

1. Normgerecht messen: Elektrische Felder von Hochspannungsanlagen

von Ralf Müller und Hans-Joachim Förster

Die Normen für die Sicherheit von Personen in elektrischen und magnetischen Feldern wurden verschärft. Sie verlangen die dreidimensionale Messung der Felder und die Zusammenfassung der Komponenten zur Ersatzfeldstärke. Ist dieser Aufwand gerechtfertigt? Im Rahmen einer Studienarbeit an der Fachhochschule Reutlingen wurden Hochspannungstrassen, Umspannwerke und Arbeitsplatzumgebungen untersucht. Die Ergebnisse belegen: ohne dreidimensionale Messung geht es nicht!

Meßmethoden

Ein E-Feld-Sensor besteht im Prinzip aus zwei gegenüberliegenden Kondensatorplatten, an denen der Verschiebungsstrom gemessen wird. Nachteilig ist die Richtcharakteristik dieser einfachen Anordnung. Für eine exakte Messung müßte die Richtung der Feldlinien bekannt sein und der Sensor entsprechend ausgerichtet werden - ein Fall, der in der Praxis kaum auftritt. Die Berufsgenossenschaft [1] verlangt deshalb die Messung in drei orthogonalen Achsen des Raumes und die anschließende Berechnung der sog. Ersatzfeldstärke durch quadratische Addition der drei Feldkomponenten. Das ließe sich theoretisch mit der einen Sonde durch drei aufeinanderfolgende Messungen in den drei Richtungen erreichen - vorausgesetzt, das Feld ist zeitlich konstant. Eine praktikable Meßlösung bietet aber nur ein Sensor, der gleich dreidimensional aufgebaut ist. Moderne Meßgeräte benutzen Sensoren mit drei aufeinander senkrecht stehenden Plattenkondensatoren und berechnen die Ersatzfeldstärke automatisch.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Isotropie, d. h. der tatsächliche Grad der Richtungsunabhängigkeit. Er läßt sich durch Drehung des Sensors in einem homogenen Feld nachweisen: die Anzeige muß stets gleich bleiben [3]. Denn nur so läßt sich nachweisen, daß keine personengefährdenden Felder anliegen.

Meßbedingungen

Um Messungen des elektrischen Feldes normgerecht durchzuführen, müssen mehrere Punkte beachtet werden [1]:

- Am Meßort dürfen sich keine Personen im näheren Meßumfeld aufhalten.
- Feldverzerrende Objekte in der Meßumgebung wie Bäume, Sträucher, Maschinen usw. müssen protokolliert werden.
- Umwelteinflüsse wie Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Bodenbeschaffenheit und dergleichen müssen ebenfalls protokolliert werden.
- Der Sensor sowie das Stativ dürfen keinesfalls durch Luftfeuchtigkeit betaut sein. Ein Meßfehler wäre sonst unausweichlich.
- Die das Meßgerät bedienende Person hat darauf zu achten, daß sie sich während der Messung nicht zwischen Feldquelle und Meßsonde aufhält.

Diese Maßnahmen sind nötig, um auch bei wechselnden Betriebssituationen zu vergleichbaren und reproduzierbaren Meßergebnissen zu kommen.

Einfachster Fall: die Hochspannungstrasse

Erstes Beispiel ist eine Hochspannungstrasse, die über freies Gelände führt. Mißt man das Feld an der Stelle des größten Leiterseildurchhangs, also weit entfernt von den Masten, so kann man sogar die Richtung der Feldlinien als senkrecht voraussetzen. Wie erwartet, zeigt das Meßergebnis nur unwesentliche Unterschiede zwischen dreidimensionaler (isotroper) und eindimensionaler Messung (hier "y only" genannt): Die maximale Abweichung liegt unter 5%. Die leichte Unsymmetrie der Meßkurve ist auf das Geländeprofil zurückzuführen; es war von links nach rechts leicht ansteigend. Keinen Einfluß haben dagegen die Phasenbeziehungen zwischen den Leitern, dazu ist der Meßabstand zu den Leiterseilen zu groß.

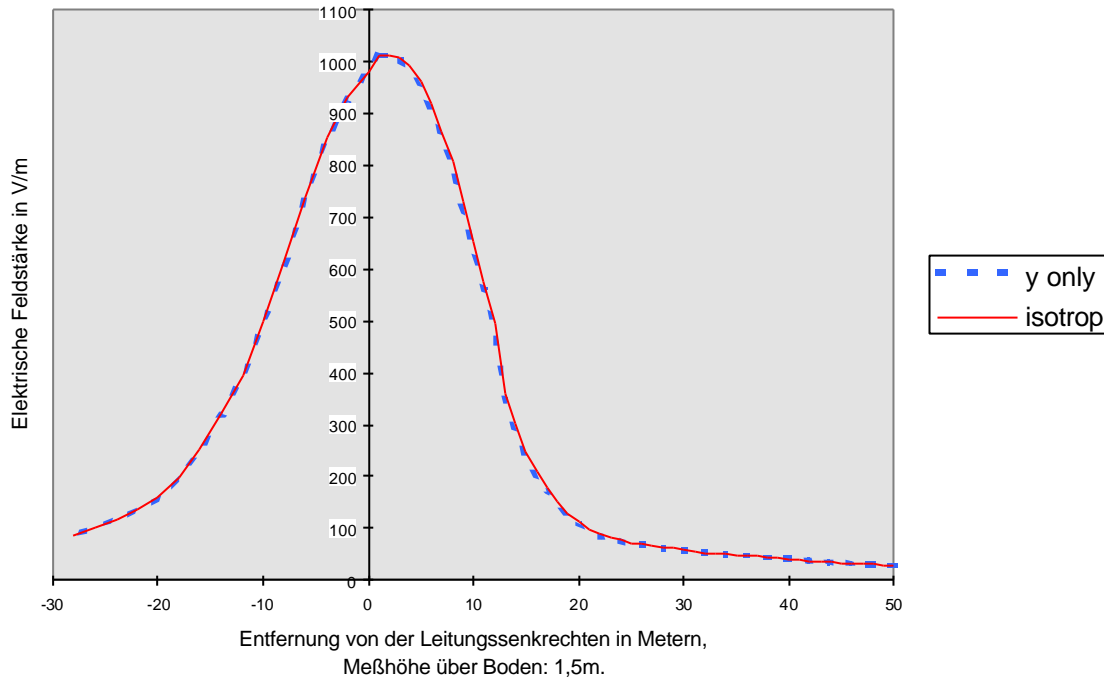


Bild 1: Die Hochspannungstrasse. Meßwerte für das elektrische Feld bei ein- und dreidimensionaler Messung.

Interessanter: die Kreuzung

Als weiteres Beispiel soll der Feldverlauf im Kreuzungsbereich zweier Leitungen gezeigt werden. Die Meßsituation:

- Spannung 110 kV bzw. 220 kV
- Dreiphasige Leiteranordnung
- Trasse1: 220 kV Tannenbaum (oben nach unten) ca. 40m Höhe
- Trasse2: 110 kV Einebene (links nach rechts) ca. 26m Höhe

Am Meßtag herrschten folgende Bedingungen:
Außentemperatur 16°C, mittlere Luftfeuchtigkeit, Boden sehr feucht.

Bild 2 zeigt die prinzipielle Meßstrecke. In unmittelbarer Umgebung des Meßortes befanden sich einige Bäume und eine Anzahl kleinerer Gebüsch. Die feldverzerrenden Einflüsse dieser Objekte in der Meßumgebung werden in der Auswertung erörtert.

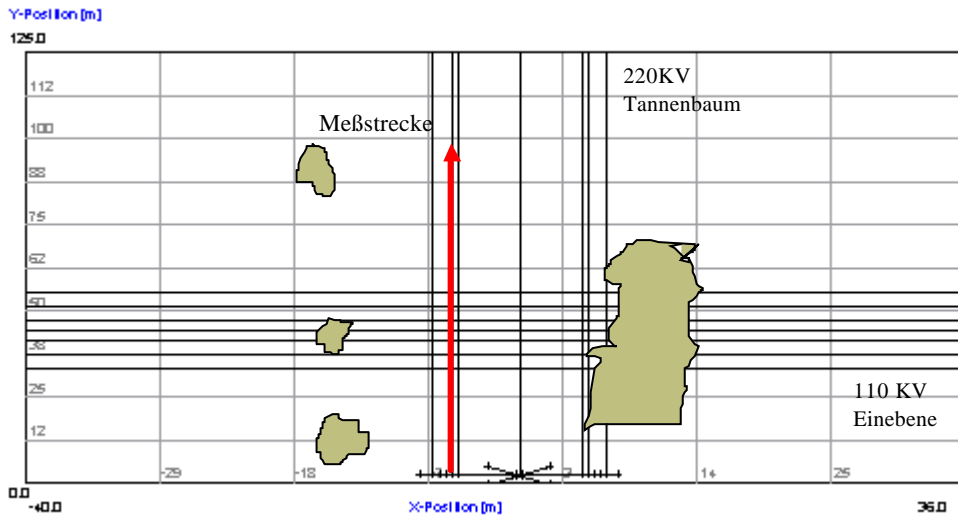


Bild 2: Meßstrecke unter zwei sich kreuzenden Hochspannungstrassen. Schraffierte Felder stellen Sträucher und Bäume dar.

Bild 3 zeigt den gemessenen Feldstärkeverlauf. Der Startpunkt der Messung befindet sich im Diagramm auf Höhe des Masten. Die letzte Messung wurde in 60 m Entfernung durchgeführt. Deutlich erkennt man den Einfluß des Masten bis in den Kreuzungsbereich hinein. Bei einer Entfernung von 30 m vom Startpunkt beginnt die Kreuzung. Am Meßort 28 m ist ein Feldstärkemaximum ersichtlich. Dieses Maximum ergibt sich durch die Summierung der Feldstärken beider Trassen. Im Bereich der Kreuzung wird die Feldkomponente der oberen Trasse kompensiert, so daß ein Minimum an dieser Stelle auftritt. Am Ende des Kreuzungsbereichs am Meßort 52 m steigt die elektrische Feldstärke wieder stark an. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Schirmwirkung des Masten nachläßt; der Kreuzungsbereich wurde verlassen.

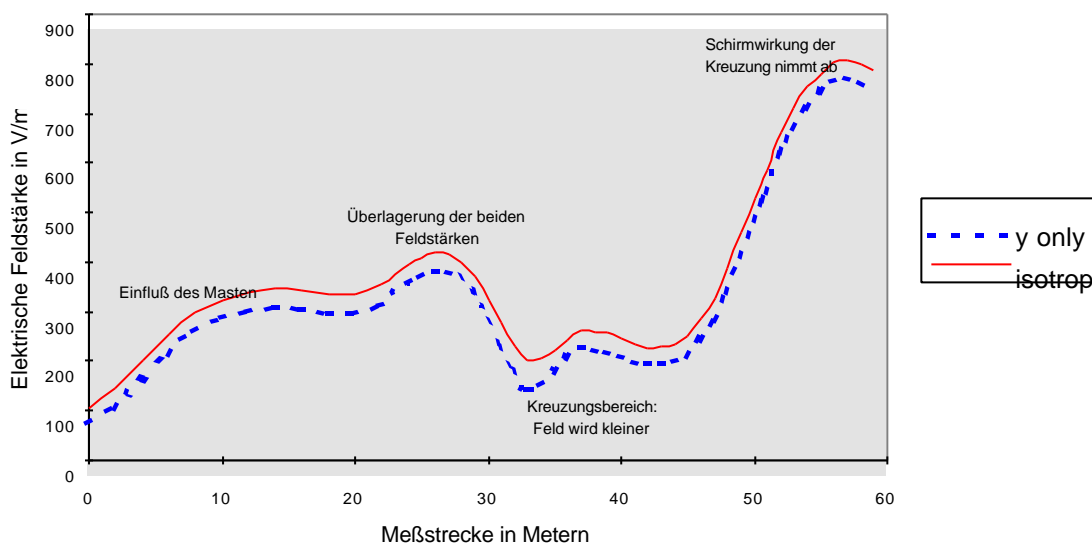


Bild 3: Verlauf des elektrischen Feldes bei sich kreuzenden Hochspannungstrassen.

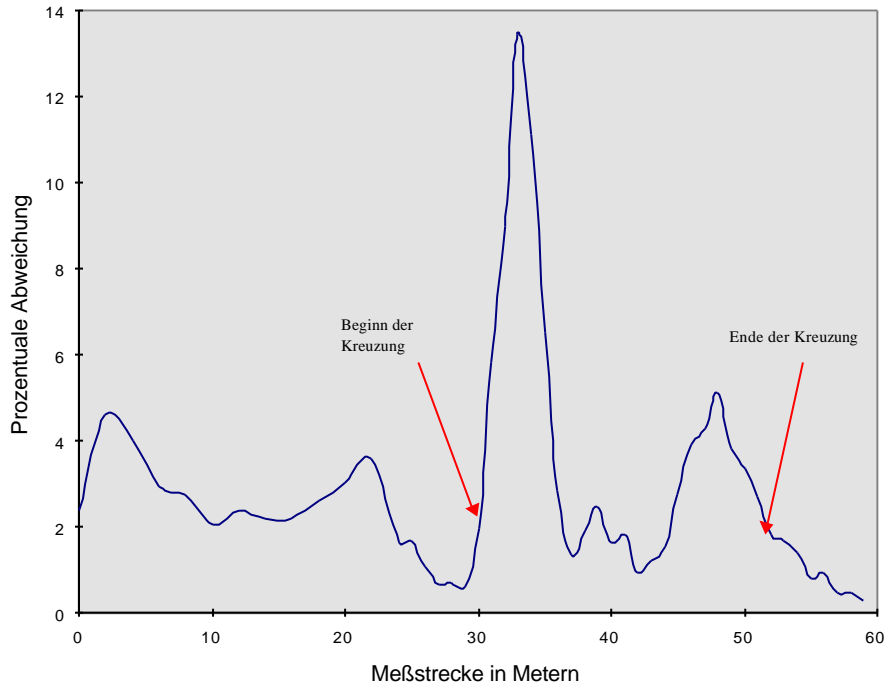


Bild 4: Relative Abweichung zwischen ein- und dreidimensionaler Messung.

Bild 4 zeigt die relative Abweichung zwischen der ein- und dreidimensionalen Messung. Ihre Maxima treten im Randbereich der Kreuzung auf. Die Werte betragen bis zu 13 %. Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die unteren Leiterseile im Kreuzungsbereich die Feldstärkekomponenten der oberen Leiterseile kompensieren. Der schwankende Verlauf im Kreuzungsbereich in Bild 3 ist auf unebenes Bodenprofil zurückzuführen. Deshalb soll in Bild 5 dieser Bereich noch einmal genauer dargestellt werden.

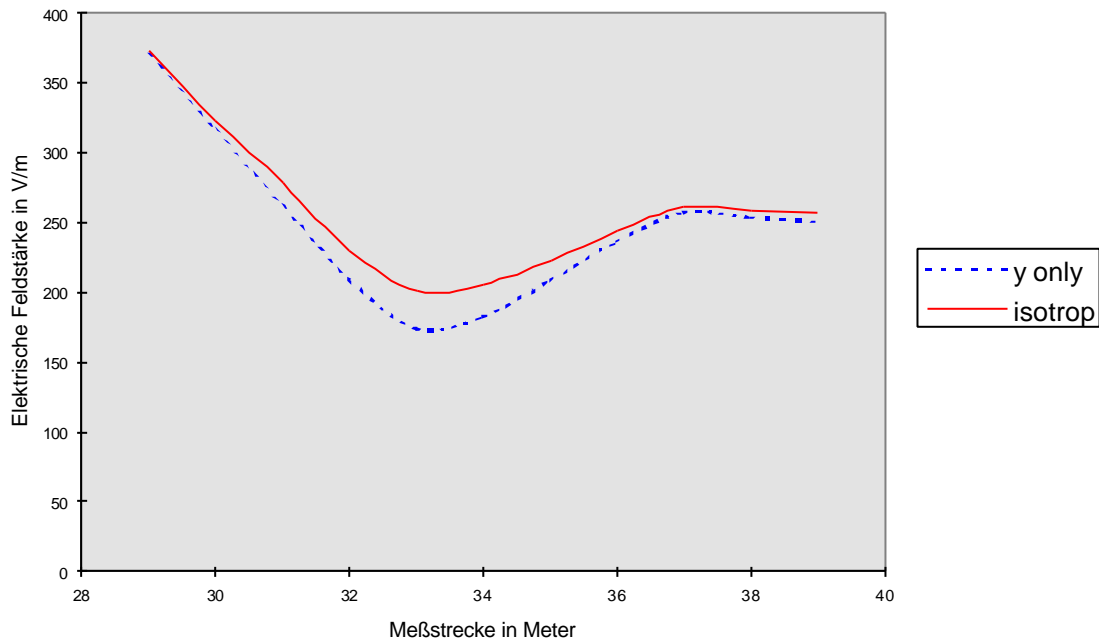


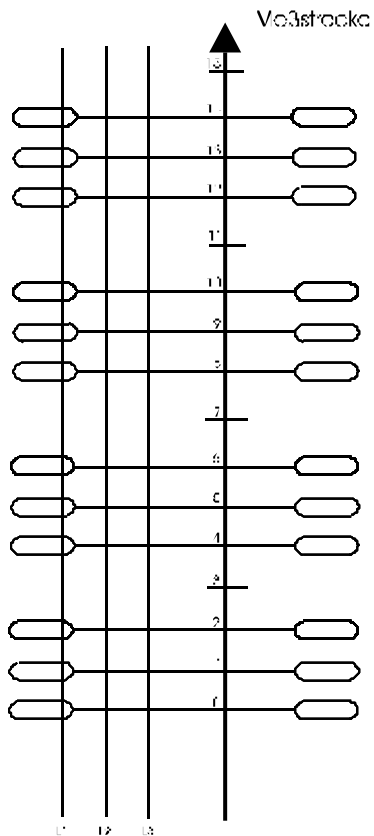
Bild 5: Gezoomte Darstellung des Kreuzungsbereichs aus Bild 3.

In Bild 5 erkennt man deutlich den Einfluß des Bodenprofils auf das Meßergebnis. Das heißt, bei stark unebenem Bodenprofil empfiehlt es sich, dreidimensional zu messen. Weder eine eindimensionale Messung noch eine Rechnersimulation führen zu genauen Ergebnissen.

Komplex: das Umspannwerk

Mit freundlicher Unterstützung der Neckarwerke Esslingen AG war es möglich, Messungen in einem Umspannwerk durchzuführen. Am Meßort wurde eine Meßstrecke mit zahlreichen Leiteranordnungen, Isolatoren und Trägern ausgewählt, sie ist in Bild 6 skizziert.

Draufsicht:



Seitenansicht:

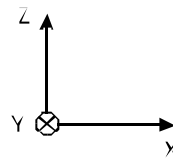
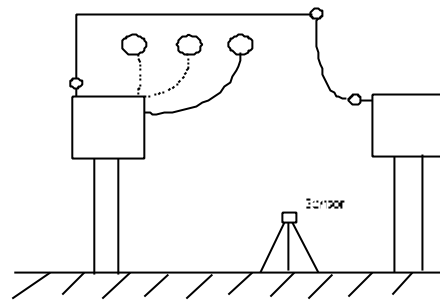


Bild 6: Meßstrecke in einem Umspannwerk

Am Meßtag herrschten folgende Bedingungen: Außentemperatur 5°C, mittlere Luftfeuchtigkeit, Boden sehr feucht.

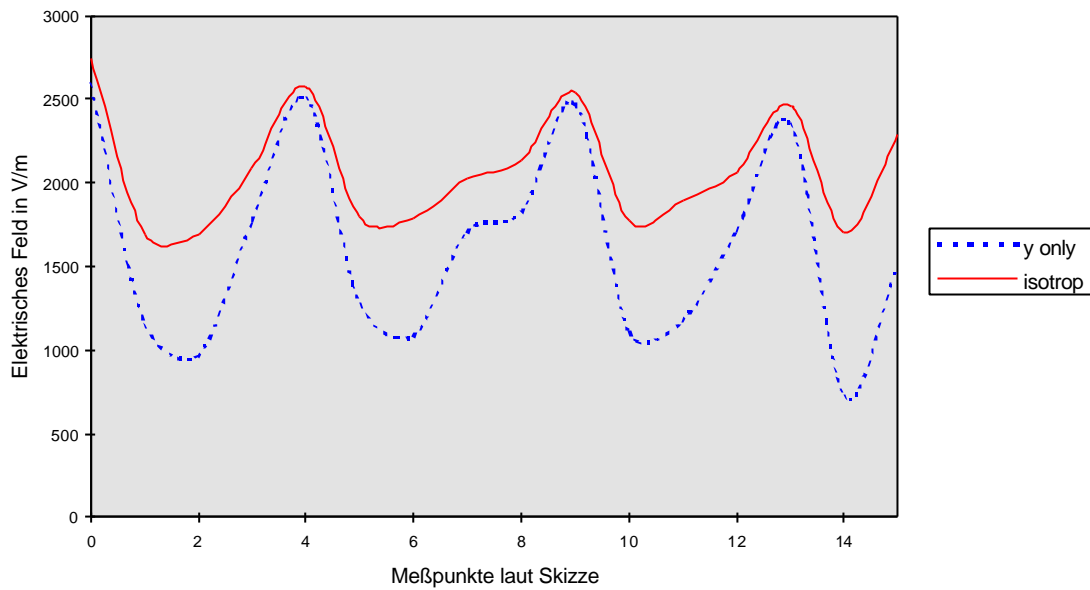


Bild 7: Direkter Vergleich der Meßwerte zwischen ein- und dreidimensionaler Messung.

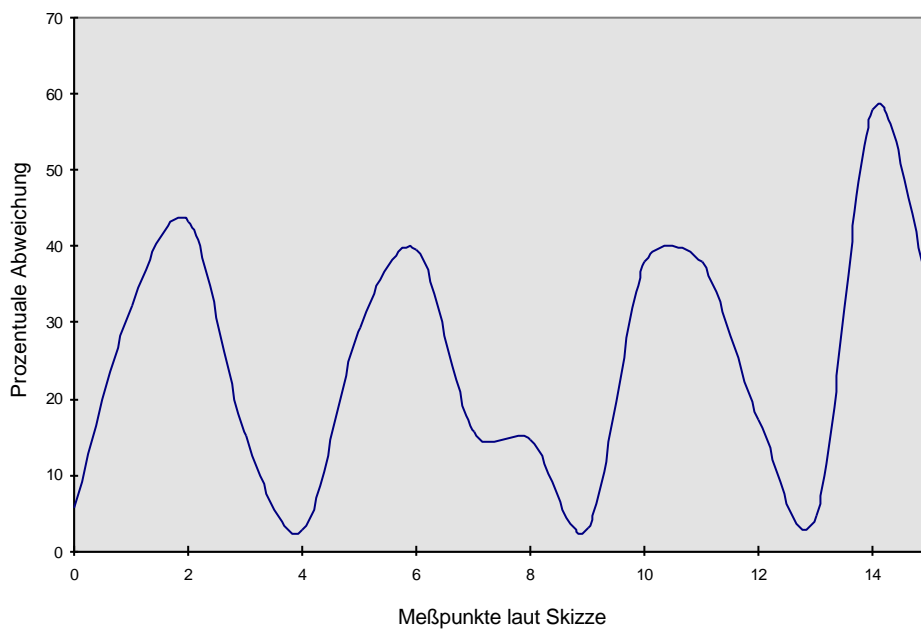


Bild 8: Relativer Fehler zwischen ein- und dreidimensionaler Messung.

Aus den Meßergebnissen ist ersichtlich, daß durch die Feldverzerrungen von gekreuzten Leitungen, Schaltanlagen, Stromschiene usw. gravierende Unterschiede zwischen ein- und dreidimensionaler Messung bestehen. Dabei hängt der relative Fehler stark vom Meßort ab: Direkt unter den Leitern ist er gering, aber dazwischen kann er bis zu 60% betragen.

Diese Abweichung ist bei Messungen zum Personenschutz nicht tolerierbar - auch im Hinblick auf juristische Auseinandersetzungen. Denn die Abweichung bedeutet: Es wird eine kleinere Feldstärke als die tatsächliche Ersatzfeldstärke angezeigt und damit eine Sicherheit vorgetäuscht, die nicht besteht. Hier zeigt sich auch eine Schwäche der IEC-Norm 833 [4], welche ausschließlich die Messung in Umgebungen von Hochspannungsleitungen definiert und deshalb für arbeitsrechtliche Auseinandersetzungen nicht brauchbar ist.

Unüberschaubar: die meisten Arbeitsplatzumgebungen

Weit entfernt vom einfachen Fall der Hochspannungsstrasse sind die meisten Arbeitsplatzbedingungen in der Industrie mit Schaltfeldern, Umspannstationen, Induktionsheizungen, Maschinenumgebungen. Hier ist weder der räumliche noch der zeitliche Feldverlauf vorherzusagen.

Eine weitere Unsicherheit kommt hinzu: das Frequenzspektrum. Mehrere Normen nennen für verschiedene Frequenzen unterschiedliche Grenzwerte. Breitbandige Meßeinrichtungen sind deshalb unbrauchbar, wenn die Frequenz des Feldes unbekannt ist oder sich mehrere Felder überlagern. Als Beispiel sei hier eine Induktionsheizung genannt, die sowohl die Netzfrequenz von 50 oder 60 Hz und deren Harmonische abstrahlt als auch die Heizstromfrequenz. Neuere Meßgeräte begegnen solchen Situationen mit eingebauten Filtern, um die Hauptstrahlungskomponenten zu orten und ihre Frequenzen bewerten zu können. Dreidimensionale Meßtechnik mit Filtermöglichkeit ist hier die zwingende Voraussetzung für normgerechte und reproduzierbare Messungen zum Schutz von Personen.

Literatur

- [1] Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik: Regeln für Sicherheit und Gesundheitsschutz an Arbeitsplätzen mit Exposition durch elektrische, magnetische oder elektromagnetische Felder.
- [2] Elektrische und magnetische Felder
Strom im Alltag
Informationszentrale der Elektrizitätswirtschaft e.V. 60596 Frankfurt
- [3] Fortschrittberichte VDI Reihe 8 Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik
Dipl.-Ing. Georg Bahmeier, Untermeitingen
Feldsonden für Kalibrierzwecke und zur Bestimmung von Betrag und Richtung der elektrischen Feldstärke
- [4] International Standard IEC 833: Measurement of power frequency electric fields
- [5] Deutsche Norm VDE 0848 Teil 1: Gefährdung durch elektromagnetische Felder. Meß- und Berechnungsverfahren.
- [6] Deutsche Norm VDE 0848 Teil 4: Sicherheit bei elektromagnetischen Feldern. Grenzwerte für Feldstärken zum Schutz von Personen im Frequenzbereich von 0Hz bis 30 kHz.

Ralf Müller (25) studiert Elektronik mit Schwerpunkt Kommunikationselektronik an der Fachhochschule Reutlingen. Im Rahmen einer Studienarbeit beschäftigte er sich im 7. Semester mit der dreidimensionalen Messung elektrischer Felder im Niederfrequenzbereich.

Dipl.-Ing. Hans-Joachim Förster (39) leitet bei Wandel & Goltermann in Eningen den Geschäftsbereich EMVU-Meßtechnik. Zusammen mit Prof. Dipl.-Ing. W. Steimle von der Fachhochschule Reutlingen betreute er die Studienarbeit, deren Ergebnisse hier auszugsweise vorgestellt wurden.