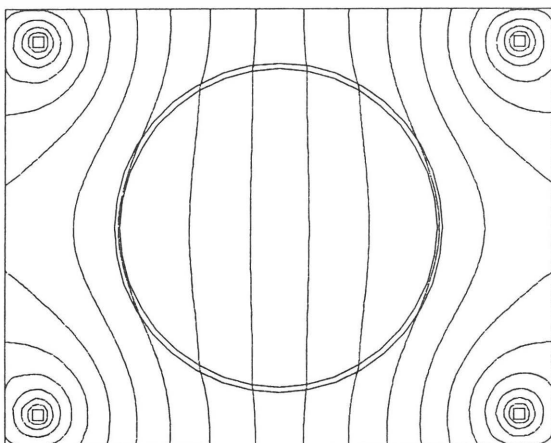
Es ist daher wichtig, daß in dem gesamten Frequenzbereich der Feldsonde durch frequenzabhängige Wirbelströme in elektrisch leitenden Konstruktionsteilen keine wesentliche Beeinflussung bzw. Rückwirkung auf das die Meßspule durchsetzende magnetische Feld auftritt. Diese Forderung ist nicht immer einfach zu erfüllen, speziell dann nicht, wenn eine möglichst kleine Bauform der Feldsonde verlangt wird, da auch eine kompakte Anordnung von Bauteilen (z.B. aufladbare Akkumulatoren) eine gewisse Feldbeeinflussung bewirkt.



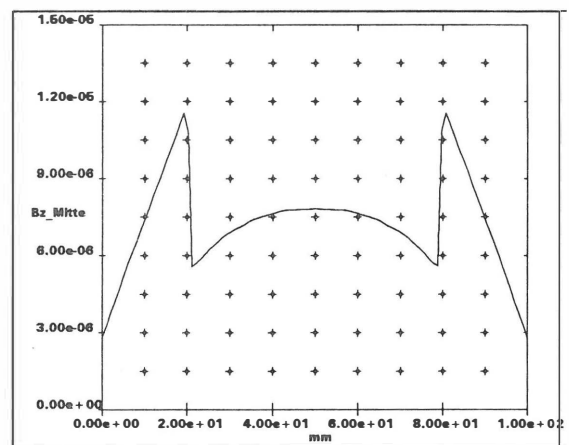
Verlauf der magnetischen Feldlinien ( $f = 10 \text{ Hz}$ )



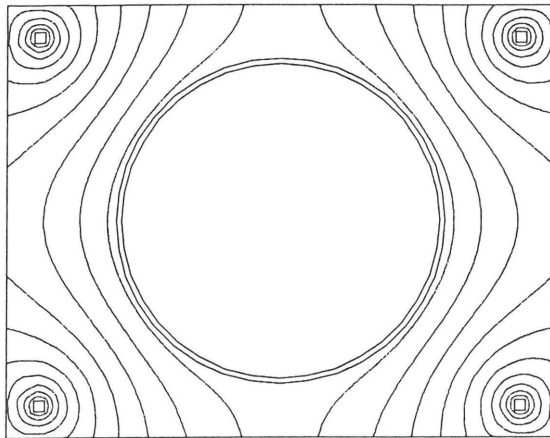
Senkrechte Komponente des magnetischen Feldes in der Kugelmittle ( $f = 10 \text{ Hz}$ )



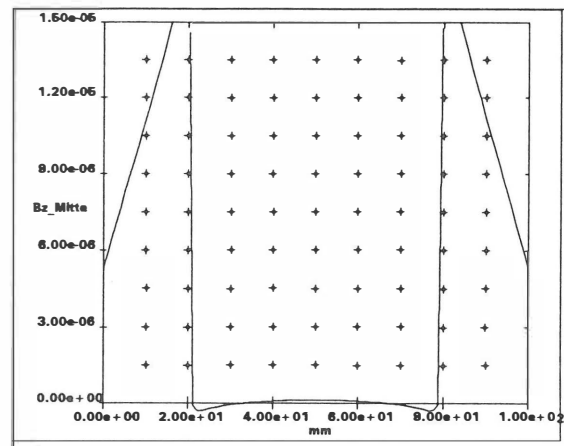
Verlauf der magnetischen Feldlinien ( $f = 100 \text{ Hz}$ )



Senkrechte Komponente des magnetischen Feldes in der Kugelmittle ( $f = 100 \text{ Hz}$ )



Verlauf der magnetischen Feldlinien (f = 1 kHz)



Senkrechte Komponente des magnetischen Feldes in der Kugelmittle (f = 1 kHz)

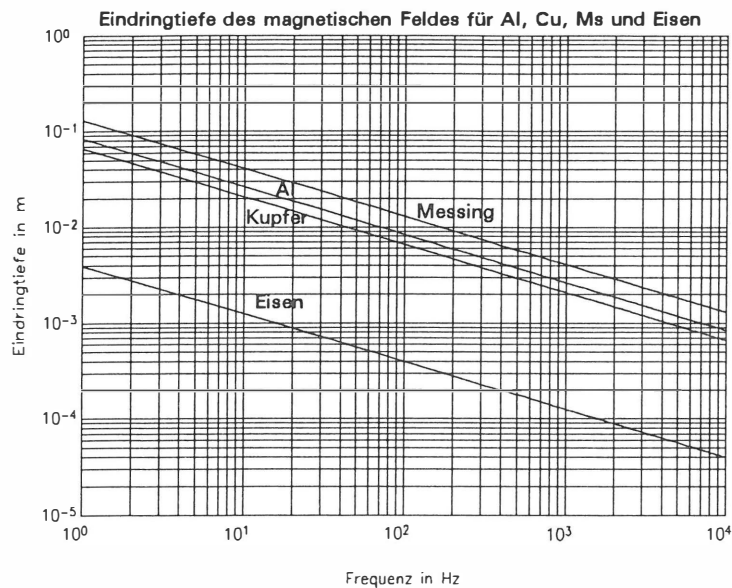
**Bild 9: Abschirmwirkung einer Kupferhohlkugel gegenüber dem magnetischen Feld in Abhängigkeit von der Frequenz (60 mm Außendurchmesser, 1 mm Wandstärke)**

Eine Abschätzung der Wirbelstromproblematik ist durch die sogenannte Eindringtiefe des magnetischen Feldes in elektrisch leitfähige Körper möglich. Sie gibt an, ab welcher Materialtiefe ein äußeres, ebenes magnetisches Feld im leitfähigen Körper auf einen Wert von  $1/e$  abgeklungen ist.

Die Eindringtiefe lässt sich für unendliche Gebiete nach folgender Formel berechnen:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \cdot \kappa \cdot \omega}}$$

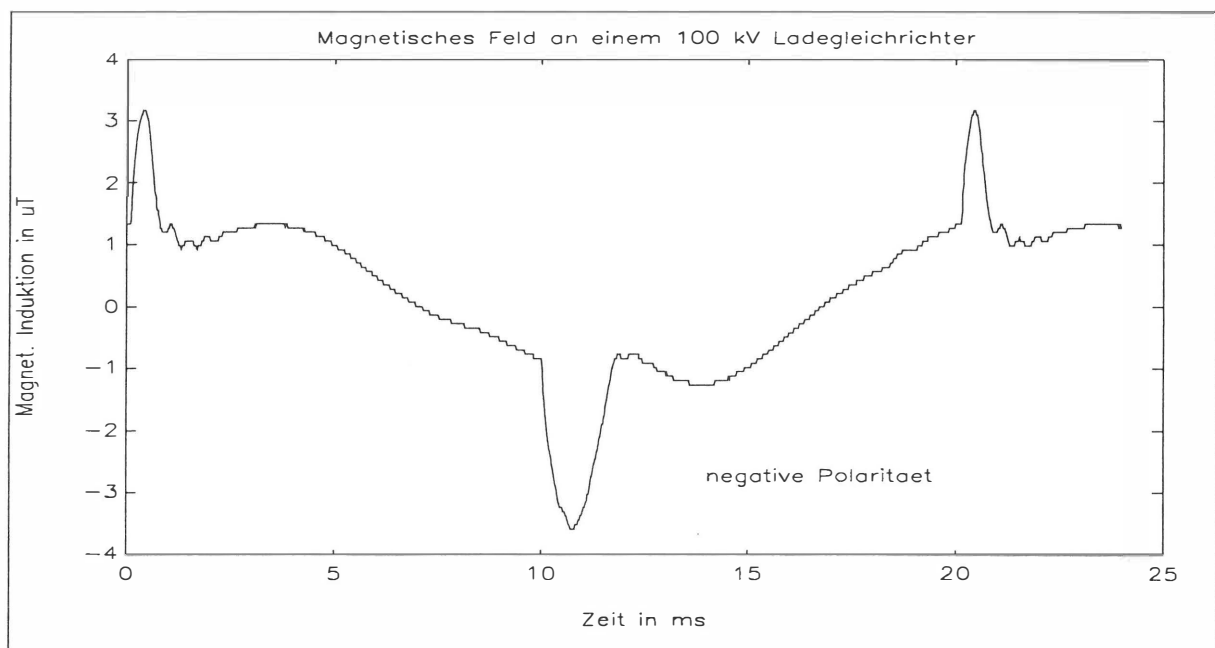
Bild 10 zeigt die Abhängigkeit der Eindringtiefe verschiedener Materialien in Abhängigkeit von der Frequenz.



**Bild 10**  
Eindringtiefe des magnetischen Feldes in verschiedene Materialien in Abhängigkeit von der Frequenz

### 3.3 Anwendungsbeispiele magnetischer Feldsensoren

Bild 11 zeigt die an einem 100 kV Ladegleichrichter eines 800 kV Stoßgenerators gemessene magnetische Induktion.

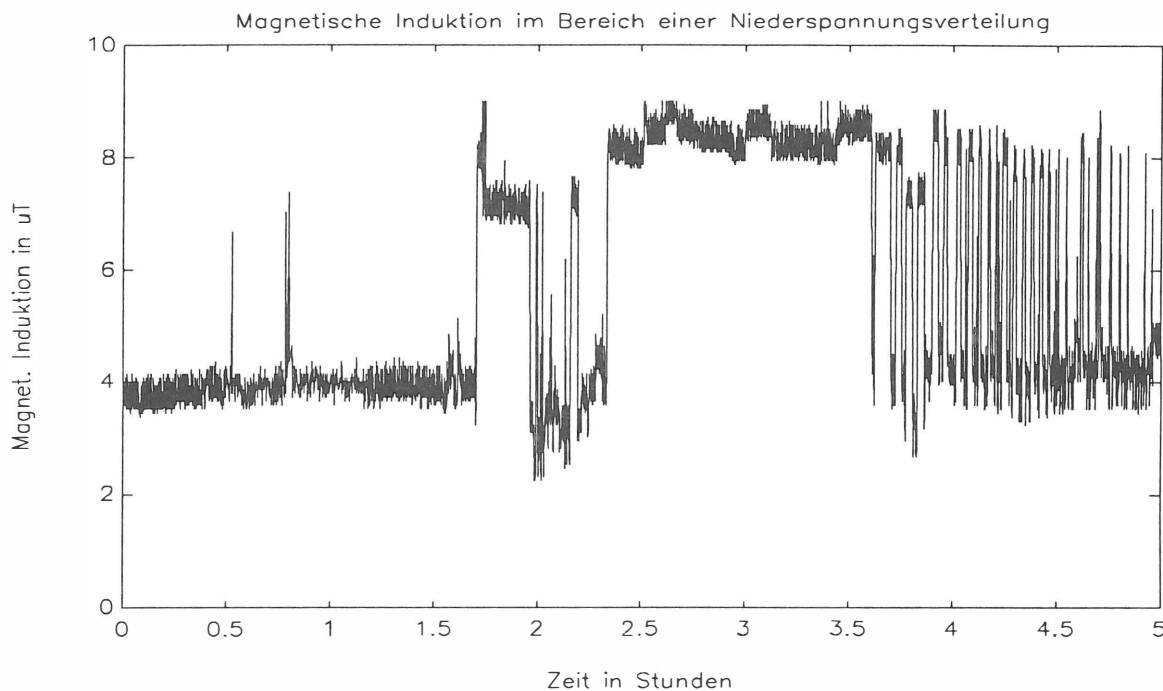


**Bild 11:** Magnetische Induktion in der Nähe eines 100 kV Ladegleichrichters für einen 800 kV Stoßgenerator

Die Spitzen in den beiden Halbperioden werden durch die Ausgangsstromimpulse beim Zünden des Thyristorstellers verursacht. Die 50 Hz Grundschiwingung wird durch den 50 Hz-Strom anderer benachbarter Installationen verursacht. Durch eine engere

magnetische Kopplung mit den interessierenden Stromkreisen ist auch eine selektive Strommessung möglich. Dies kann beispielsweise durch eine Verringerung des Abstandes zu einzelnen stromführenden Leitern geschehen, oder indem ein stromführender Leiter in Form einer Schleife um die Magnetfeldsonde gelegt wird.

Ein weiteres Beispiel zeigt Bild 12. In etwa 0.5 m Abstand der Niederspannungshauptverteilung eines Hochspannungslabors wurden über einen Zeitraum von 5 Stunden die Maximalwerte (Scheitelwerte) der magnetischen Induktion gemessen. Der Meßablauf wurde mit einem PC automatisiert.



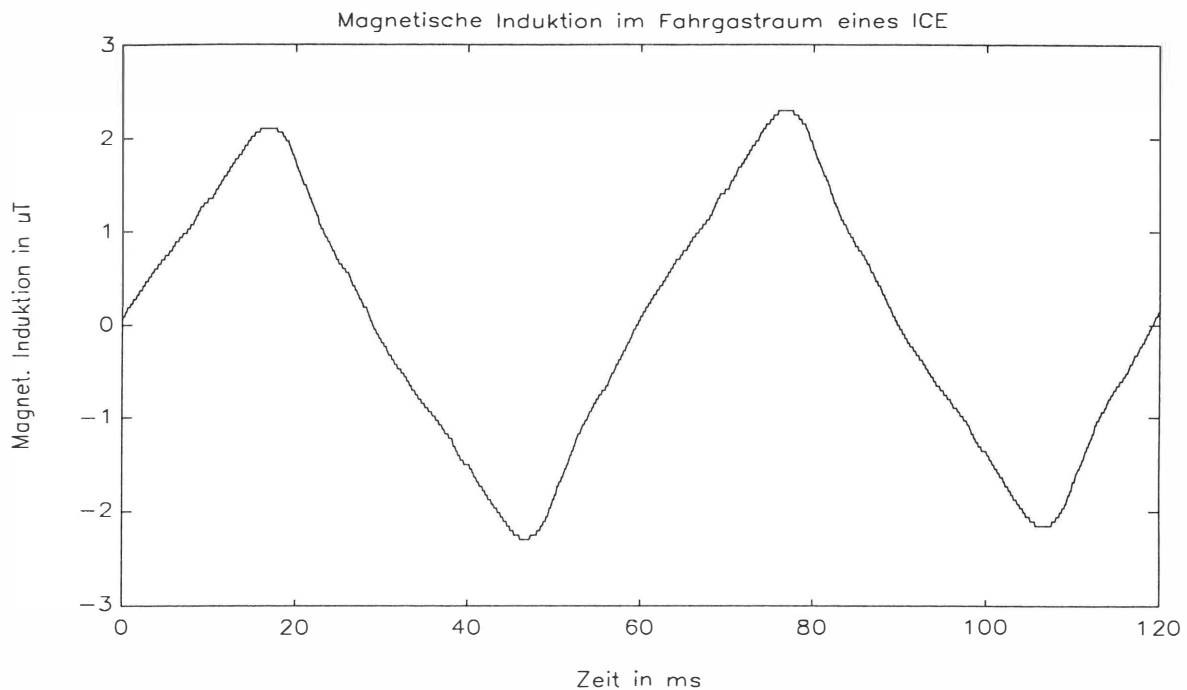
**Bild 12:** Maximalwerte der magnetischen Induktion in der Nähe der Niederspannungshauptverteilung eines Hochspannungslabors.

Die eigentliche Messung erfolgte dadurch, daß mit einer Abtastrate von 10 kHz ohne Unterbrechung das Meßsignal abgetastet und alle 6 Sekunden der in dieser Zeit aufgetretene Maximalwert gespeichert wurde. Das Ein- und Ausschalten unterschiedlicher Anlagen (Stoßanlagen, Klimakammer, ...) verursacht eine zeitlich sich stark ändernde Netzbelastung. Diese hat entsprechende Änderungen der magnetischen Induktion im Bereich der Verteilung zur Folge.

Bild 13 zeigt die im Fahrgastraum eines fahrenden ICE-Zuges der Deutschen Bundesbahn gemessene magnetische Induktion beim Anfahren des Zuges. Die Frequenz von  $16 \frac{2}{3}$  Hz ist klar zu erkennen (Periodendauer 60 ms). Die gemessenen Maximalwerte liegen bei ca.  $6 \mu\text{T}$  Scheitelwert.

Die Meßwerterfassung erfolgte mit einem batteriebetriebenen Notebook.PC. Insgesamt ergaben sich stark unterschiedliche Werte der magnetischen Induktion, da eine Reihe

unterschiedlicher Einflußfaktoren auf das erzeugte Magnetfeld vorhanden sind (momentane Leistung des Zuges, Leitungsführung, Lage der Einspeisepunkte, Stöme anderer fahrender Züge).



**Bild 14:** Magnetische Induktion im Fahrgastraum beim Anfahren eines ICE-Zuges

Falls sich induktive Magnetfeldsonden bei der Messung relativ geringer magnetischer Feldstärken nicht in absolut ruhiger Lage befinden, ist der Einfluß des Erdmagnetfeldes (ca. 40  $\mu\text{T}$ ) nicht immer vernachlässigbar. Durch eine Relativbewegung der Meßspule gegenüber der Erde wird eine zusätzliche Spannung induziert. Dadurch wird die eigentliche Messung verfälscht.



#### **4. Zusammenfassung**

Elektrische und magnetische Feldsensoren zur Messung niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder gibt es in vielen unterschiedlichen Ausführungsformen. In der Regel werden für die Messung elektrischer Felder kapazitive Feldsensoren mit einer potentialfreien Meßwertübertragung verwendet. Durch eine günstige Form des Feldsensors und die potentialfreie Meßwertübertragung ist die Rückwirkung des Sensors auf das zu messende Feld gering und andererseits können problemlos Messungen auf Hochspannungspotential durchgeführt werden. Kugelförmige Feldsensoren haben den Vorteil der geringsten Feldstärkeüberhöhung auf der Sensoroberfläche und sind daher für die Messung hoher Feldstärken am besten geeignet. In vielen Fällen ist durch eine entsprechende Kalibrierung auch eine indirekte Spannungsmessung möglich.

Zur Messung magnetischer Felder werden üblicherweise Meßspulen verwendet. Diese haben meist eine entsprechend hohe Windungszahl, um auch noch kleine magnetische Feldstärken bei kleinen Frequenzen (z.B.  $16 \frac{2}{3}$  Hz) messen zu können. Wichtig ist, daß durch eine richtige Wahl der Materialien des Sensors frequenzabhängige Wirbelstromeffekte verhindert werden. Dadurch kann in einem weiten Frequenzbereich ein linearer Frequenzgang des Meßsystems erreicht werden.

Durch den Einsatz moderner Mikroelektronik können bei elektrischen und bei magnetischen Feldsensoren recht komfortable Meßsysteme mit kleinen Abmessungen aufgebaut werden. Der mobile Einsatz ist dadurch sehr einfach möglich und erfordert beispielsweise nur einen Notebook PC.

## **Literaturangaben:**

- /1/     DIN VDE 0848, Teil 4, 10/89  
        "Sicherheit bei elektromagnetischen Feldern: Grenzwerte zum Schutz von Personen  
        im Frequenzbereich von 0 Hz bis 30 kHz".
  
- /2/     W. R. Pfaff:  
        "Potentialfreie Kugelfeldsonden zur Messung elektromagnetischer Felder in  
        Hochspannungsanordnungen".  
        Dissertation Universität Stuttgart 1989
  
- /3/     H. Singer, H.-D. Brüns:  
        "Feldverzerrungen durch Sonden".  
        103. PTB-Seminar "Feldsonden-Stand der Technik und aktuelle Probleme bei  
        Feldmessungen."  
        Braunschweig, Oktober 1992