

18. FACHHOCHSCHULE REUTLINGEN
HOCHSCHULE FÜR TECHNIK UND WIRTSCHAFT

Fachbereich Elektronik

Studienarbeit

von

Ralf Müller

Erstellt im Wintersemester 1996/97

Betreuung: Prof. Dipl.-Ing. W. Steimle, Dipl.-Ing. Hans J. Förster

Thema: **Dreidimensionale Messung elektrischer Felder
im Niederfrequenzbereich**

Kurzbeschreibung:

Aufgrund nationaler und internationaler Normen für die Sicherheit von Personen in elektrischen und magnetischen Feldern müssen elektrische Felder anders als bisher dreidimensional gemessen und zur sogenannten Ersatzfeldstärke zusammengefaßt werden.

Die vorliegende Arbeit soll klären, welche Unterschiede sich zwischen eindimensionaler Messung der Vertikalkomponente und der Ersatzfeldstärke ergeben. Dazu werden geeignete Objekte wie Hochspannungstrassen, ein Umspannwerk und Arbeitsplatzumgebungen untersucht. Messungen der Feldkomponenten und Simulationen in Abhängigkeit vom Ort zeigen, daß infolge der Komplexität der Quelle oder aufgrund von feldverzerrenden Einflüssen am Meßort die Feldstärken nur schwer prognostizierbar sind.

Eine dreidimensionale Meßtechnik mit automatischer Berechnung der Ersatzfeldstärke ist daher zwingend notwendig, wenn verlässliche Ergebnisse gewünscht werden.

Ich habe die vorliegende Arbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt.

Reutlingen, den 28.01.1997

Inhaltsverzeichnis

Seite

<u>1. Einführung</u>	3
<u>2. Grundlagen</u>	4
2.1 Entstehung und Bestimmung von niederfrequenten elektrischen Feldern.....	4
2.2 Größenordnungen von Feldstärken.....	6
2.3 Meßprinzipien im Niederfrequenzbereich	6
2.4 Verzerrung des elektrischen Feldes durch Objekte.....	7
2.4.1 Verzerrung durch die Anwesenheit einer Person.....	7
2.4.2 Verzerrung durch den Einfluß eines Baumes.....	8
2.4.3 Warnhinweise zur Durchführung von Messungen	9
2.4.4 Grundsätzliche Meßmethoden.....	9
<u>3. Verwendetes Meßgerät und Simulationsprogramm</u>	10
3.1 Simulationsprogramm EFC-400	10
3.2 Feldmeßgerät EFA3.....	10
<u>4. Kurzbeschreibung der ausgewählten Meßobjekte</u>	11
<u>5. Simulation des elektrischen Feldes</u>	12
5.1 Simulation mit dem Simulationsprogramm EFC-400	12
5.2 Simulation einer Hochspannungstrasse.....	12
5.2.1 Situation und Lagebeschreibung	12
5.2.2 Ergebnis der Simulation	13
5.3 Simulation einer Kreuzung	15
5.3.1 Situation und Lagebeschreibung	15
5.3.2 Ergebnis der Simulation	15
<u>6. Messung mit einem Feldmeßgerät</u>	18
6.1 Datstellung der Meßergebnisse	18
6.2 Messung unter einer Hochspannungsleitung	18
6.2.1 Situation und Lagebeschreibung	18
6.2.2 Ergebnis.....	19
6.3 Messung durch einen Hochspannungsmast mittig hindurch.....	20
6.3.1 Situation und Lagebeschreibung	21
6.3.2 Ergebnis.....	21
6.4 Messung an einer Kreuzung.....	23
6.4.1 Situation und Lagebeschreibung	23
6.4.2 Ergebnis.....	24
6.5 Messung in einem Umspannwerk	26
6.5.1 Situation und Lagebeschreibung	26
6.5.2 Ergebnis.....	27
<u>7. Interpretation</u>	29
<u>8. Fazit</u>	30
<u>9. Literaturverzeichnis</u>	31

Anhang A

A.1 Berechnungsverfahren 31

Vorwort

Die vorliegende Studienarbeit entstand während meines Studiums an der Hochschule für Technik und Wirtschaft, Fachhochschule Reutlingen; im Studiengang Elektronik.

Ganz besonders zu Dank bin ich Herrn Dipl.-Ing Hans Förster verpflichtet, für die Aufgabenstellung sowie für viele hilfreiche Anregungen und Ratschläge, und der Firma Wandel & Goltermann für die zur Verfügung gestellten Meßgeräte und Simulationswerkzeuge, die wesentlich zum Gelingen der Studienarbeit beitrugen.

Herrn Dipl.-Ing. F. Gärtner und Herrn Dipl.-Ing. H. Ahne von den Neckarwerken Esslingen danke ich für die Möglichkeit, Messungen an sonst nicht zugänglichen Stellen durchzuführen. Nicht zuletzt danke ich Herrn Dipl.- Ing. (FH) W. Kumbier für die Einweisung in das zur Verfügung gestellte Softwaretool.

1. Einführung

In der Vergangenheit nahm die Frage an Bedeutung zu, ob und wie sich der Einfluß elektromagnetischer Felder auf biologisches Gewebe und Organismen auswirkt. Neben hochfrequenten elektromagnetischen Feldern wie sie z.B. vermehrt durch Sendeeinrichtungen auftreten, führte in diesem Zusammenhang zunehmend auch das niederfrequente elektrische und magnetische Feld zur Diskussion. Der Verdacht, daß z.B. die durch Überlandleitungen verursachten niederfrequenten magnetischen und elektrischen Felder für verschiedene Krankheitsbilder verantwortlich seien, regte heftige Diskussionen in unterschiedlichen Gremien an. In der vorliegenden Studienarbeit soll die Notwendigkeit einer neuartigen Meßtechnik zur Messung niederfrequenter elektrischer Felder untersucht werden.

2. Grundlagen

2.1 Entstehung und Bestimmung von niederfrequenten elektrischen Feldern

Das elektrische Feld entsteht im allgemeinen überall dort, wo eine elektrische Spannung angelegt wird. Dabei gilt, je höher die angelegte Spannung, desto größer das von ihr verursachte elektrische Feld.

$$\vec{E} = \frac{U}{d} \quad (2.1)$$

U = angelegte Spannung

d = Abstand zur Spannungsquelle

Das elektrische Feld in einem Punkt des Raumes ergibt sich im allgemeinen Fall aus der Überlagerung vieler verschiedener Einzelfelder verschiedener Quellen, die sich in Stärke, Richtung, Frequenz und Phasenlage unterscheiden können. Häufig dominieren Felder mit einer bestimmten Frequenz, wie dies beispielsweise bei Hochspannungstrassen der Fall ist.

Auch im Personenschutz geht es meist darum, die Gefährdung im Nahbereich bestimmter Quellen (Hochspannungsleitungen, Haushaltsgeräte) zu bestimmen. Um normenkonform zu messen, muß nach der VDE 0848 [7] aus den Einzelkomponenten des elektrischen Feldes eine quadratische Addition gebildet werden (Bild 2.1), um somit ein Maß für die am Arbeitsplatz befindliche Feldstärke zu erhalten. Bei der Auswahl der Meßtechnik ist insbesondere darauf zu achten, daß sie über mögliche Filteralternativen verfügt, mit denen eventuell auftretende, harmonische Frequenzen gemessen werden können. Diese Frequenzen sind wichtig und teilweise auch dominant zu der Grundfrequenz, was bei der Konzeption neuartiger Meßtechnik besonders beachtet werden muß.

In einem kartesischen Koordinatensystem kann man sich das elektrische Feld aus den folgenden drei orthogonalen Feldkomponenten zusammengesetzt denken: E_x , E_y , E_z . Am günstigsten wäre es, wenn alle drei Feldkomponenten nach Betrag und Phase gemessen werden können. Im Personenschutz jedoch, in welchem Meßtechnik hauptsächlich eingesetzt wird, reicht es aus, wenn ein Feldstärkewert ermittelt wird, der als genormtes Maß für die Gefährdung dienen kann. Deshalb wurde die sogenannte Ersatzfeldstärke für das elektrische und magnetische Feld definiert, die sich aus der quadratischen Addition der drei Feldkomponenten ergibt, wobei die Phasendifferenzen unberücksichtigt bleiben (VDE 0848 Teil1 [7] und CENELEC 50166-1).

Nach [1] gilt:

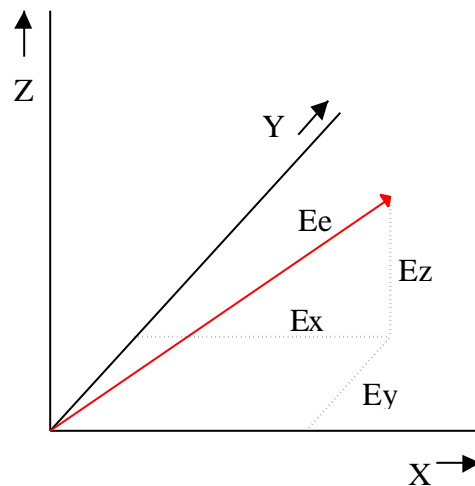
„Bei Verwendung von Feldsonden mit Richtcharakteristik ist nur die Messung in den drei orthogonalen Achsen mit nachfolgender Berechnung der Ersatzfeldstärke (resultierende Feldstärke) unter Berücksichtigung der Richtcharakteristik zulässig.

Es wird weiterhin darauf hingewiesen, daß bei zeitabhängiger Richtung der Feldvektoren, z.B. Drehfelder von dreiphasigen Leiteranordnungen, die mit eindimensionalen Meßwertaufnehmern gemessene maximale Feldstärke immer kleiner als die Ersatzfeldstärke ist. In diesem Fall muß in drei orthogonalen Achsen gemessen und aus den Einzelwerten die Ersatzfeldstärke berechnet werden.“

Eine genaue Angabe über die Maximalabweichung ist in [1] nicht angegeben. Wie sich jedoch bei Messungen herausstellte, war eine relative Abweichung von 25% zwischen eindimensionaler und dreidimensionaler Messung keine Seltenheit.

Hieraus ergeben sich, quasi per Definition, die Forderungen nach dreidimensionaler isotroper Meßtechnik, um normenkonform die Ersatzfeldstärke zu erfassen. Isotrop heißt, daß der messende Sensor in jeder Position zum Feld immer den gleichen Wert für die Ersatzfeldstärke drehwinkelunabhängig liefert [11].

Ersatzfeldstärke:



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

Bild 2.1: Vektorkomponenten der elektrischen Feldstärke und Ersatzfeldstärke E_e

2.2 Größenordnungen von Feldstärken

Wo treten elektrische und magnetische Felder mit welcher Intensität auf? Ein sehr naheliegendes Beispiel für starke 50 Hz- Felder sind natürlich zum einen die Energieübertragungssysteme und zum anderen die Energieverbraucher.

Bild 2.2 zeigt ein Beispiel für die Feldverteilung einer Hochspannungsleitung, welche in vielen Veröffentlichungen zum Thema niederfrequente elektromagnetische Felder zu finden ist [2].

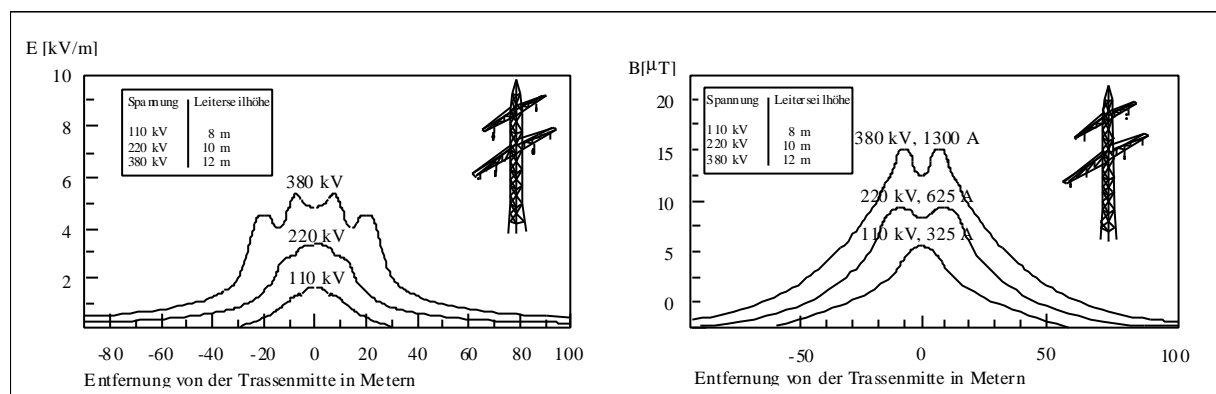


Bild 2.2 : Charakteristisches Querprofil elektrischer und magnetischer Felder im Nahbereich von Freileitungen

Das Bild zeigt das charakteristische Querprofil im Nahbereich von Freileitungen. Man sieht, daß hier die auftretenden Feldstärken sehr stark mit der Entfernung vom Leiter abnehmen. In Abschnitt 5 haben Messungen an einer 110 kV Leitung erwiesen, daß ab einer Entfernung von ca. 30 m das elektrische Feld unter 100 V/m liegt. Bei höheren Spannungen wirkt sich die Reichweite des elektrischen Feldes entsprechend weiter aus. Die Höhe der Exposition durch elektrische Felder ist durch Einflüsse der Umgebung und der Feldquelle abhängig. Beispielsweise bei einer Trassenführung muß die Höhe der Leiterseile beachtet werden. Umwelteinflüsse wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit wirken sich ebenso auf die Meßwerte aus, wie Bewuchs und Personen in der Meßumgebung.

2.3 Meßprinzipien im Niederfrequenzbereich

Die häufigste Methode zur Messung des elektrischen Feldes ist die kapazitive. Dabei bringt man zwei Elektroden (Dipol, Antenne) in das zu messende elektrische Feld, und mißt den Verschiebungsstrom. Die Messung des elektrischen Feldes ist gegenüber der des magnetischen deutlich komplizierter und aufwendiger. Nicht zuletzt ist das der Grund, daß nur wenig „richtig messende“ Meßtechnik und Simulatoren existieren. Aufgrund der Tatsache, daß Objekte im elektrischen Feld dieses verzerren oder abschirmen, müssen spezielle Vorsichtsmaßnahmen für eine einwandfreie Messung getroffen werden.

2.4 Verzerrung des elektrischen Feldes durch Objekte

Eine Ablenkung des elektrischen Feldes ist bei leitfähigen Objekten in der Meßumgebung zu berücksichtigen. Insbesondere die Nähe von Personen und Bäumen, aber auch Hochspannungsmasten und unebenes Bodenprofil haben Einfluß auf den Meßwert.

2.4.1 Verzerrung durch die Anwesenheit einer Person

Da die Anwesenheit einer Person im Feld dieses bereits derart verzerrt, daß der Gemessene mit dem tatsächlichen Wert nicht mehr allzuviel zu tun hat, ist eine Isolierung des Sensors vom Basisgerät (Anzeigegerät) nicht nur unumgänglich sondern zwingend erforderlich. Bei den später in Abschnitt 5 durchgeführten Messungen, konnte eine Beeinflussung der Messung durch anwesendes Personal bereits bei Annäherung auf 5 m an den Sensor nachgewiesen werden.

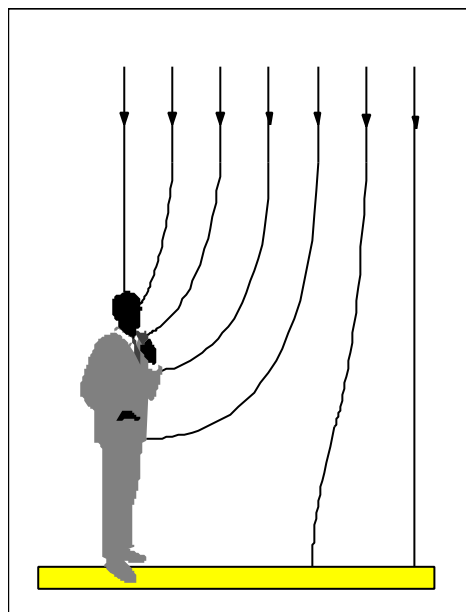


Bild 2.4.1 Verzerrung des elektrischen Feldes durch einen menschlichen Körper

Nach [1] gilt:

„Bei der Messung der elektrischen Feldstärke ist besonders darauf zu achten, daß die Meßergebnisse nicht durch die feldverzerrende Wirkung von Personen oder Gegenständen , z.B. Meßleitungen unzulässig hoch beeinflusst werden. Deshalb werden die Geräte zur Messung der elektrischen Feldstärke entwe-

der an einer Isolierstange ins Feld gehalten, oder das Meßgerät befindet sich auf einem Stativ und die Meßwertübertragung erfolgt über einen Lichtwellenleiter zu einem abgesetzten Anzeigeteil. “

Hieraus ergibt sich der prinzipielle Meßaufbau für elektrische Felder. Das eigentliche Meßgerät besteht aus drei Komponenten: Dem Stativ, das dafür Sorge trägt, daß keine Verzerrungen durch das Bodenprofil entstehen, dem Sensor, der die drei Feldkomponenten ermittelt und daraus den quadratischen Mittelwert berechnet und zuletzt dem Anzeigegerät, das den Wert der Feldstärke anzeigt und die Möglichkeit besitzen sollte, die gemessenen Werte zu speichern. Eine Datenübertragung zwischen Anzeigeteil und Sensor per Lichtwellenleiter sorgt dafür, daß das Meßergebnis nicht durch den Einfluß des Meßpersonals verfälscht wird.

2.4.2 Verzerrung durch den Einfluß eines Baumes

Wie oben erwähnt, ist der Einfluß eines Baumes auf das elektrische Feld erheblich. Das folgende Bild zeigt den prinzipiellen Feldstärkeverlauf in der Umgebung eines Baumes.

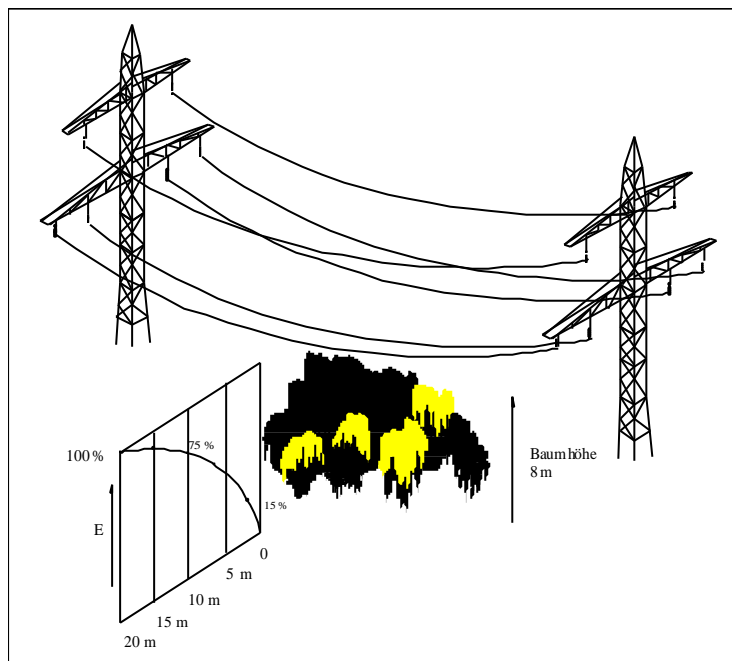


Bild 2.4.2: Einfluß eines Baumes auf das elektrische Feld in unmittelbarer Umgebung einer Freileitung [2]

Bis auf 15% reduziert bereits ein Baum das elektrische Feld einer 380 kV Leitung in seiner unmittelbaren Umgebung. Die Abschirmung läßt allerdings mit zunehmender Entfernung vom Baum nach, sodaß in einer Entfernung von 20 m nur noch eine sehr geringe Schirmwirkung des Baumes nachweisbar ist.

2.4.3 Warnhinweise zur Durchführung von Messungen

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

1. Am Expositionsbereich treten mehr als eine Feldquelle auf:

- Sind die Grenzwerte im zu untersuchenden Frequenzbereich gleich, so können die resultierenden Feldstärken mit breitbandigen Meßeinrichtungen direkt gemessen werden. Bei unbekanntem oder starken zu erwartenden harmonischen Frequenzen, sollte frequenzselektiv gemessen werden.
- Arbeiten die Feldquellen in Frequenzbereichen mit unterschiedlichen Grenzwerten, so darf mit breitbandigen Geräten nur bei Einzelbetrieb der Feldquellen gemessen werden, andernfalls sind frequenzselektive Meßsysteme einzusetzen.
- Bei Verwendung von Feldsonden mit Richtcharakteristik ist nur die Messung in den drei orthogonalen Achsen, mit nachfolgender Berechnung der Ersatzfeldstärke, unter Berücksichtigung der Richtcharakteristik zulässig.

2. Vorbereitende Maßnahmen am Meßort

- Am Meßort dürfen sich keine Personen im Meßbereich aufhalten.
- Feldverzerrende Objekte in der Meßumgebung wie Bäume, Sträucher, Maschinen usw. müssen bei der Messung berücksichtigt werden.
- Umwelteinflüsse wie Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Bodenbeschaffenheit und dergleichen müssen bei der Meßwertaufnahme mit einkalkuliert werden.
- Der Sensor sowie das Stativ dürfen keinesfalls durch Luftfeuchtigkeit betaut sein. Ein Meßfehler wäre sonst unausweichlich.

2.4.4 Grundsätzliche Meßmethoden

Bei der Messung des elektrischen Feldes gibt es grundsätzlich zwei Meßmethoden den Feldstärkebeitrag zu ermitteln:

1. Eindimensionale Messung

Der Sensor besteht aus zwei gegenüberliegenden Kondensatorplatten, mit denen der Verschiebungsstrom im Inneren der Platte gemessen wird. Bei der Messung muß die Feldquelle bekannt sein und entsprechend der Sensor zur Feldquelle hin ausgerichtet werden. Dies ist allerdings nicht möglich, da jede Annäherung an die Sonde unweigerlich Meßwertschwankungen durch die Feldverzerrungen der sich nähernden Person erzeugt. Die Herstellung solcher Sensoren ist zwar aufwendig, aber vergleichsweise billig gegenüber dreidimensionalen Sensoren.

2. Dreidimensionale Messung

Der Sensor besteht aus drei senkrecht aufeinanderstehenden Plattenkondensatoren, mit denen wiederum der Verschiebungsstrom gemessen wird. Aus den 3 Komponenten wird die elektrische Ersatzfeldstärke (Effektivwert) berechnet. Der Sensor sollte ideal isotrop sein, d.h. er muß unabhängig vom Drehwinkel immer den gleichen Wert für die Ersatzfeldstärke liefern. Aufgrund der Forderung nach Isotropie

ist es schwierig und damit teuer, solche Sensoren zu entwickeln. Auch die Erfassung der drei Feldkomponenten und die anschließende Berechnung der Ersatzfeldstärke erfordert ein zusätzliches Maß an Elektronik, was vermehrt Kosten verursacht.

Schließlich kann gesagt werden, daß dreidimensional isotrop messende Sensoren deutlich teurer sind als eindimensionale. Die folgende Ausarbeitung zeigt, wann es sinnvoll ist dreidimensional oder eindimensional zu messen.

3. Verwendetes Meßgerät und Simulationsprogramm

Um die Untersuchungen des elektrischen Feldes durchzuführen, war neben der Meßtechnik auch ein Simulationsprogramm notwendig. Mit diesem konnten die zu erwartenden Feldverzerrungen und Gegebenheiten vorab betrachtet werden, um kritische Stellen zu prognostizieren, und den Meßablauf möglichst effizient zu gestalten.

3.1 Simulationsprogramm EFC-400

Das Simulationsprogramm EFC-400 ermöglicht die Berechnung niederfrequenter, elektrischer und magnetischer Felder. Die Einsatzgebiete sind vielverzweigt und reichen von Hochspannungsleitungen, Bordnetzen, Elektroinstallationen bis hin zu Straßenbahnnetzen. Desweiteren ist es möglich, feldverzerrende Objekte wie Hochspannungsmasten, Betonwände und Bodenprofile mit in die Berechnung einzubeziehen.

3.2 Feldmeßgerät EFA-3

Mit Hilfe des Feldanalysatorsystems EFA-3 konnten sämtliche Messungen durchgeführt werden. Die Besonderheiten des Systems liegen in der spektralen Auswertung der Feldkomponenten, der isotropen Messung des elektrischen und magnetischen Feldes, sowie in der bisher unerreichten Präzision für Handmeßgeräte. Desweiteren ist neben der isotropen Messung auch eine Ein-Achs-Messung möglich, die in dieser Arbeit für die später ausgeführten Vergleiche herangezogen wurde.

Allgemein ist das Gerät optimiert für Anwendungen zum Schutz von Personen, wie in den Empfehlungen der VDE [7], den Regeln der Berufsgenossenschaft [1] sowie in verschiedenen nationalen und internationalen Gremien ausgeführt.

4. Kurzbeschreibung der ausgewählten Meßobjekte

Um Aufschluß über die Notwendigkeit neuer Meßtechnik für das elektrische Feld zu erhalten mußten verschiedene Meßumgebungen ausgewählt und näher untersucht werden.

In der ersten Messung wurde ein nahezu idealer Meßort ausgewählt. Ideal deshalb, weil die Meßumgebung weitgehendst frei von feldverzerrenden Objekten war.

Ein Beispiel hierfür ergibt sich unter einer Hochspannungstrasse, die sich in einem freien Feld befindet und die Masten weit von der Meßstelle entfernt liegen.

Feldverzerrungen in solch einer Meßumgebung können nur durch unebenes Bodenprofil und bei der Messung in unmittelbarer Nähe der Leiterseile entstehen.

Wie in [10] Seite 117 beschrieben sind Feldverzerrungen im Bereich der Leiterseile aufgrund der Phasenlage vorhanden. Jedoch in 1.5 m Höhe über dem Boden, müßten diese Feldverzerrungen aufgrund der deutlich höher hängenden Leiterseile kompensiert sein. Daher liegt es nahe, daß an diesen Stellen durchaus eine eindimensionale Messung ausreichend genaue Ergebnisse liefern könnte.

Als nächste Meßstrecke wurde der Einfluß eines Hochspannungsmastes auf die elektrischen Feldkomponenten ermittelt.

Mit Hilfe des obengenannten Simulationsprogrammes, konnten vorab zu erwartende Feldverzerrungen im Kreuzungsbereich einer Hochspannungstrasse beobachtet werden. Um diese Verzerrungen näher zu ermitteln, wurde eine Messung unter solch einem Kreuzungsbereich ebenfalls durchgeführt.

Die letzte Messung sollte eine typische Arbeitsplatzumgebung untersuchen. Dabei ergab sich die Möglichkeit Messungen in einem Umspannwerk durchzuführen, um dort die Exposition durch elektrische Felder festzustellen. Große Feldverzerrungen durch Schaltanlagen und dergleichen waren zu erwarten.

5. Simulation des elektrischen Feldes

5.1 Simulation mit dem Simulationsprogramm EFC-400

Wie erwähnt, wurden vor einer Messung die jeweils herrschenden Bedingungen mit Hilfe des obengenannten Simulationsprogramms simuliert. Dadurch ergab sich die Möglichkeit, frühzeitig besonders geeignete Meßstrecken oder Gegebenheiten auszuwählen und die zu erwartenden Feldverteilungen zu prognostizieren.

5.2 Simulation einer Hochspannungstrasse

5.2.1 Situation und Lagebeschreibung

Es soll hier eine Meßumgebung simuliert werden, bei der nur mit geringen Feldverzerrungen gerechnet werden muß. Als Simulationsobjekt ist eine aus 6 Leitungen mit zwei Masten bestehende Trassenführung gewählt. In Abschnitt 5 wurde diese Trasse näher durch Messung untersucht .

Die Daten der simulierten Trasse:

- Dreiphasige Leiteranordnung
- Masten Donau 110 kV

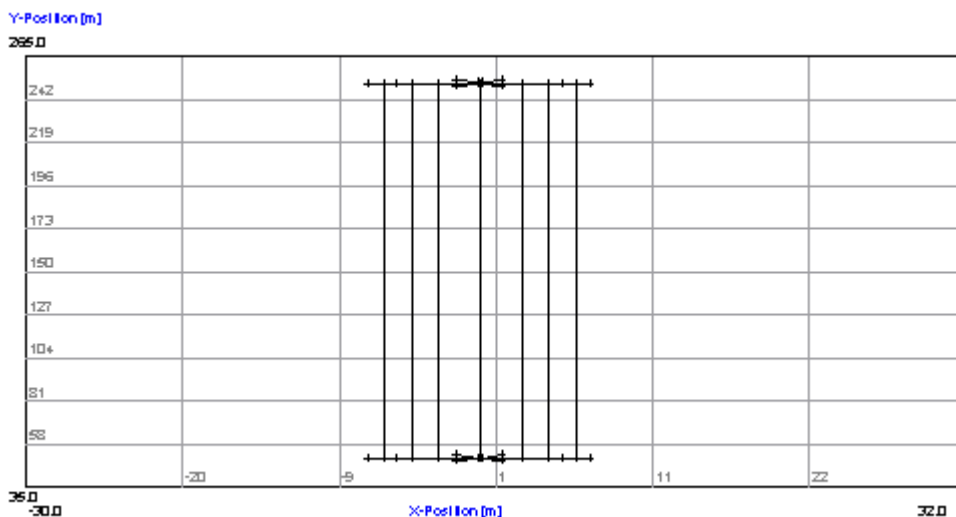


Bild 5.2: Anordnung der simulierten Trasse

5.2.2 Ergebnisse der Simulation

Als Simulationsdiagramm wurde die Darstellung in zweidimensionaler Ansicht gewählt. Aus diesem Diagramm kann die Feldverteilung im Bereich der Trasse erkannt werden.

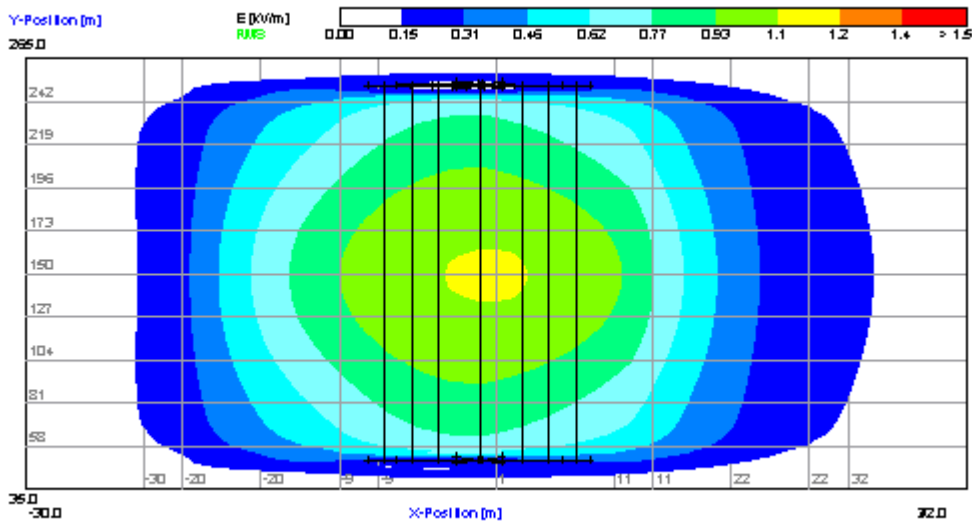


Bild 5.2.1: Zweidimensionale Ansicht der Simulation obiger Gegebenheit

Eine weitere Ansicht der Ergebnisse zeigt die eindimensionale Ansicht in Bild 5.2.2. Dabei ist der Anteil der Feldkomponenten ersichtlich. In der Mitte der Trassenführung, wo der Einfluß der Masten unberücksichtigt bleiben kann, ist der Anteil der z-Komponente um ein Vielfaches höher als die Komponenten der beiden anderen Raumrichtungen. Daraus läßt sich schließen, daß nur sehr geringe Feldverzerrungen auftreten werden und somit eine dreidimensionale Messung nicht zwingend erforderlich scheint. Der Toleranzbereich würde voraussichtlich nicht mehr als 5% betragen, wenn der relative Fehler zwischen ein- und dreidimensionaler Messung berechnet werden würde. Eine genaue Aussage kann in Abschnitt 5 gemacht werden, wo solch eine Stelle mit dem obengenannten Feldmeßgerät untersucht wurde.

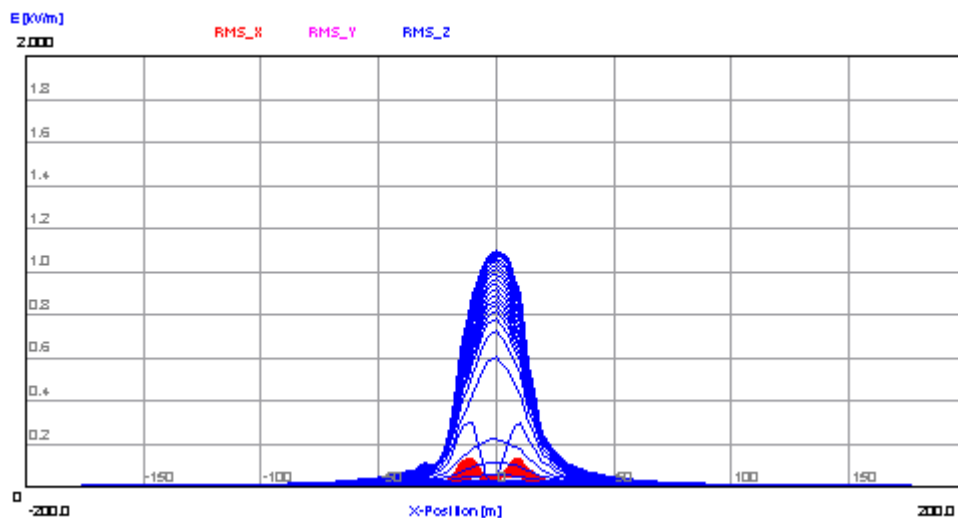


Bild 5.2.2: Eindimensionale Darstellung obiger Simulation

Die folgende Abbildung zeigt die dreidimensionale Darstellung des elektrischen Feldes (Effektivwert; RMS), wodurch die Feldverteilung längs der Trasse klar ersichtlich ist. Man erkennt, daß in der Mitte der Trasse ein Maxima auftritt, das auf die durchhängenden Leiterseile zurückzuführen ist. Die Minima treten an den Stellen auf, wo der Einfluß der Masten sich bemerkbar macht. In einer Entfernung bis zu 30 m, ist die feldverzernde Wirkung des Mastens (typabhängig) noch nachzuweisen.

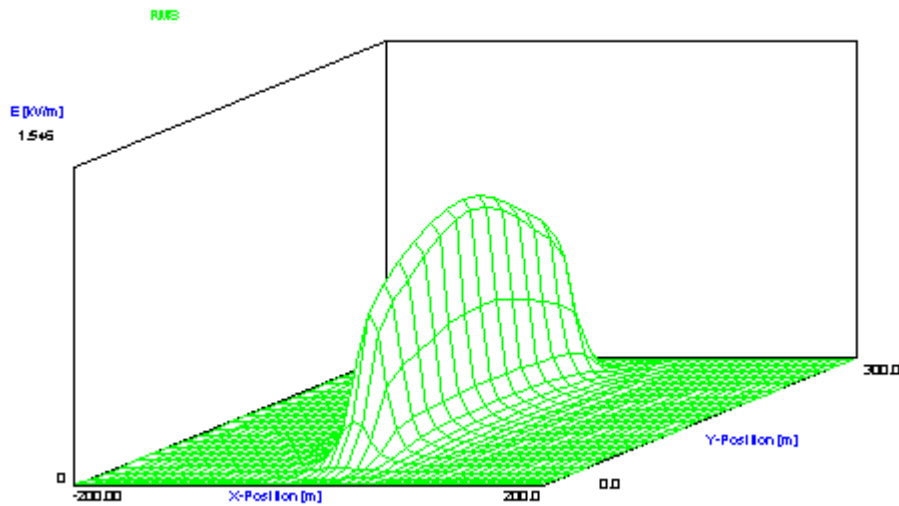


Bild 5.2.3: Dreidimensionale Ansicht der Simulation obiger Gegebenheit

5.3 Simulation einer Kreuzung

5.3.1 Situation und Lagebeschreibung

Als eine weitere Simulation sei eine für Feldverzerrungen verdächtige Stelle ausgewählt, wie sie sich an einer Kreuzung zweier oder mehrerer Hochspannungsleitungen ergeben könnte. Bild 5.3 zeigt die simulierte Anordnung der gewählten Kreuzung.

Die Daten der Simulation betragen:

- 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

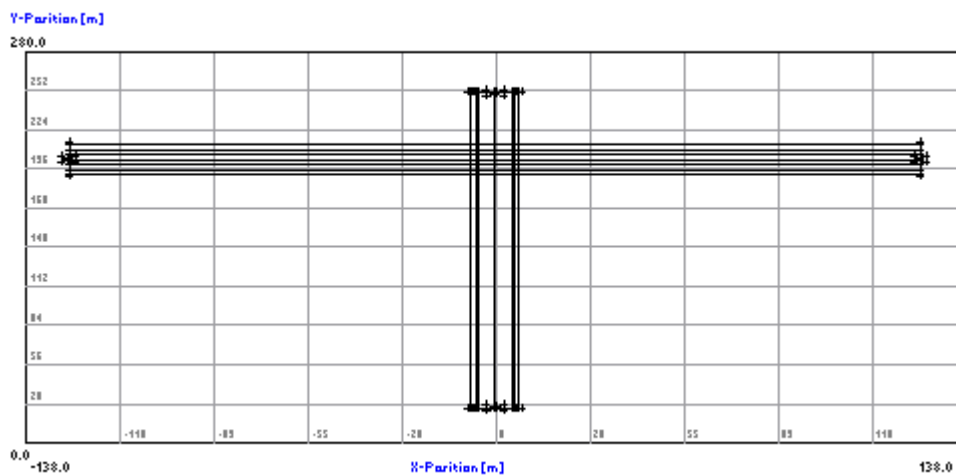


Bild 5.3: Anordnung der simulierten Trasse

5.3.2 Ergebnisse der Simulation

In Bild 5.3.1 ist die Feldverteilung im Bereich der Trasse zu erkennen. Dabei sind besonders die auftretenden Feldmaxima im Kreuzungsbereich zu beachten. An diesen Stellen summieren sich die Feldkomponenten der beiden Trassen auf. In der Mitte der Kreuzung ist das Feld deutlich kleiner als an den Rändern. Diese Gegebenheit folgt aufgrund des niederen Potentials der unten geführten Leitung, welche das Feld durch seine Leiter abschirmt.

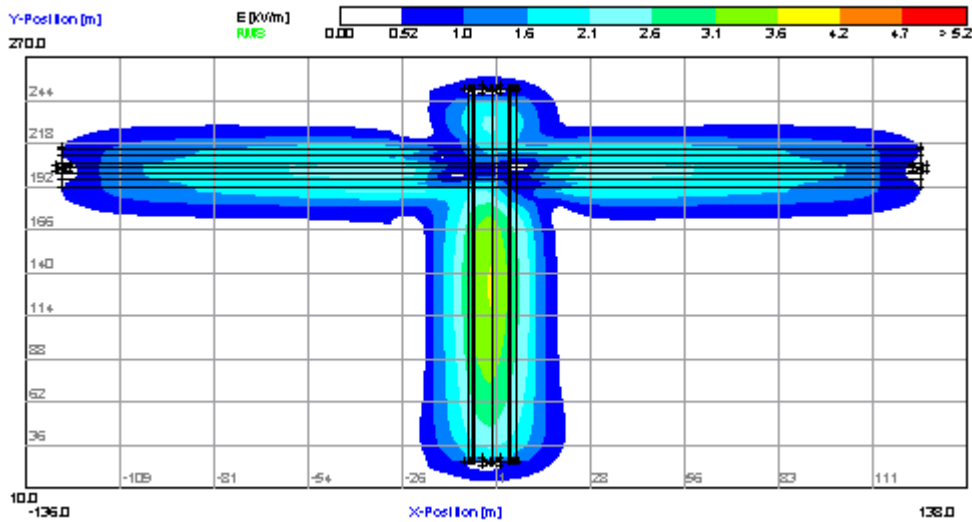


Bild 5.3.1: Zweidimensionale Ansicht der „verdächtigen Stelle“

Aus der eindimensionalen Ansicht Bild 5.3.2 ist ersichtlich, daß sich die einzelnen Feldkomponenten stärker auswirken als bei der Simulation ohne Kreuzung. Speziell sei hier auf die x- Komponente verwiesen, die im Kreuzungsbereich durchaus nennenswerte Feldstärkeanteile aufweist und ungefähr den doppelten Anteil aufweist als bei der Simulation einer Hochspannungstrasse. Dies ist auf die verzerrende Wirkung der Leiterseile, im Kreuzungsbereich zurückzuführen.

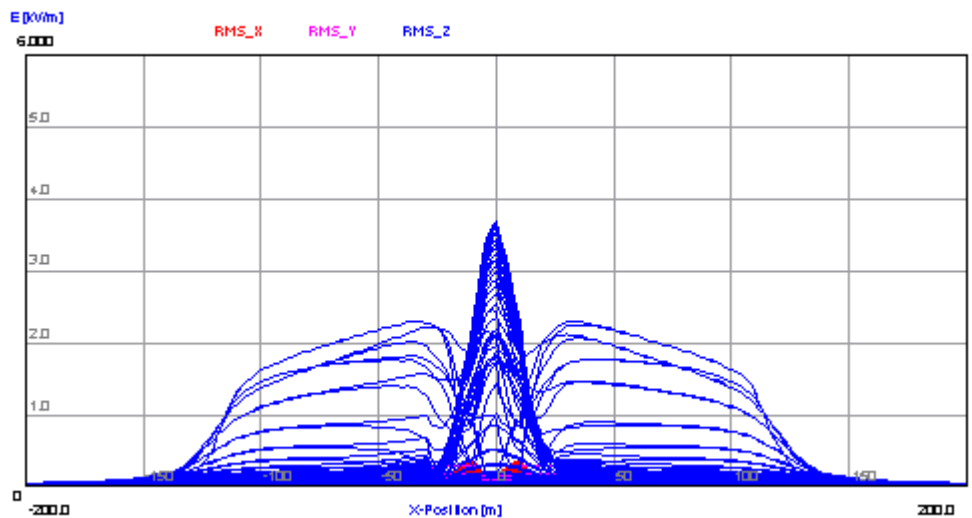


Bild 5.3.2: Eindimensionale Ansicht der Feldstärke der simulierten Kreuzung
 C:\studium\wago\ausarb.doc

Wie oben soll auch hier eine dreidimensionale Darstellung der Simulationsergebnisse gewählt werden, um Feldmaxima und Feldminima deutlich erkennbar zu machen.

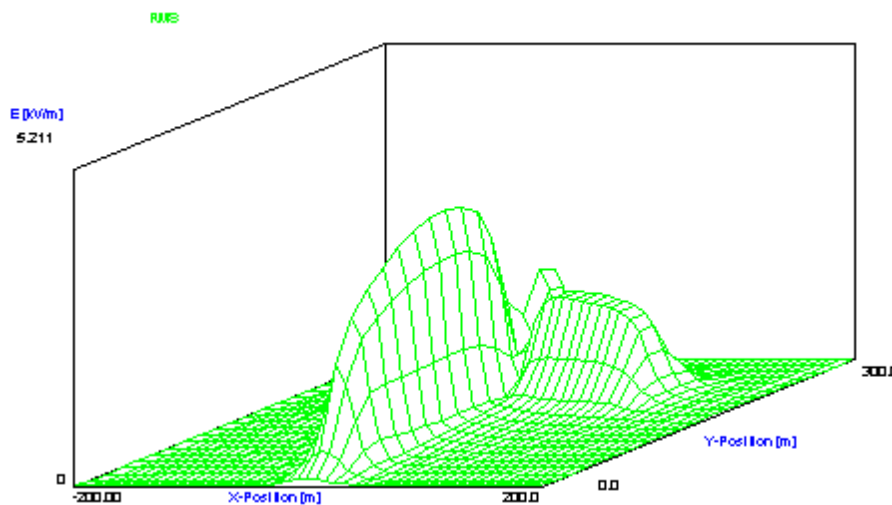


Bild 5.3.3: Dreidimensionale Darstellung der Simulationsergebnisse einer gekreuzten Trassenführung.

Aus Bild 5.3.3 ist der dreidimensionale Verlauf der elektrischen Feldstärke im Kreuzungsbereich oben genannter Trasse ersichtlich. Direkt am Kreuzungsmittelpunkt ist ein Feldminimum deutlich zu erkennen. Dies tritt aufgrund von Feldkompensationen auf. Die untere Leitung kompensiert das elektrische Feld der oberen Leitung. Die Minima im Randbereich werden durch die Hochspannungsmasten verursacht. Das Feldmaximum im vorderen Bereich der Darstellung, ist auf die höhere Spannung 220kV zurückzuführen.

6. Messung mit einem Feldmeßgerät

6.1 Darstellung der Meßergebnisse

Die folgenden Messungen werden in zwei Darstellungsvarianten aufgezeigt. Diagramm 1 zeigt den direkten Vergleich der Werte für das elektrische Feld bei ein- und dreidimensionaler Messung. Dabei wird die eindimensionale Messung mit Y-only und die dreidimensionale isotrope Messung mit isotrop bezeichnet. Diagramm 2 stellt die prozentuale Abweichung der beiden Messungen gegenüber, d.h. der Betrag des relativen Fehlers zwischen ein- und dreidimensionaler Messung wird berechnet.

$$F = \frac{isotrop - y_only}{isotrop} \cdot 100\%$$

F sei die prozentuale Abweichung der beiden Messungen zueinander.

Die Diagrammart wurden nach Aussagen aus den Normenreihen IEC833 [6] und VDE0848 [7] gewählt. Nach VDE0848 [7] wird eine dreidimensionale Messung gefordert. Nach IEC833 [6] ist eine eindimensionale Messung ausreichend. Die folgenden Meßergebnisse zeigen die Differenzen der beiden Meßverfahren.

6.2 Messung unter einer Hochspannungsleitung

6.2.1 Situation und Lagebeschreibung

Es sei wie bei der Simulation in Abschnitt 5 eine Meßstrecke angenommen, die orthogonal zu der Leitungsführung steht, und der Abstand zu den Masten so groß gewählt wird, daß kein Einfluß auf die Meßergebnisse zu erwarten ist.

Die anliegende Spannung beträgt 110 kV, das Gelände ist in x Richtung leicht abschüssig und die Temperatur am Meßtag war ca. 14°C, bei mittlerer Luftfeuchtigkeit.

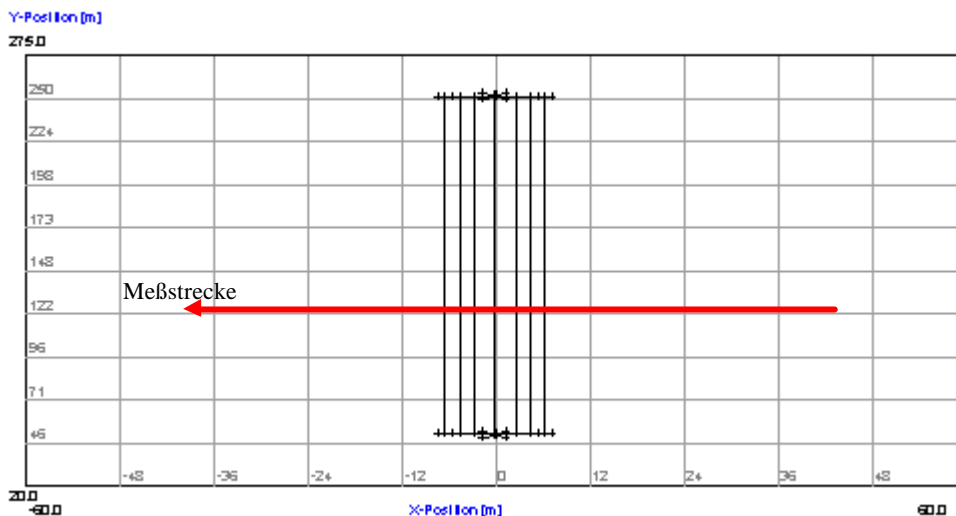


Bild 6.2: Meßstrecke zwischen einer Trasse

6.2.2 Ergebnis

Wie oben darauf hingewiesen, werden die Ergebnisse in den folgenden zwei Diagrammen aufgezeigt.

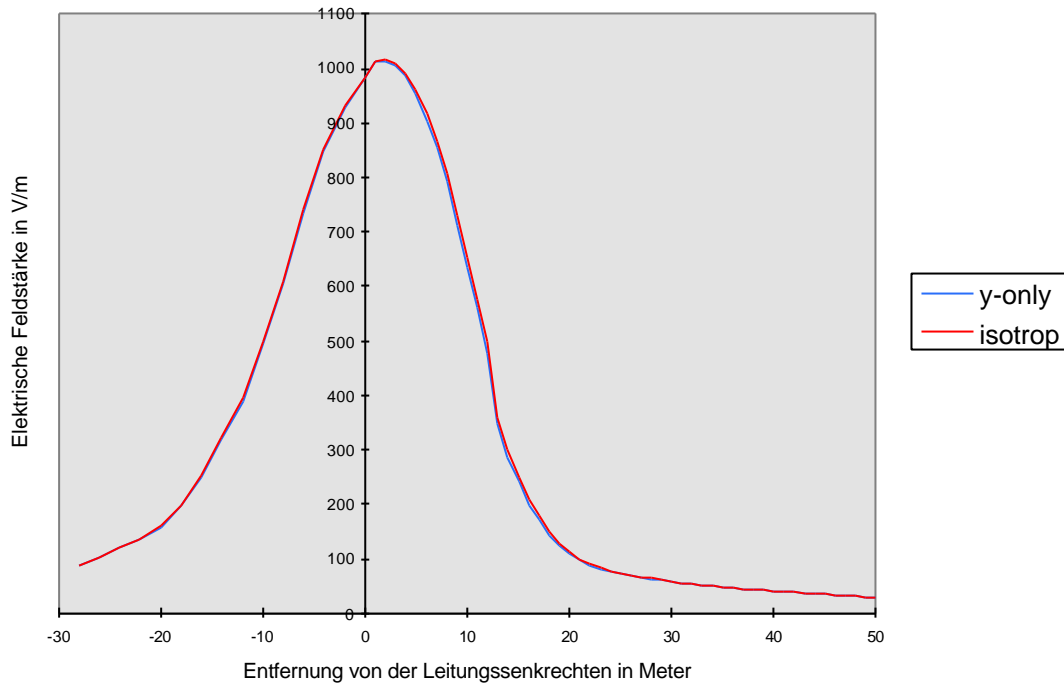


Bild 6.2.1: Meßwerte für das elektrische Feld bei ein- und dreidimensionaler Messung

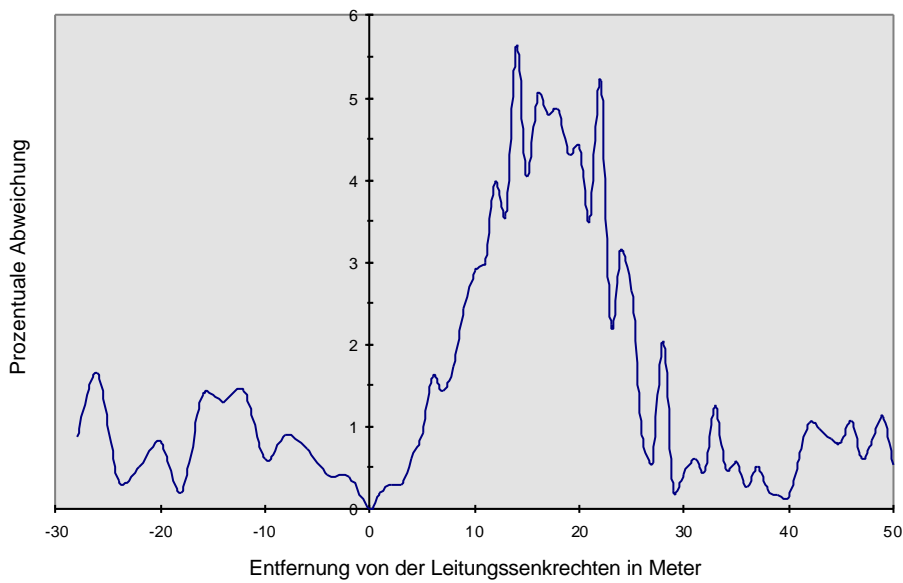


Bild 6.2.2: Relativer Fehler der beiden Messungen zueinander.

Aus den Meßkurven ist zu erkennen, daß der Meßunterschied zwischen eindimensionaler und dreidimensionaler isotroper Messung unter 6% liegt. Für diesen Fall würde das bedeuten, daß eine dreidimensionale Messung nicht zwingend erforderlich ist. Dies gilt jedoch nur, wenn die Expositionsumgebung frei von leitfähigen Objekten ist. Aus Bild 6.2.1 ist zu erkennen, daß die Werte für das elektrische Feld unter einer 110 kV Leitung im Bereich der Trassenmitte am höchsten sind, da der Abstand zwischen Leiter und Bodenprofil am kleinsten ist. Die Extrempunkte für das elektrische Feld unter dieser 110 kV Leitung liegen bei ca. 1 kV/m. Die Verschiebung des Maximums aus dem Nullpunkt von Bild 6.2.1, ist auf das abschüssige Bodenprofil zurückzuführen.

6.3 Messung durch einen Hochspannungsmast mittig hindurch

6.3.1 Situation und Lagebeschreibung

In der nächsten Messung wurde der Einfluß eines Hochspannungsmastes auf das elektrische Feld untersucht. Es liegt nahe, im Bereich eines Mastes sehr große Feldverzerrungen zu vermuten. Dies kann durch dreidimensionale Messung nachgewiesen werden.

Am Meßtag herrschten folgende Bedingungen: 20°C Außentemperatur, niedere Luftfeuchtigkeit; Bodenprofil trocken.

Die Meßstrecke wurde mittig durch einen öffentlich zugänglichen 110 kV Mast hindurch gewählt. Der Mastfußabstand beträgt 8 Meter. Eine Simulation der Mastnähe scheidet ebenso wie eine sinnvolle eindimensionale Messung aus. Bei der Simulation in unmittelbarer Nähe der Mastfüße können aufgrund des Ersatzladungsverfahrens (Berechnungsmethode der Simulation: siehe hierzu Anhang A) nennenswerte Feldstärkebeträge entstehen, die in der Praxis nicht vorliegen.

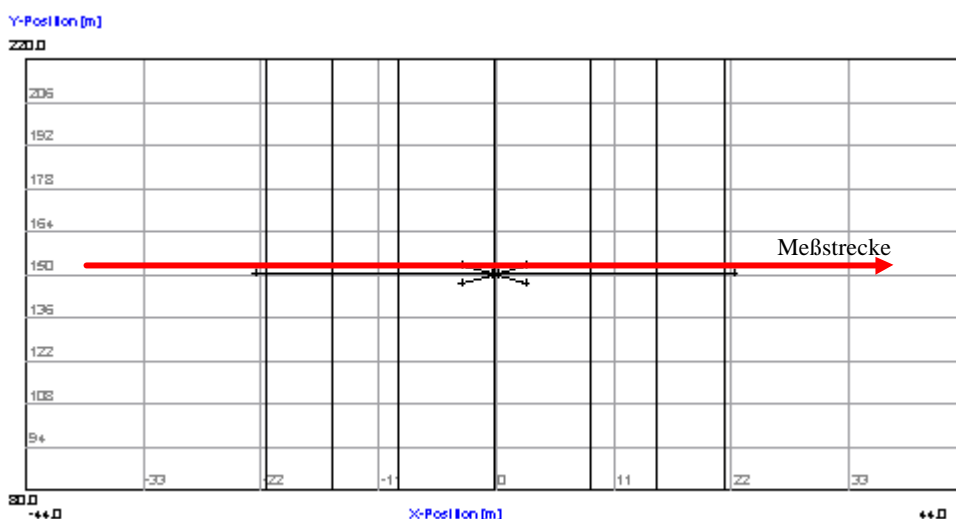


Bild 6.2.1: Meßstrecke durch Hochspannungsmast mittig hindurch

6.3.2 Ergebnis

Aus den folgenden Meßwerten ist ersichtlich, daß eine dreidimensionale Messung im Bereich des Masten aufgrund der feldverzerrenden Wirkung des Masten, unumgänglich ist. Sinnvolle Werte, die den tatsächlichen Feldverhältnissen am Masten entsprechen, erhält man nur durch Betrachtung aller drei Feldkomponenten. Aus Bild 6.3.1 erkennt man den Unterschied zwischen ein- und dreidimensionaler Messung. Die Ausrichtung des Sensors zur eindimensionalen Messung wurde so gewählt, daß zur Leitungssenkrechten hin ausgelotet wurde.

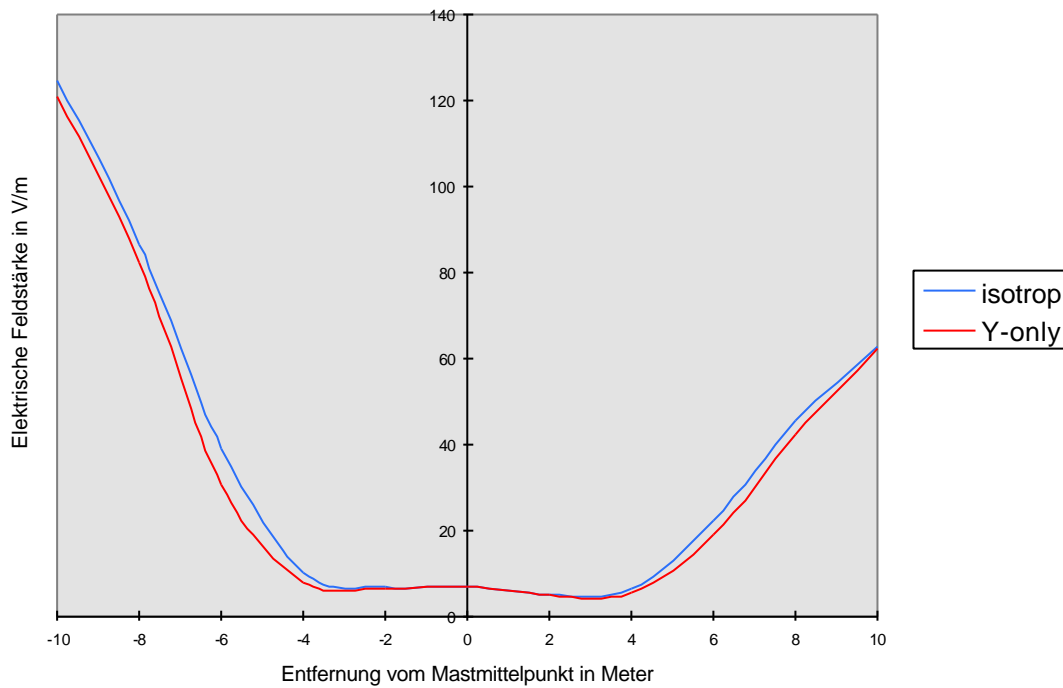


Bild 6.3.1: Direkter Vergleich ein- und dreidimensionale Messung im Bereich eines Hochspannungsmast

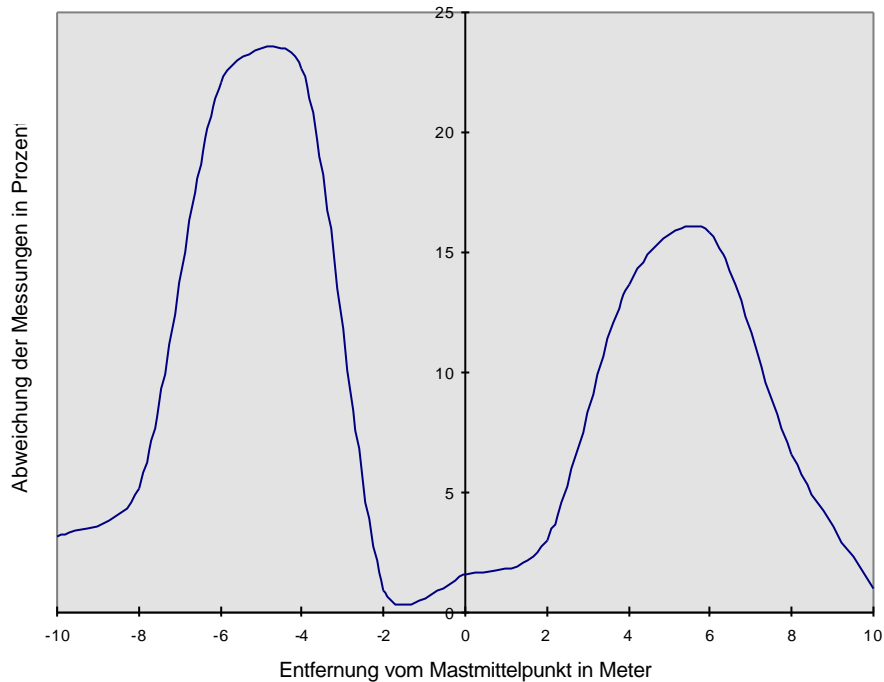


Bild 6.3.2: Relativer Fehler in Prozent

Ein direkter Vergleich der Meßwerte für das elektrische Feld ist in Bild 6.3.1 dargestellt. Daraus erkennt man die feldverzerrende Wirkung des Masten. Aufgrund dieser Wirkung haben die drei Feldkomponenten unvorhersehbare Feldstärkeanteile.

Deshalb ist bei einer eindimensionalen Messung der angezeigte Wert für das elektrische Feld immer kleiner als bei einer dreidimensionalen Messung.

Bild 6.3.2 zeigt den relativen Fehler, der bei eindimensionaler Messung toleriert werden müßte. Abweichungen von bis zu 24 % sind keine Seltenheit.

6.4 Messung an einer Kreuzung

6.4.1 Situation und Lagebeschreibung

Wie oben bereits simuliert, soll hier ein Kreuzungsbereich durch Messung näher untersucht werden. Die Trasse beinhaltet die gleichen Komponenten wie bei der Simulation.

Die Daten der Messung betragen:

- 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, Bodenprofil sehr feucht.

Bild 6.4.1 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.

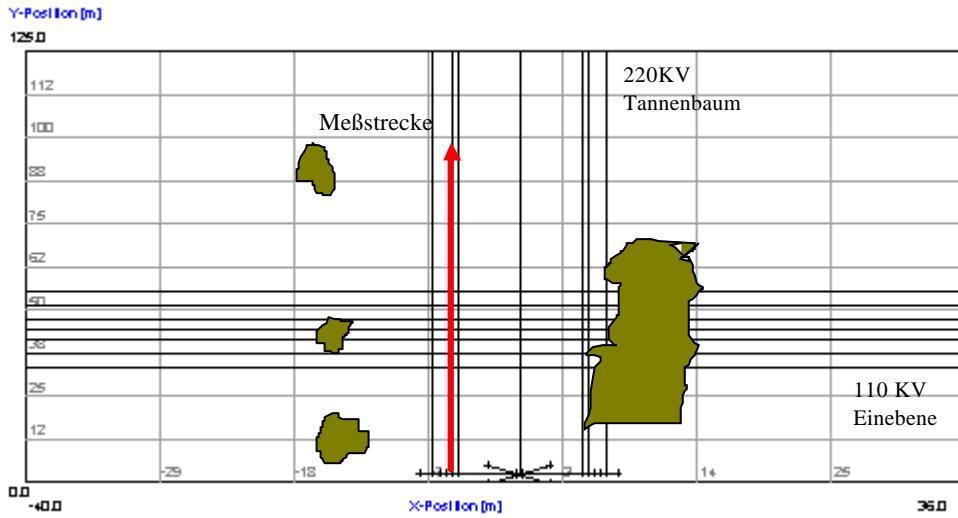


Bild 6.4: Meßstrecke unter zwei sich kreuzenden Hochspannungstrassen.
Grüne Felder stellen Sträucher bzw. Bäume dar.

6.4.2 Ergebnis

Bild 6.4.1 zeigt den Feldstärkeverlauf der Messung. Der Startpunkt der Messung befindet sich im Diagramm genau mittig am Mast. Die letzte Messung wurde am Punkt $y = 60\text{m}$ durchgeführt.

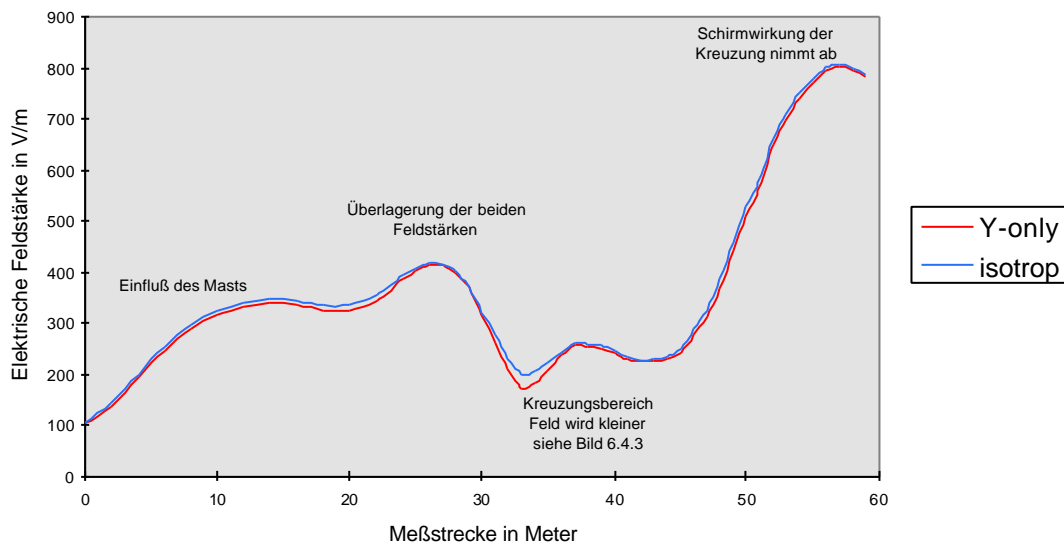


Bild 6.4.1: Feldstärkeverlauf des elektrischen Feldes bei sich kreuzenden Hochspannungstrassen.

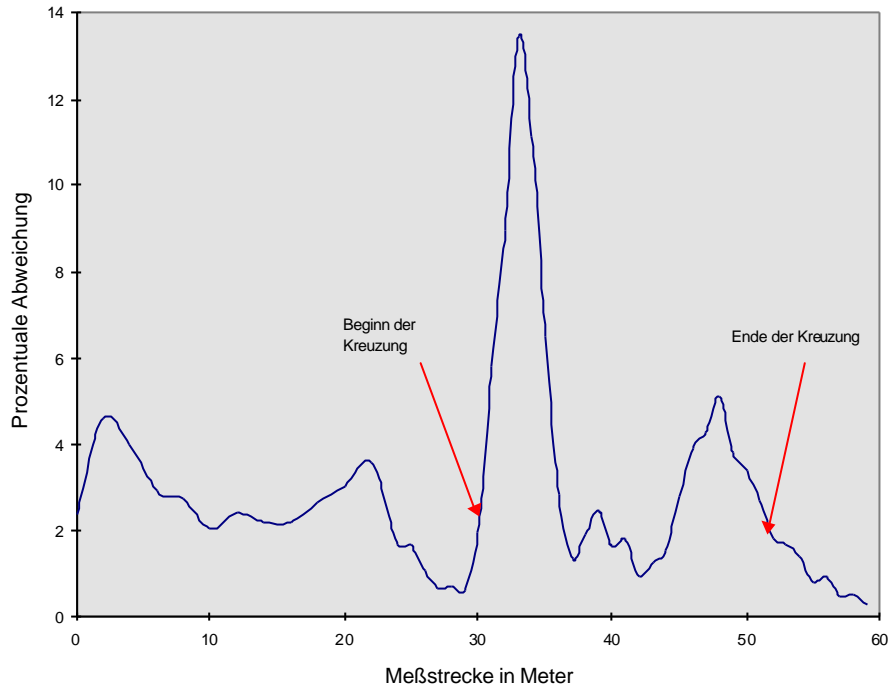


Bild 6.4.2: Relative Abweichung zwischen ein- und dreidimensionaler Messung.

Aus Bild 6.4.1 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 Aufsummierung der Feldstärken der beiden Trassen. Im Bereich der Kreuzung wird die Feldkomponente der oberen Trasse kompensiert, sodaß 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 Mastes endet und aus dem Kreuzungsbereich hinausgemessen wurde.

Bild 6.4.2 zeigt die relative Abweichung zwischen der ein- und dreidimensionalen Messung. Ihre Maxima treten wie schon bei der Simulation vermutet, im Randbereich der Kreuzung auf. Die Werte betragen bis zu 12 %.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die unteren Leiterseile im Kreuzungsbereich die Feldstärkekomponenten der oberen Leiterseile kompensiert.

Der nichtlineare Verlauf im Kreuzungsbereich in Bild 6.4.1, ist dort auf unebenes Bodenprofil zurückzuführen.

Aus diesem Grund soll in Bild 6.4.3 dieser Bereich noch einmal genauer dargestellt werden.

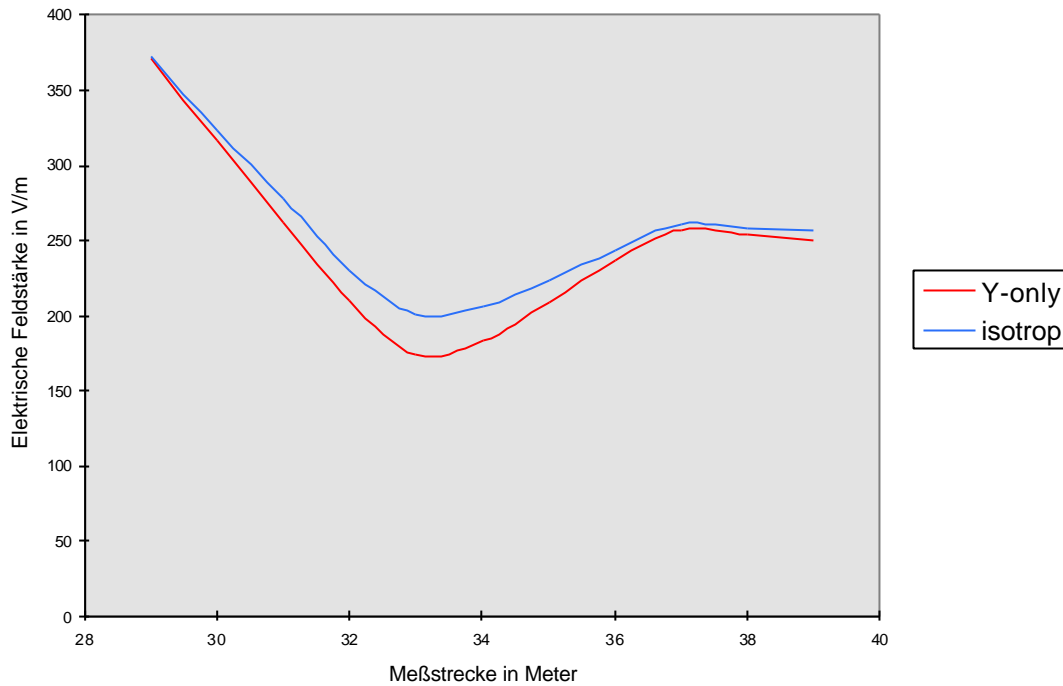


Bild 6.4.3: Gezoomte Darstellung des Kreuzungsbereichs aus Bild 6.4.1

Aus Bild 6.4.3 erkennt man sehr deutlich die Einflußnahme des Bodenprofils auf das Meßergebnis. Ist in der Meßumgebung stark unebenes Bodenprofil vorhanden, so empfiehlt es sich, dreidimensional zu messen.

6.5 Messung in einem Umspanwerk

Mit freundlicher Unterstützung der Neckarwerke Esslingen AG ergab sich die Möglichkeit, Messungen in einer Arbeitsplatzumgebung wie sie sich in einem Umspanwerk ergibt, durchzuführen.

6.5.1 Situation und Lagebeschreibung

Am Meßort wurde eine Meßstrecke ausgewählt, die aufgrund zahlreicher Leiteranordnungen, Isolatoren und Trägern nicht simuliert werden kann. Das folgende Bild zeigt die prinzipielle Anordnung des Meßortes.

Draufsicht:

Seitenansicht:

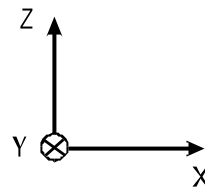
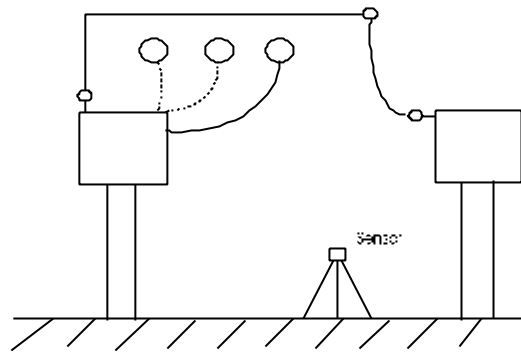
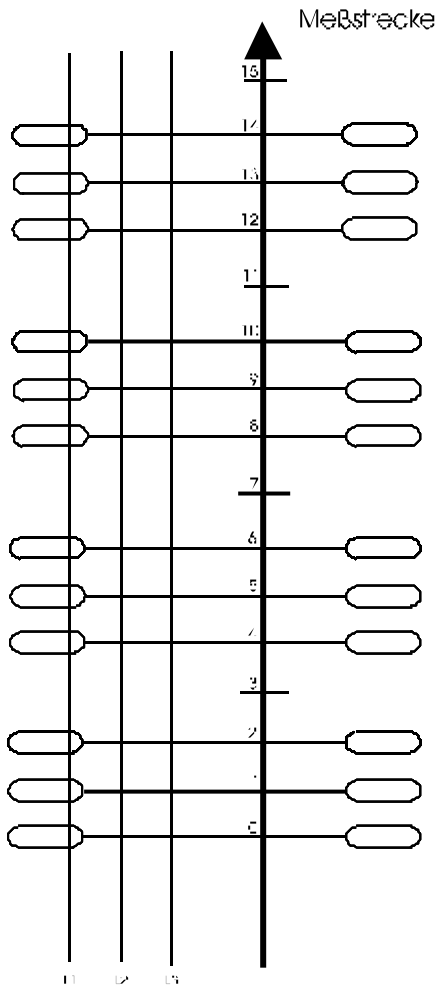


Bild 6.5: Meßstrecke in einem Umspannwerk

6.5.2 Ergebnis

Folgende Meßkurven wurden bei der oben skizzierten Meßstrecke aufgenommen. Am Meßtag herrschten folgende Bedingungen: Außentemperatur 5°C, mittlere Luftfeuchtigkeit, Bodenprofil sehr feucht.

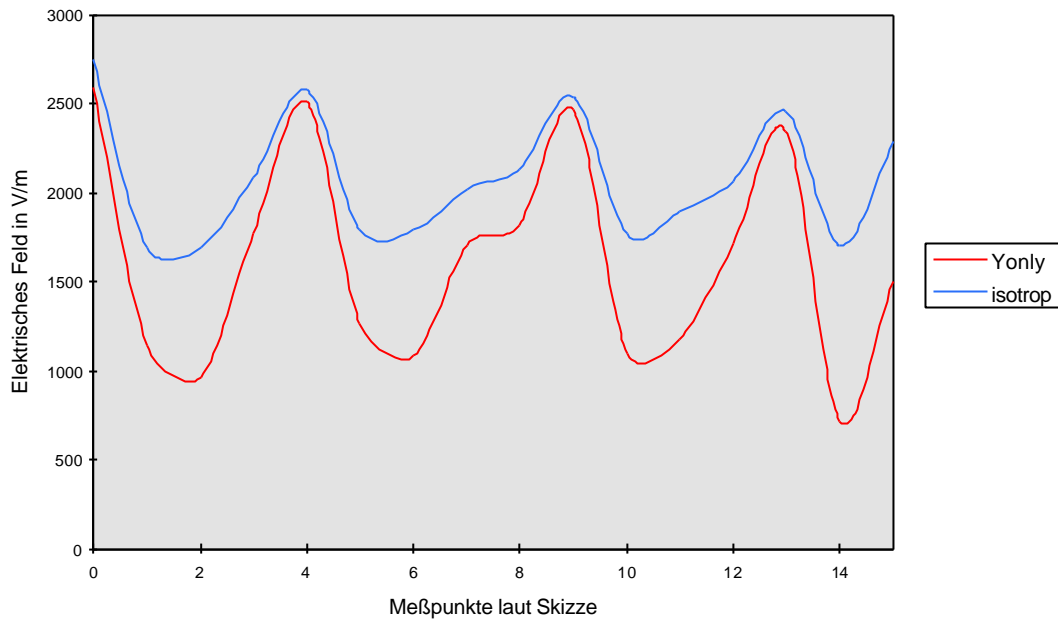


Bild 6.5.1: Direkter Vergleich der Meßwerte zwischen ein- und dreidimensionaler Messung

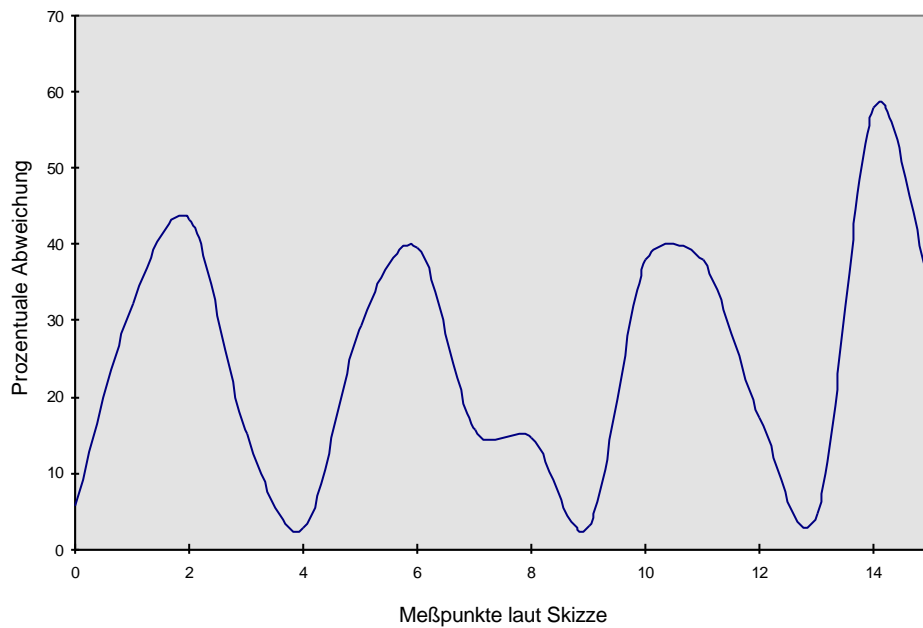


Bild 6.5.2: Relativer Fehler der Messungen zueinander

Aus den Meßergebnissen ist klar zu erkennen, daß durch die Feldverzerrungen von gekreuzten Leitungen, Schaltanlagen, Stromschienen usw. eine dreidimensionale gegenüber einer eindimensionalen Messung gravierende Abweichungen zeigt. Bild 6.5.2 zeigt, daß der relative Fehler mit dem Meßort schwankt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß nicht nur direkt unter spannungsführenden Leitern gemessen wurde, sondern auch dazwischen. An einigen Stellen sind die angezeigten Werte der eindimen-

sionalen Messung um über die Hälfte niedriger, als die der dreidimensionalen Messung. Diese markanten Meßstellen befinden sich dort, wo zwischen den einzelnen Leitern gemessen wurde. Eine Simulation kann bei der Vielzahl von feldverzerrenden Objekten noch nicht durchgeführt werden. Eine eindimensionale Messung scheidet aus oben erwähnten Gründen ebenso aus, da die Vektorkomponenten des Feldes nicht exakt vorhersehbar sind. Der angezeigte Wert der elektrischen Feldstärke bei eindimensionaler Meßtechnik ist damit immer kleiner als der tatsächliche Wert. Dem Messenden wird in solch einer Situation eine „sichere“ Arbeitsplatzumgebung vorgetäuscht, was aus arbeitsrechtlichen Gründen nicht toleriert werden kann. Aufgrund dieser Tatsache zeigt sich die relevante Schwäche der IEC833 [6], welche ausschließlich für die Messung in Umgebungen von Hochspannungsleitungen definiert ist.

7. Interpretation

Untersuchung einer von verzerrenden Objekten freien Umgebung

Wenn an einem Meßort keine feldverzerrenden Objekte vorhanden sind, ist eine eindimensionale Meßtechnik wie in der IEC833 ausgeführt, ausreichend. Eine Simulation ist leicht nachzuvollziehen und die Simulationsergebnisse sind sehr exakt. Die erhaltenen Feldkomponenten der dreidimensionalen Messung enthalten fast nur senkrechte Anteile, sodaß ein relativer Fehler bei der Betrachtung zwischen ein- und dreidimensionalen Messung unter dem Toleranzbereich von 5% liegt.

Untersuchung einer Kreuzung

Die oben dargestellten Kreuzungen seien es die Simulierten oder die Gemessenen bieten ein gutes Verständnis für das Verhalten von elektrischen Feldkomponenten. Ein direkter Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Werten ergibt, daß an beiden Darstellungsarten Bild 5.3.1 und Bild 6.4.1 in der Kreuzungsmitte ein lokales Minimum vorhanden ist. Einen genauen Aufschluß über dieses Minimum ergibt die dreidimensionale Messung. Dort zeigt sich, daß aufgrund des Bodenprofils die Meßwerte zwar leicht schwanken, aber prinzipiell aufgrund der Schirmwirkung der unteren zur oberen Leitung ein Minimum der Feldstärke auftritt. Meßpunkt 0 bis 15 in Bild 6.4.1 zeigt den Einfluß des Mastes in seiner unmittelbaren Umgebung. Erst nach der Kreuzung ist der Einfluß so gering, daß er nicht mehr beachtet werden muß. Nach einer Entfernung von 50 m würden die Meßwerte konstant bleiben, bis zum Einfluß des nächsten Masts.

Die Simulation bietet eine Möglichkeit, sich über die Feldstärken und Verhältnisse am Meßort zu informieren. Exakte Werte kann die Simulation jedoch aufgrund von Masten, unebenem Bodenprofil, Höhe der Leiterseile und Momentanspannungen nicht liefern.

Mit der eindimensionalen Messung können zwar zum Teil richtige Meßwerte ermittelt werden. An den Kreuzungsrändern jedoch, ist eine dreidimensionale Messung notwendig, da ein Meßfehler von bis zu 14 % nicht toleriert werden kann.

Untersuchung im Umspannwerk

Durch erhebliche Abweichungen zwischen eindimensionaler- und dreidimensionaler Meßwertaufnahme, ist in diesem Fall eine dreidimensionale Messung der elektrischen Feldstärke zwingend erforderlich. Ein relative Abweichung von bis zu 60 % der beiden Messungen zueinander kann und darf nicht toleriert werden.

8. Fazit

Um das elektrische Feld normenkonform zu messen, muß nach VDE [7] die elektrische Ersatzfeldstärke ermittelt werden. Hieraus ergibt sich quasi der Definition die Forderung nach dreidimensionaler isotroper Meßtechnik.

Arbeitsplatzumgebungen mit Exposition durch elektrische Felder, müssen bei Feldverzerrungen durch Maschinen, Schaltanlagen, Stromschienen oder ähnlichem dreidimensional untersucht werden. Eine eindimensionale Messung scheidet aus, da nicht vorhergesagt werden kann, daß eine Feldkomponente deutlich größer ist als die beiden anderen, und eine exakte Ausrichtung der Meßplatten zur Feldquelle hin nicht möglich ist.

An einem idealen Meßort, der frei von feldverzerrenden Objekten ist, kann mit eindimensionaler Meßtechnik eine sinnvolle Untersuchung des elektrischen Feldes nur dann durchgeführt werden, wenn:

- die Feldquelle senkrecht auf den Sensor wirkt, und
- die orthogonale Feldkomponente deutlich größer ist als die beiden anderen.

Sind feldverzerrende Objekte in der Meßumgebung vorhanden, so ist der Meßwert der eindimensionalen Messung immer kleiner als der, der dreidimensionalen Messung. Dem Messenden wird in solch einer Situation eine unbedenkliche, unter den Grenzwerten liegende Meßumgebung vorgetäuscht, sodaß die Normenkonformität zur VDE [7] verletzt wird. Dies muß auch im Hinblick auf juristische Auseinandersetzungen hin beachtet werden.

9. Literaturverzeichnis

- [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] Messung niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder EMVU
Kongress vom 29.03.1995; Referent Dietmar Tandler; Wandel & Goltermann GmbH & Co.

- [4] 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

- [5] Theoretische Elektrotechnik ; Küpfmüller / Kohn Springer Lehrbuch

- [6] International Standard IEC 833 Measurement of power- frequency electricfields

- [7] Deutsche Norm VDE 0848 Teil 1 Gefährdung durch elektromagnetische Felder Meß- und Berechnungsverfahren.

- [8] Deutsche Norm VDE 0848 Teil 4 Sicherheit bei elektromagnetischen Feldern
Grenzwerte für Feldstärken zum Schutz von Personen im Frequenzbereich von 0Hz bis 30Khz.

- [9] K. Simonyi Theoretische Elektrotechnik; VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften Berlin 1989

- [10] Küpfmüller und Kohn; Theoretische Elektrotechnik Springer Verlag
14. verbesserte Auflage

Anhang A

Bestimmung von Feldern im Niederfrequenzbereich durch theoretische Berechnungsverfahren

Der vorliegende Anhang soll einen prinzipiellen Überblick über die Möglichkeit von Feldberechnungen vermitteln. Dabei wird gezeigt, wie bei der rechnerunterstützten Berechnung von magnetischen und elektrischen Feldern vorgegangen werden kann.

A 1. Berechnungsverfahren für die magnetische Flußdichte

Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem magnetischen Feld umgeben. Das Feld kann durch Feldlinien veranschaulicht werden, die konzentrische Kreise um den Leiter bilden. Die Richtung der Feldlinien ist durch die Rechte-Hand-Regel gegeben, wobei der Daumen in die technische Stromrichtung zeigt. Die magnetische Flußdichte einer Leiterkonfiguration berechnet sich nach dem Gesetz von Biot-Savart aus einer Superposition von Teilfeldern einzelner Leitersegmente (Bild1 Anhang A). Jeder infinitesimale Teilleiter trägt zum Gesamtfeld den Anteil

$$d\vec{B}_{(t)} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \cdot I_{(t)}$$

bei $d\vec{B}$ und I sind im allgemeinen zeitabhängig und werden zur vereinfachten Berechnung in komplexe Größen transformiert. Legt man den i -ten Teilleiter der Länge L in den Ursprung Bild 1 Anhang A des Koordinatensystems parallel zur x -Achse, dann berechnet sich sein Feldbeitrag im Aufpunkt $P(x,y,z)$ zu:

$$|\vec{B}_{i(t)}| = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi \cdot r} \cdot I_{i(t)} \left[\frac{L_i - x_p}{\sqrt{(L_i - x_p)^2 + r^2}} + \frac{x_p}{\sqrt{x_p^2 + r^2}} \right]$$

mit den Vektorkomponenten

$$B_{xi(t)} = 0$$

$$B_{yi(t)} = -\frac{z_p}{\sqrt{y_p^2 + z_p^2}} \cdot |\vec{B}_{i(t)}|$$

$$B_{zi(t)} = \frac{y_p}{\sqrt{y_p^2 + z_p^2}} \cdot |\vec{B}_{i(t)}|$$

Jedes Leiterseil wird nach dieser Methode in eine vom Anwender vorzugebende Anzahl Teilleiter segmentiert.

Für die Berechnung der Feldstärke wird der betrachtete Aufpunkt in das lokale Koordinatensystem des jeweiligen Segmentes transformiert. Dies geschieht durch eine Verschiebung und anschließende

Rotation. Damit erhält man den Anteil des Segmentes zum gesamten Feldvektor, der allerdings noch in das Weltkoordinaten- System zurücktransformiert werden muß.

Vektorielle Addition der Feldbeiträge liefert den Feldvektor

$$\vec{B}_{(t)} = \begin{pmatrix} B_{x(t)} \\ B_{y(t)} \\ B_{z(t)} \end{pmatrix}$$

Im Falle eines sinusförmigen Stromes mit fester Frequenz

$$I_{(t)} = \hat{I} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

wird für den Effektivwert (RMS) die Beziehung

$$I = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}}$$

zugrunde gelegt. Der Feldvektor beschreibt in diesem Fall eine feststehende Rotationsellipse, deren große Halbachse den Spitzenwert darstellt. Wenn ein Gemisch verschiedener Frequenzen vorliegt, werden die Feldbeiträge der einzelnen Segmente zeitlich entwickelt, aufaddiert und anschließend über die Zeit integriert.

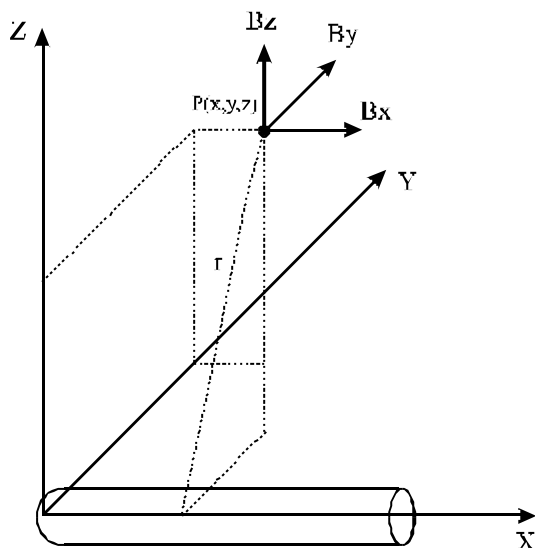


Bild 1Anhang A: Teilleiter im Koordinatensprung

A 2. Berechnungsverfahren für das elektrische Feld

Die elektrische Feldstärke kann durch den negativen Gradienten des skalaren Potentials $\Phi_{(x,y,z)}$ dargestellt werden:

$$\vec{E}_{(\vec{r})} = -\vec{\nabla} \cdot \Phi_{(\vec{r})}$$

mit

$$\vec{\nabla} = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix}$$

Der Potentialunterschied beschreibt die Arbeit, die notwendig ist, um eine Testladung vom Bezugspunkt mit $\Phi_{(x,y,z)} = 0$ zum Punkt mit Potential Φ zu verschieben. In der Praxis wird der Bezugspunkt in das Unendliche gelegt. Das Potential bei Annäherung an eine Quellladung bis zum Punkt A ergibt sich dann allgemein:

$$\Phi_{A(\vec{r})} = \frac{W}{q} = \int_{\infty}^A \vec{E}_{(\vec{r})} \cdot d\vec{s}$$

Für ein linienförmiges Ladungssegment, das parallel zu x-Achse im Ursprung liegt, löst sich das Integral wie folgt:

$$\Phi_{i(x_p, y_p, z_p, l)} = \frac{Q_i}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \ln \frac{(x_p) + \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + z_p^2}}{(x_p - l_i) + \sqrt{(x_p - l_i)^2 + y_p^2 + z_p^2}}$$

Der negative Gradient liefert den Feldbeitrag eines Teilleiters zum elektrischen Feld im Aufpunkt $P_{(x,y,z)}$ analog zum magnetischen Feldvektor.

Im wesentlichen gleicht der gesamte Rechenprozess dem des magnetischen Feldes. Im Gegensatz zu den Teilleiterströmen sind diese nicht vorgegeben, sondern müssen erst mit Hilfe der Oberflächenspannung auf den Leitern berechnet werden.

Dazu wird in das Zentrum jedes Leitersegments eine Linienladung gelegt, deren Größe durch Erfüllung obiger Gleichung für das Oberflächenpotential U bestimmt ist. Im Fall von n Leitersegmenten führt dies zu einem Gleichungssystem mit n Unbekannten:

$$U_i = PK_{ij} Q_j$$

PK_{ij} wird als Potentialkoeffizientenmatrix bezeichnet. Das invertieren von PK_{ij} liefert die gesuchte Verteilung der Linienladungen.

Das Problem liegt hierin, die Inverse einer Matrix zu berechnen. Die Rechenzeit ist hier erheblich, weil diese erstens proportional zu n^3 ist und zweitens der Speicherbedarf schon für eine 5000×5000 Matrix 100 MB beträgt.

In der Praxis sind 1000-2000 Segmente völlig ausreichend, und in Fällen von nur einigen Mastfeldern fällt die Rechenzeit, die für die Inversion der Potentialkoeffizientenmatrix benötigt wird, neben der eigentlichen Feldberechnung kaum ins Gewicht.

Insgesamt ist die Rechenzeit für das elektrische Feld 2-3 mal länger als beim Magnetfeld. Dies ist auf die Matrixinversion zurückzuführen, und auf die Anwendung des Spiegelladungsverfahrens. Der Erdboden einfluß ist nicht wie beim Magnetfeld zu vernachlässigen, sondern dieser stellt gegenüber dem hochohmigen Widerstand der Umgebungsluft einen nahezu idealen Leiter dar. Die elektrischen Feldlinien stehen praktisch senkrecht auf dem Erdboden. Dem wird Rechnung getragen, indem die gesamte oberirdische Leiterkonfiguration am Erdboden gespiegelt und mit umgekehrtem Vorzeichen versehen wird, was den doppelten Rechenaufwand zur Folge hat.

Der interessierte Leser sei für den weiteren Einstieg in die Theorie der Feldberechnung, die über den Rahmen dieser Studienarbeit hinausgeht, auf die umfangreiche Fachliteratur verwiesen.