

Forschungsinst. der FGH e.V.
Name der Forschungsstelle(n)

12361 N / III
AiF-Vorhaben-Nr. / GAG
01.01.00 bis 31.12.01
Bewilligungszeitraum

Schlußbericht für den Zeitraum : 01.01.00 bis 31.12.01

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema : Messung und Berechnung magnetischer Felder

Mannheim, 7. Juni 2002

Ort, Datum

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einführung	3
2 Magnetfelder des Drehstroms	5
3 Referenzanordnung	7
4 Berechnung der magnetischen Felder	11
5 Messung der magnetischen Feldstärken	15
5.1 Messprinzipien	15
5.2 Messeinrichtungen	16
5.3 Messergebnisse des ungestörten Drehstrom-Magnetfeldes	18
5.4 Stromabhängigkeit des ungestörten Drehfeldes	22
5.5 Einflüsse von Metallbewehrungen	24
5.6 Einflüsse von Oberschwingungen	26
6 Folgerungen	28
7 Zusammenfassung	30
8 Literaturverzeichnis	31

1 Einführung

Entsprechend den von der ICNIRP [1] empfohlenen zulässigen Werten setzt die 26. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder) Grenzwerte für niederfrequente Felder fest. Die ICNIRP-Werte beziehen sich auf eindimensionale rein sinusförmige Felder. Ein Großteil der von Mittel- und Niederspannungsanlagen erzeugten Magnetfelder ist jedoch dreidimensional, der Vektor der magnetischen Feldstärke beschreibt einen Ellipsoid, dessen Lage im Raum abhängig von der Geometrie der Leiterführung ist. Darüber hinaus enthalten die bei Anlagen auftretenden Ströme Oberschwingungen. Die durch sie verursachten Magnetfelder sollten nach der Verordnung getrennt gemessen oder berechnet und anschließend nach einem festgelegten Superpositionsprinzip bewertet werden.

Der Nachweis, dass eine felderzeugende Anlage den Bestimmungen der Verordnung entspricht, kann durch Messung oder Berechnung erbracht werden. Für jedes Rechenprogramm ist ein Vergleich mit Messungen erforderlich. In den zu betrachtenden Bereichen sind auch Fremdfelder, z. B. von Niederspannungsanlagen, zu berücksichtigen. Diese Vorgaben enthalten drei Aufgabenbereiche, die einer umfassenden Klärung bedürfen:

- **Messung der magnetischen Felder**

Die Messtechnik zur Messung der magnetischen Felder ist in den Normen festgelegt oder empfohlen [2,3], und die auf dem Markt befindlichen Messgeräte folgen in der Regel dieser Normung.

Die Kalibrierung der erhältlichen Magnetfeld-Messgeräte erfolgt in der Regel in einem eindimensionalen Magnetfeld, z.B. in einer Helmholtz-Spule [4,5,6]. Die in elektrischen Anlagen auftretenden Felder sind jedoch zwei- oder dreidimensional. Für solche Magnetfelder, die räumliche Änderungen aufweisen, geschieht keine Überprüfung der erreichbaren Messgenauigkeiten. Der durch die räumliche Änderung der magnetischen Feldstärke erzeugte Messfehler wird abhängig sein vom Grad der Änderung und von der Anordnung und der Größe der Messsonden.

- **Vergleich der Rechenprogramme mit Messungen**

Berechnungsverfahren für die Magnetfelder von elektrischen Energieanlagen sind seit Beginn der Diskussionen um die Beeinflussung des Menschen durch solche Felder erstellt und kontinuierlich weiterentwickelt worden [7,8,]. Sie haben bis heute zu Verfahren oder Rechenprogrammen geführt, von denen eine hohe Genauigkeit der Rechenergebnisse erwartet werden kann [9,10]. Die Verfahren wurden vielfach an Beispielen angewendet und erprobt [11-15]. Heute kann davon ausgegangen werden, dass die aus Messung und Berechnung ermittelten magnetischen Feldstärken bei

zweidimensionalen Feldern, d.h. Feldern, wie sie von drei langen, parallelen Leitern erzeugt werden, gut übereinstimmen und korrekt sind. Die Aussage gilt zumindest solange, wie Stromverdrängungserscheinungen in den Leitern vernachlässigt werden können. Hingegen sind die Rechenverfahren für sich räumlich stark ändernde Magnetfelder, insbesondere im Fall dreidimensionaler Felder, z.B. bei einer abbiegenden Leiterführung, nicht ausreichend durch Vergleich mit Messungen belegt.

- **Einfluss von Oberschwingungsströmen**

Oberschwingungsströme der ungeraden, nicht durch drei teilbaren Ordnungen, bilden in der Regel ein Mit- oder Gegensystem aus, wenn die Ströme auf den drei Leitern gleiche Höhe haben. Für diese Fälle kann zumindest für die Berechnung der magnetischen Felder die gleiche Genauigkeit wie für die betriebsfrequenten Ströme erwartet werden. Für die Messung der magnetischen Felder hängt die erreichbare Messgenauigkeit ausschließlich von der korrekten Auswahl des Messprinzips und der anschließenden Messwertverarbeitung im Messgerät ab.

Durch drei teilbare Oberschwingungen bilden im Niederspannungsnetz im allgemeinen ein Nullsystem. Dies bedeutet, dass die Bedingung „Summe der Ströme gleich null“ nur bei Einbeziehung des Nulleiters gegeben ist. Wenn der Nulleiter weit von den Außenleitern entfernt ist, wird die von den Oberschwingungen erzeugte Feldstärke langsamer mit dem Abstand von den Leitern abfallen (etwa umgekehrt proportional) als die durch den betriebsfrequenten Strom (etwa umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands). Ab einem bestimmten Abstand werden also die von solchen Oberschwingungsströmen erzeugten Magnetfelder höher sein als die der Grundschwingung. Insbesondere bei der dritten Harmonischen ist dieser Grenzabstand wegen der im Niederspannungsnetz unter Umständen vorhandenen hohen Stromamplituden gering. Im Mittelspannungsnetz mit Erdschlusslöschung bilden Oberschwingungsströme mit durch drei teilbarer Ordnung ein Mit- und Gegensystem, aber kein Nullsystem aus. Die durch diese Ströme erzeugten Magnetfelder werden aus diesem Grunde und wegen der wesentlich niedrigeren Stromamplituden geringer sein als im Niederspannungsnetz. Sie bilden aber auch hier kein ellipsoid mit der Zeit veränderliches Magnetfeld, sondern einen ebenen Vektor im Raum aus.

Alle die Genauigkeiten von Messung oder Berechnung bestimmenden Einflussfaktoren könnten überprüft werden, wenn eine Referenzanordnung zur Verfügung steht, die in der Praxis vorkommende Geometrien nachbildet und deren Magnetfelder, abhängig vom Ort, genau bekannt sind. Amplitude und Phasensymmetrie der betriebsfrequenten Ströme könnten in weiten Grenzen beliebig eingestellt und ihr Oberschwingungsgehalt vorgegeben werden. Im Bedarfsfall könnte eine solche Einrichtung für die Überprüfung der Messgeräte oder Rechenprogramme zur Verfügung stehen.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, eine solche Referenzanordnung zu erstellen und durch Messung und Berechnung die magnetischen Felder dieser Anlage mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen.

2 Magnetfelder des Drehstroms

Das Magnetfeld eines Drehstromsystems wird durch die drei um 120° elektrisch phasenverschobenen Ströme in den Leitern der Anlage verursacht. Bild 2.1 zeigt den vereinfachten Fall eines Magnetfelds von drei langen parallelen Leitern, das sich aus den drei Leiterströmen bei Stromrichtung in die Zeichenebene nach den Gleichungen

$$\underline{H}_x(x, y) = \frac{1}{2\mathbf{p}} \cdot \left[\frac{\underline{I}_1 \cdot (y - y_{01})}{(x - x_{01})^2 + (y - y_{01})^2} + \frac{\underline{I}_2 \cdot (y - y_{02})}{(x - x_{02})^2 + (y - y_{02})^2} + \frac{\underline{I}_3 \cdot (y - y_{03})}{(x - x_{03})^2 + (y - y_{03})^2} \right] \quad (1)$$

$$\underline{H}_y(x, y) = -\frac{1}{2\mathbf{p}} \cdot \left[\frac{\underline{I}_1 \cdot (x - x_{01})}{(x - x_{01})^2 + (y - y_{01})^2} + \frac{\underline{I}_2 \cdot (x - x_{02})}{(x - x_{02})^2 + (y - y_{02})^2} + \frac{\underline{I}_3 \cdot (x - x_{03})}{(x - x_{03})^2 + (y - y_{03})^2} \right] \quad (2)$$

zusammensetzt.

Für den in Bild 2.1 dargestellten vereinfachten Fall mit

$$x_{01} = x_{02} = x_{03} = 0$$

$$y_{01} = d; y_{02} = 0; \text{ und } y_{03} = -d$$

vereinfachen sich die Gleichungen zu

$$\underline{H}_x(x, y) = \frac{1}{2\mathbf{p}} \cdot \left[\frac{\underline{I}_1 \cdot (y - d)}{x^2 + (y - d)^2} + \frac{\underline{I}_2 \cdot y}{x^2 + y^2} + \frac{\underline{I}_3 \cdot (y + d)}{x^2 + (y + d)^2} \right] \quad (3)$$

$$\underline{H}_y(x, y) = -\frac{1}{2\mathbf{p}} \cdot \left[\frac{\underline{I}_1 \cdot x}{x^2 + (y - d)^2} + \frac{\underline{I}_2 \cdot x}{x^2 + y^2} + \frac{\underline{I}_3 \cdot x}{x^2 + (y + d)^2} \right] \quad (4)$$

In der Höhe des mittleren Leiters ($y = 0$) ergeben sich ,da $\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0$, die Feldkomponenten

$$\underline{H}_x(x) = \frac{1}{2\mathbf{p}} \cdot \left[\frac{(\underline{I}_3 - \underline{I}_1) \cdot d}{(x^2 + d^2)} \right] \quad (5)$$

$$\underline{H}_y(x) = -\frac{1}{2p} \cdot \left[\frac{I_2 \cdot d^2}{x \cdot (x^2 + d^2)} \right] \quad (6)$$

Bild 2.1 zeigt, dass die beiden Gleichungen ein elliptisches Drehfeld beschreiben, dessen Halbachsen vom Leiterabstand und der Entfernung vom mittleren Leiter bestimmt sind. Die Lage der Ellipse wird bei kleinen Abständen vom mittleren Leiter nahezu vertikal, da die y-Komponente sehr hoch ansteigt, während die x-Komponente sich einem konstanten Wert annähert. Für große Abstände vom mittleren Leiter geht die y-Komponente schneller gegen Null und die x-Komponente wird nahezu ausschließlich feldbestimmend. Aufgrund der Eigenschaft des Drehstromsystems, dass die Summe der Ströme stets Null ist, hebt sich bei großen Abständen der größte Anteil des aus den drei Leitern gebildeten Magnetfeldes auf. Das Magnetfeld fällt dann mit dem Quadrat des Abstandes von den Leitern ab, wesentlich rascher als bei Einphasen-Wechselstrom.

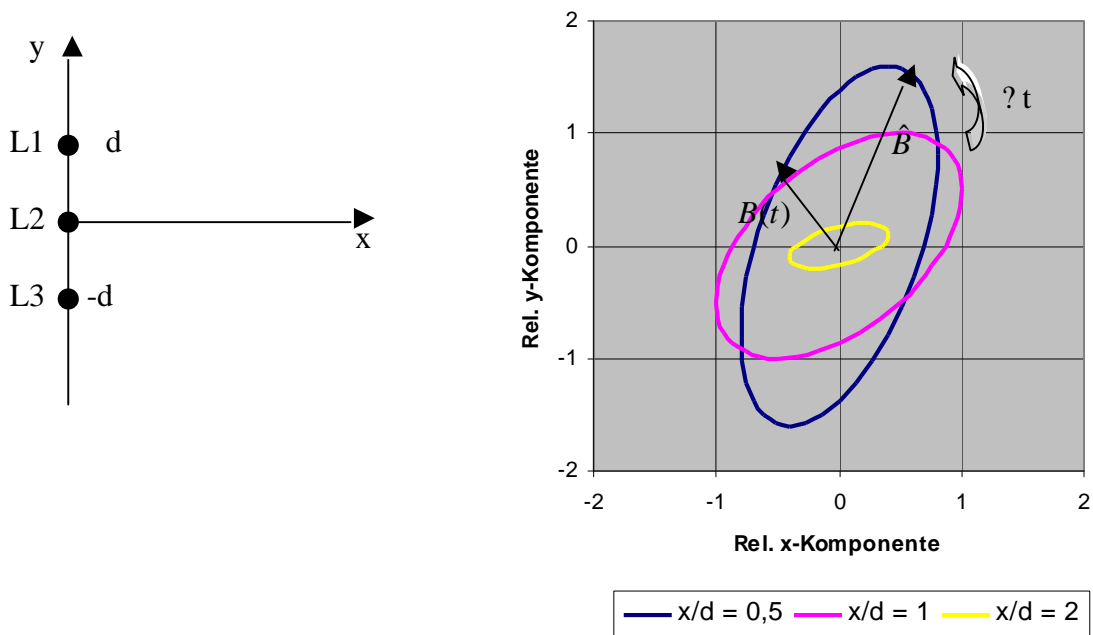


Bild 2.1: Magnetfeld eines senkrecht angeordneten Drehstrom-Leitersystems (links) und Verlauf des Magnetfeldes in der x-Achse ($y = 0$) für verschiedene Abstände zum Leiter (rechts)

Die elliptische Form des magnetischen Drehfeldes beinhaltet, dass der Zeiger des zeitlich drehenden Magnetfeldes nie zu Null wird. Diese Eigenschaft benötigt für eindeutige Definitionen einige Voraussetzungen:

- Für die Berechnung der in eine Schleife durch das Magnetfeld induzierten Spannung ist das elliptische Drehfeld in die Ebene der Schleife zu projizieren. Die induzierte Spannung ist dann eine reine Wechselspannung. Z.B. würde eine senkrecht zur x-Achse stehende Schleife nur die x-Komponente des Feldes nach Gleichung 5 und eine senkrecht zur y-Achse stehende Schleife nur die y-Komponente nach Gleichung 6 messen.
- Für die Beeinflussung des Menschen wird allgemein angenommen, dass der Höchstwert der magnetischen Feldstärke maßgeblich ist. In der 26. BImSchV ist man von einem einphasigen sinusförmigen Wechselstrom ausgegangen und hat, ausgehend von der Maximalfeldstärke, den Effektivwert festgeschrieben zu:

$$B_{eff-Norm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{B} \quad (7)$$

- Die allgemeine Definition des Effektivwerts des Magnetfelds, die auch für nicht sinusförmige Feldänderungen gilt, lautet:

$$B_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T B^2 dt} \quad (8)$$

Die sich nach den beiden Gleichungen 7 und 8 ergebenden Effektivwerte unterscheiden sich abhängig von der Ausgeprägtheit des elliptischen Rotationsfeldes. Für den Sonderfall des kreisförmigen Rotationsfeldes ist B konstant und der sich aus Gleichung ergebende Effektivwert der Induktion ist gleich dem Scheitelwert. Für diesen Fall ergibt sich die höchste Abweichung von Gleichung (7) mit $B_{eff} = \sqrt{2} \cdot B_{eff-Norm}$. Bei größer werdenden Abständen von den Leitern wird die Ellipse zunehmend flacher und der Unterschied zwischen den beiden Werten geringer.

3 Referenzanordnung

Die Referenzanordnung sollte die von einer Drehstromanlage ausgehenden Magnetfelder in ihrer Inhomogenität möglichst genau nachbilden, aber doch so übersichtlich sein, dass eine Berechnung der magnetischen Felder noch mit guter Genauigkeit möglich ist. Es wurde eine quadratische Anordnung der drei übereinander liegenden Drehstromleiter gewählt, deren Abmessungen in Bild 3.1 wiedergegeben sind. Die drei Leiter sind aus Kupferschienen 40 mm x 5 mm aufgebaut. Die Abstände zwischen den drei Leitern entsprechen mit 200 mm den in einer 20-kV-Anlage üblichen Abständen. Die Höhe der Leiter über dem Boden wurde so gewählt, dass sie einen möglichen Einfluss des Erdbodens gering halten, aber doch eine vergleichsweise einfache Messung der magnetischen Felder ermöglichen.

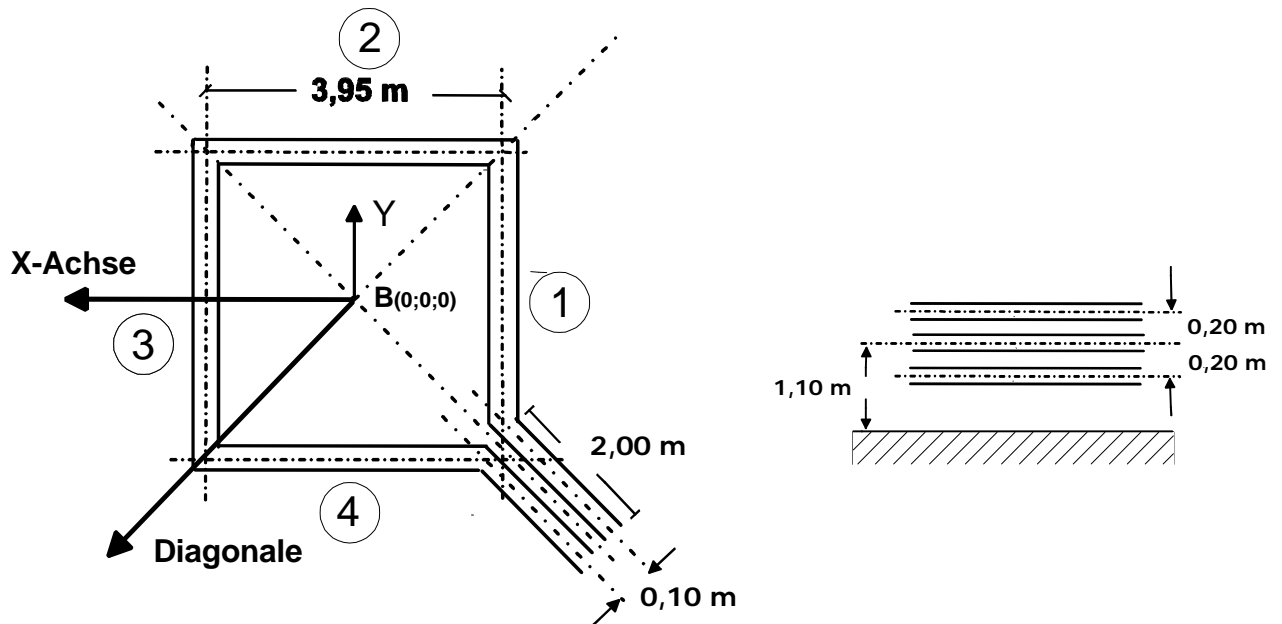


Bild 3.1: Grund- und Aufriss der Referenzanordnung zur Messung und Berechnung von magnetischen Feldern eines Drehstromsystems

Um den Einfluss der einseitigen Stromzuführung auf die magnetischen Felder möglichst gering zu halten, erfolgte die Stromzuführung an einer Ecke der Rechteckspule mit sehr eng geführten Leitern. Die Felder wurden auf der der Stromzuführung entgegengesetzten Seite gemessen und berechnet, zum einen der Betrag senkrecht zu den Leitern in der Mitte der Anordnung (x-Achse), zum anderen diagonal zur Anordnung.

Für die Wahl eines geeigneten Aufstellungsortes der Referenzanordnung waren zwei Gesichtspunkte maßgebend:

- Die Einflüsse von metallischen Boden- und Mauerbewehrungen sollten von vornherein ausgeschlossen werden, da sie in Berechnungen kaum richtig nachgebildet werden können. Es kam daher nur eine Aufstellung im Freien über dem natürlichen Boden in Frage, wo solche Einflüsse mit einiger Sicherheit ausgeschlossen werden können.
- Die Verfälschung der Messung durch Magnetfelder, die durch andere Stromsysteme verursacht werden, sollte möglichst ausgeschlossen sein. Umfangreiche Messungen auf dem Gelände der FGH zeigten, dass diese Bedingung in dem von verschiedenen Freileitungen beeinflussten Bereich nur an wenigen Stellen erfüllt werden konnte. Die günstigste Stelle wies eine Grundfeldstärke unter 50 nT auf, was bei den zu erwartenden, durch die Anordnung selbst verursachten Feldern als ausreichend gering angesehen werden konnte.

Bild 3.2 zeigt die Fotografie der Rechteckanordnung mit der Stromzuführung im Vordergrund.



Bild 3.2: Ansicht der Referenzanordnung zur Messung und Berechnung der magnetischen Felder von Drehstromanordnungen

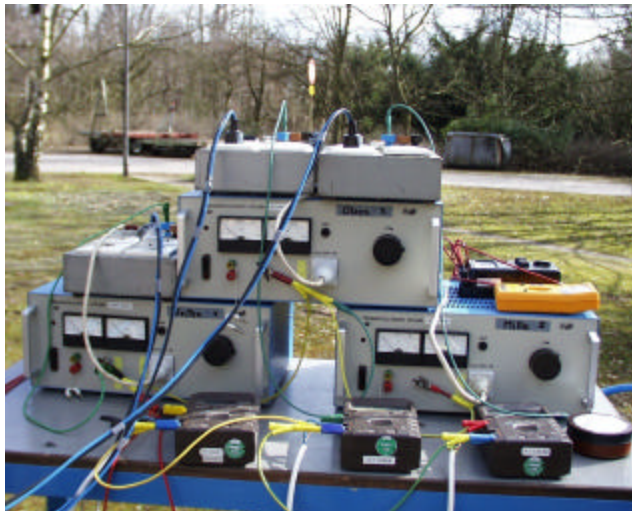


Bild 3.3: Erzeugung des Drehstroms durch Ringkerntransformatoren (oben) und Drehströmen mit getrennt einstellbaren Amplituden über Regeltransformatoren (unten)

Die Erzeugung des Drehstroms geschah durch Ringkerntransformatoren, mit in den einzelnen Leitern getrennt einstellbaren Amplituden. Auf diese Weise wurde vermieden, dass die Ströme aufgrund evtl. in den Leitern vorhandener Unsymmetrien der Impedanzen unterschiedlich wurden. Die Ströme konnten in dieser Anordnung von 0 bis 407 A variiert werden.

4 Berechnung der magnetischen Felder

Die genaue Berechnung der magnetischen Felder für Anordnungen, wie sie hier betrachtet werden, kann nur mit umfangreichen digitalen Rechenprogrammen geschehen. Die

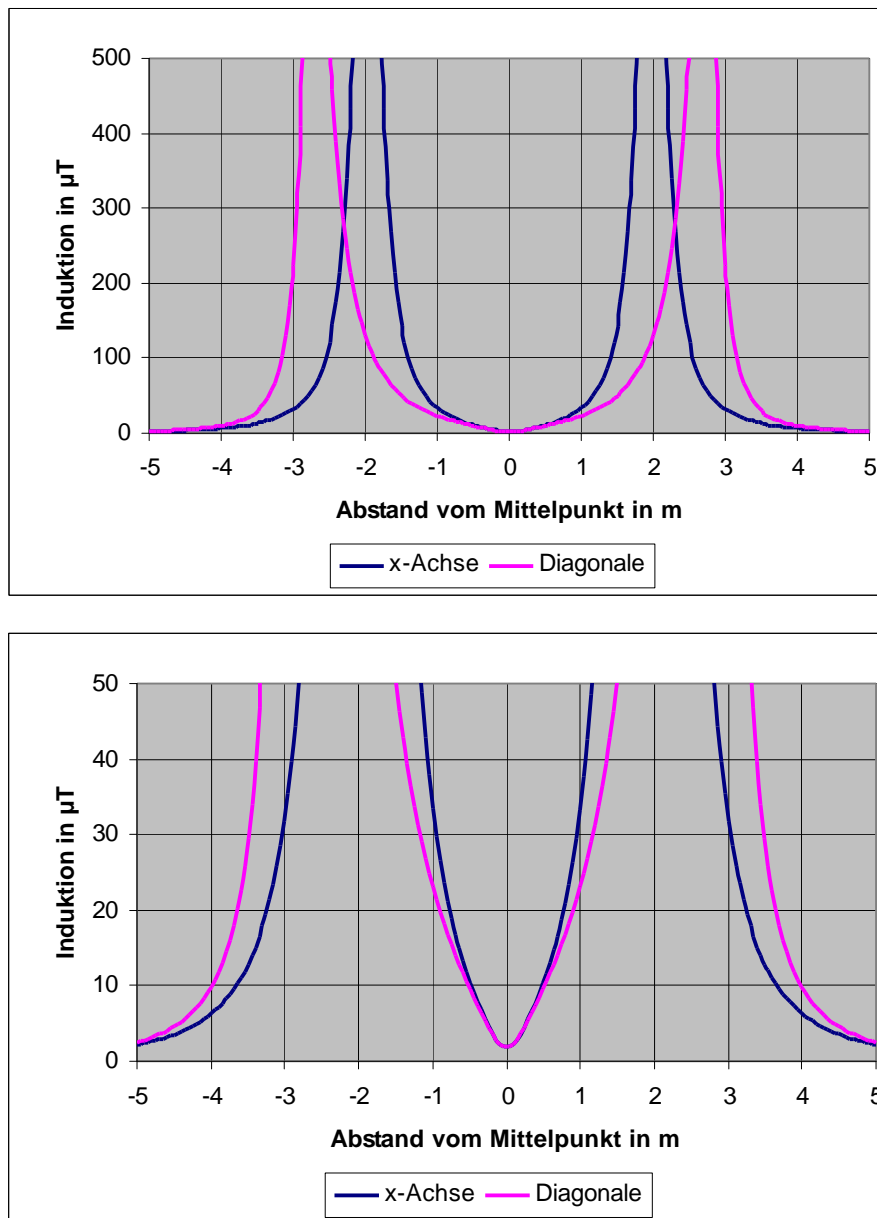


Bild 4.1: Berechneter Scheitelwert der magnetischen Feldstärke in den beiden in Bild 3.1 dargestellten Messrichtungen in Abhängigkeit vom Abstand zum Mittelpunkt der Referenzanordnung in der Höhe des mittleren Leiters für unterschiedliche Induktionsbereiche auf der Ordinate
Drehstrom 407 A

Berechnungen wurden daher mit dem seit langem bewährten Rechenprogramm „WinField“ von der Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie GmbH, Berlin, im Auftrag der FGH durchgeführt. Die geometrischen Abmessungen der Referenzanordnung nach Abschnitt 3 wurden dabei genau berücksichtigt. Evtl. vorhandene Einflüsse des Bodens konnten hingegen keine Berücksichtigung finden, da hierüber keinerlei Kenntnisse vorlagen.

Bild 4.1 zeigt den berechneten Scheitelwert der magnetischen Feldstärke in Abhängigkeit vom Abstand des Berechnungspunkts vom Mittelpunkt der Rechteckspule. Deutlich ist der steile Anstieg der Feldstärke in der Nähe der Leiter feststellbar, wobei diese im Vergleich zur x-Achse in der Diagonale bei dem $\sqrt{2}$ -fachen Abstand liegen.

Dargestellt ist hier der Scheitelwert der Induktion, also die große Halbachse der Ellipse oder des Ellipsoids. Ebenso berechnet wurde der Effektivwert der Induktion nach der Definition in Gleichung 8. Wie in Kapitel 2 dargelegt, ist das Verhältnis des Scheitelwerts zum Effektivwert ein Maß für die Ausgeprägtheit der Ellipse. Bei einem Kreis oder einer Kugel würde sich das Verhältnis 1 ergeben, bei einer sehr flachen Ellipse (oder Ellipsoid) ein Verhältnis von $\sqrt{2}$. Bild 4.2 zeigt das sich ergebende Verhältnis für die beiden Messrichtungen.

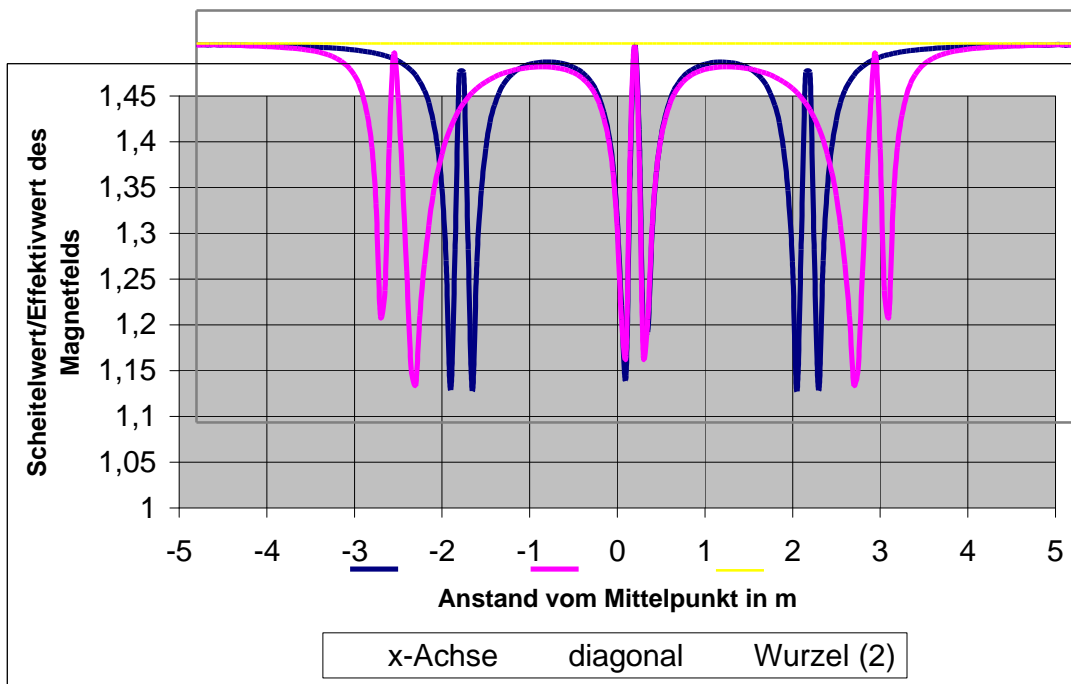


Bild 4.2: Verhältnis von Scheitelwert zum Effektivwert des berechneten Magnetfelds in Abhängigkeit vom Abstand vom Mittelpunkt der Referenzanordnung in Höhe des mittleren Leiters

Es zeigt sich, dass der elliptische Charakter des Magnetfelds in der Nähe der Leiter und nahe dem Mittelpunkt der Referenzanordnung stark ausgeprägt ist.. Von den Leitern entfernt wird die x-Komponente vorherrschend und bestimmt das Feld, so dass die Ellipse flach ist und entsprechend Kapitel 2 horizontal liegt. Lediglich in unmittelbarer Nähe der Leiter bewirkt die stark ansteigende y-Komponente des Feldes, dass die Ellipse flach wird und vertikal liegt. Analoge Verhältnisse spielen sich im Mittelpunkt der Referenzanordnung ab, da im Mittelpunkt aus Symmetriegründen ausschließlich die y-Komponente vorhanden ist.

Außerhalb der Referanzanordnung sinkt die magnetische Induktion entsprechend der im Abschnitt 2 beschriebenen grundsätzlichen Abhängigkeiten schnell ab. Da dieses Absinken für die später zu behandelnden, in solchen inhomogenen Feldern möglichen Messfehler von Bedeutung ist, zeigt Bild 4.3 die Abhängigkeiten in der x-Achse der Anordnung. Bereits einen halben Meter von den Leitern entfernt sinkt die magnetische Induktion proportional $1/x^2$ ab. Ab diesem Abstand ist die x-Komponente des Feldes vorherrschend mit den in Abschnitt 2 beschriebenen Zusammenhängen. Bei kleineren Abständen ist die y-Komponente maßgebend und die Abhängigkeiten werden etwas komplexer. Bei merklich größeren

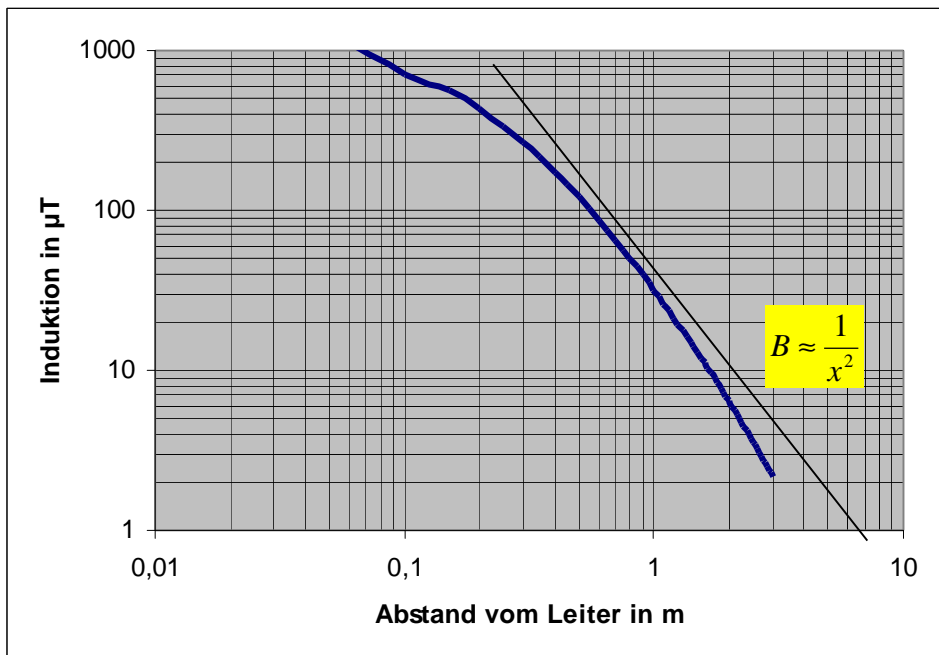


Bild 4.3: Berechneter Scheitelwert der magnetischen Feldstärke in der in Bild 3.1 dargestellten Messrichtung „x-Achse“ in Abhängigkeit vom Abstand zu den Leitern der Referenzanordnung in der Höhe des mittleren Leiters Drehstrom 407 A

Abständen über 1 m spielen die gegenüberliegenden Leiter der Referenzanordnung mit einer Rolle und das Absinken der magnetischen Feldstärke wird ausgeprägter als mit den für lange Leiter geltenden Gleichungen in Kapitel 2 vorhergesagt.

Die magnetischen Induktionen der Referenzanordnung in der Höhe der beiden äußeren Leiter weichen von den Induktionen in der Höhe des mittleren Leiters ab. Da die Berechnung mögliche Einflüsse von Wirbelströmen im Boden nicht berücksichtigen kann, sind die Induktionen in der Höhe der beiden äußeren Leiter gleich. Bild 4.4 zeigt die Abweichungen dieser Induktionen von den in den vorangehenden Bildern dargestellten Induktionen in der Höhe des mittleren Leiters abhängig vom Abstand zum Mittelpunkt der Referenzanordnung. Die Abweichungen können innerhalb der Referenzanordnung beträchtlich sein, so dass insbesondere im Zentrum der Anordnung die Höhe des Betrachtungspunktes eine große Rolle spielt.

Für die praktische Anwendung hat die Induktion außerhalb der Anordnung bei Abständen zu den Leitern größer 0,3 m die größte Bedeutung, da diese Felder bei praktischen Anordnungen der Energieversorgung zu bewerten sind. In diesem Bereich weichen die Felder lediglich um maximal 10% voneinander ab. Die Höhe des Betrachtungspunktes über Boden hat hier nur einen geringen Einfluss auf das Ergebnis.

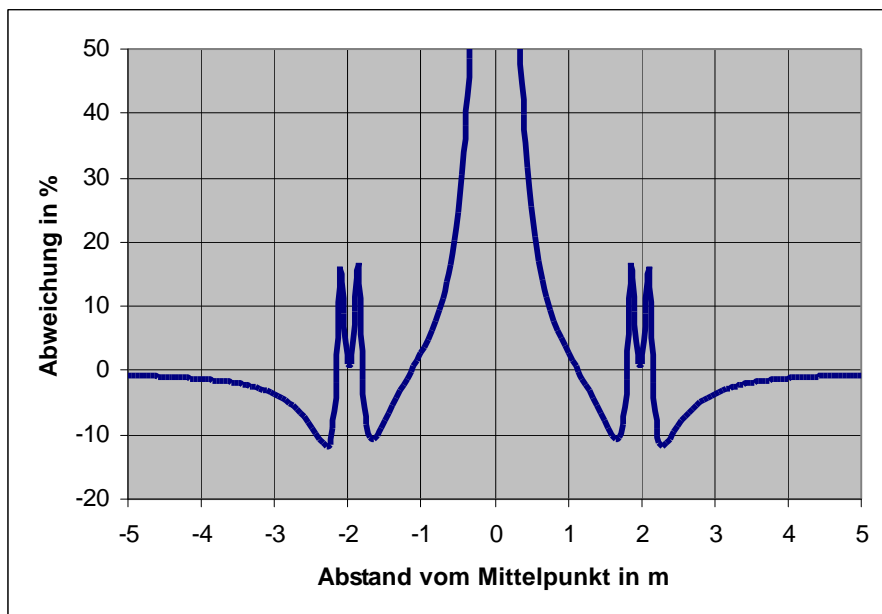


Bild 4.4: Abweichung der Effektivwerte der magnetischen Induktion in der Höhe der beiden äußeren Leiter von der Induktion in der Höhe des mittleren Leiters der Referenzanordnung in Abhängigkeit vom Abstand zum Mittelpunkt der Referenzanordnung.

Messrichtung „x-Achse“ der Referenzanordnung.

5 Messung der magnetischen Feldstärken

5.1 Messprinzipien

Im Grundsatz könnten die in der Berechnung verwendeten Werte der magnetischen Induktion – Scheitelwert oder Effektivwert – mit der heute zur Verfügung stehenden Messtechnik auch messtechnisch erfasst werden. Hierzu müssten die drei räumlichen Komponenten zeitgleich digital erfasst, und die resultierende nach der Gleichung

$$B(t) = \sqrt{B_x^2(t) + B_y^2(t) + B_z^2(t)} \quad (9)$$

ermittelt werden.

Der Scheitelwert der magnetischen Feldstärke wäre dann

$$\hat{B} = \text{Max}[B(t)] \quad (10)$$

und der Effektivwert wäre nach Gleichung 8 zu berechnen.

Zum Zeitpunkt der Normung war diese Technik jedoch noch nicht so weit entwickelt, dass sie in den erforderlichen tragbaren Messeinrichtungen verwirklicht werden konnten. Es wurden daher Näherungen entwickelt, die eine digitale on-line Berechnung vermieden. Die Messtechnik sieht die Erfassung der Scheitelwerte der drei Komponenten und die nachträgliche off-line Berechnung des Scheitelwerts und des Effektivwertes der Induktion nach den Gleichungen

$$\hat{B}_{\text{Näherung}} = \sqrt{\hat{B}_x^2 + \hat{B}_y^2 + \hat{B}_z^2} \quad (11)$$

und

$$B_{\text{eff-Näherung}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \hat{B}_{\text{Näherung}} \quad (12)$$

vor. Die prinzipielle Darstellung des elliptischen Drehfelds in Bild 5.1 zeigt, dass die so gemessenen Näherungen für den Scheitelwert beträchtlich von den tatsächlichen Werten abweichen können. Dies ist jedoch nur dann der Fall, wenn das Rotationsfeld eine ausgeprägte elliptische Form hat. Der Näherungswert des Scheitelwerts kann dann das bis 2fache des echten Werts betragen. Der Effektivwert ist jedoch in allen Fällen genau, da der Zeitverlauf der einzelnen Komponenten sinusförmig ist:

$$B_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T B^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T B_x^2(t) \cdot dt + \frac{1}{T} \int_0^T B_y^2(t) \cdot dt + \frac{1}{T} \int_0^T B_z^2(t) \cdot dt} = B_{\text{eff-Näherung}} \quad (13)$$

Die auf dieser Näherung beruhenden Messgeräte bestimmen also den Scheitelwert stets zu hoch, den Effektivwert der Induktion, der als Grenzwert festgelegt ist, aber richtig.

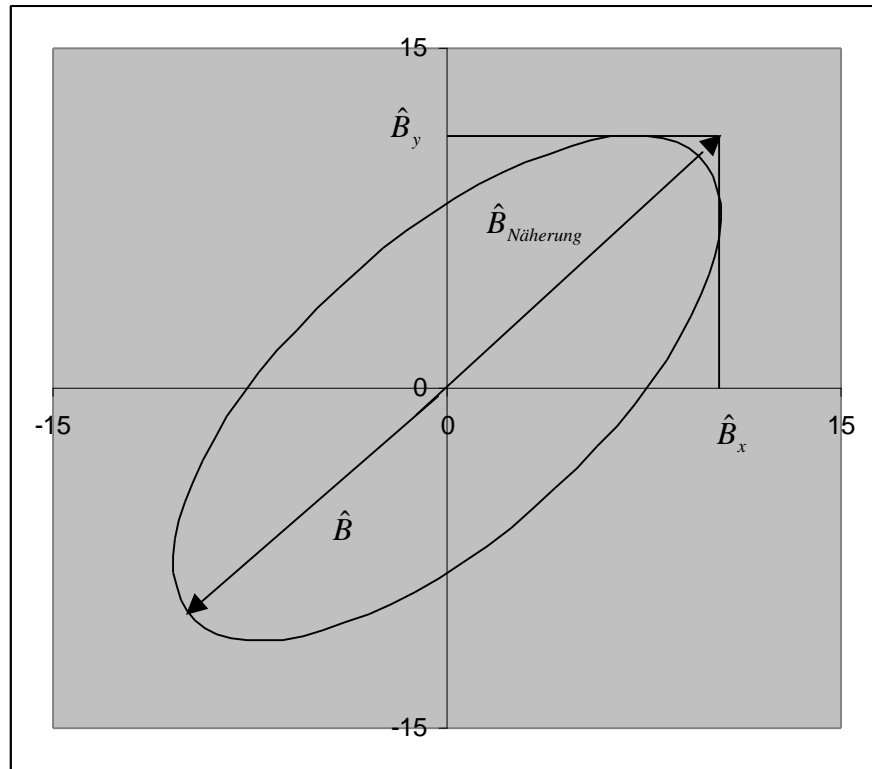


Bild 5.1: Erläuterungen zu den bei Messung elliptischer Dreh-Magnetfelder getroffenen Vereinfachungen.

5.2 Messeinrichtungen

Alle Messungen der magnetischen Induktion wurden mit dem EM-Feldanalysator EFA-3 der Firma Wandel & Goltermann durchgeführt. Die beiden hierbei verwendeten Messsonden sind in ihrem grundsätzlichen Aufbau in Bild 5.2 wiedergegeben. Die Messsonden sind galvanisch mit der potentialfrei arbeitenden Auswerteeinheit verbunden, was für die Messung der magnetischen Feldstärke keinen großen Nachteil darstellt. Die äußere Ansicht der Messsonden und der Auswerteeinheit ist aus Bild 5.3 ersichtlich.

Die Hauptdaten der Sonden sind in Bild 5.2 mit angegeben. Für den größten Teil der Messungen wurde die 100-cm²-Präzisionssonde verwendet, da dieser Spulenquerschnitt den in VDE 0848 Teil 1 festgelegten Forderungen entspricht und die großen Spulen eine hervorragende Messempfindlichkeit bieten. Die drei Spulen für die drei Koordinaten x, y und z sind konzentrisch angeordnet, d.h. sie haben einen gemeinsamen Mittelpunkt, auf den sich die angegebenen Induktionswerte beziehen.

Die große Spulenfläche bedeutet, dass die Spulen mit etwa 113 mm einen recht großen Durchmesser haben, d.h. die zentrische Positionierung bei der ortsabhängigen Messung der Feldstärken große Sorgfalt erfordert. Dies ist insbesondere bei der im Freien auf natürlichem Boden aufgestellten Referenzanordnung nur mit einer begrenzten Genauigkeit möglich.

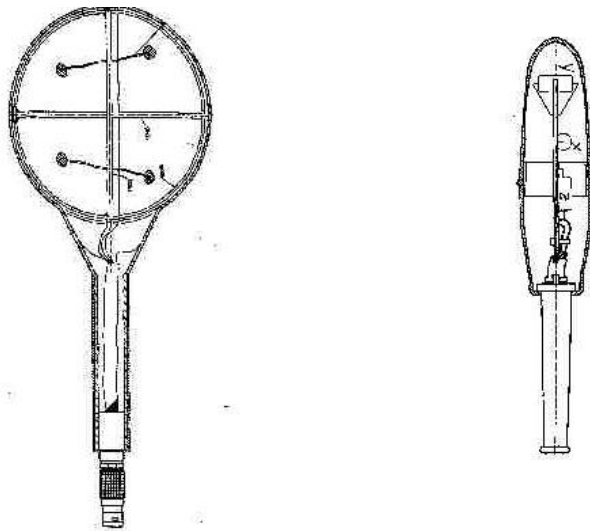


Bild 5.2: Skizzen der Messsonden des Magnetfeld-Messgeräts EFA-3, Wandel & Goltermann

- Links: Isotrope 100-cm²-Präzisionssonde, 50 Hz bis 400 Hz
Filter 5 Hz – 2 kHz Breitband oder selektiv
Messunsicherheit 3% bei Feldstärken > 40 nT
- Rechts: 3-cm²-Feldsonde 50 Hz bis 400 Hz
Filter 5 Hz – 2 kHz Breitband oder selektiv
Messunsicherheit 4% bei Feldstärken > 500 nT

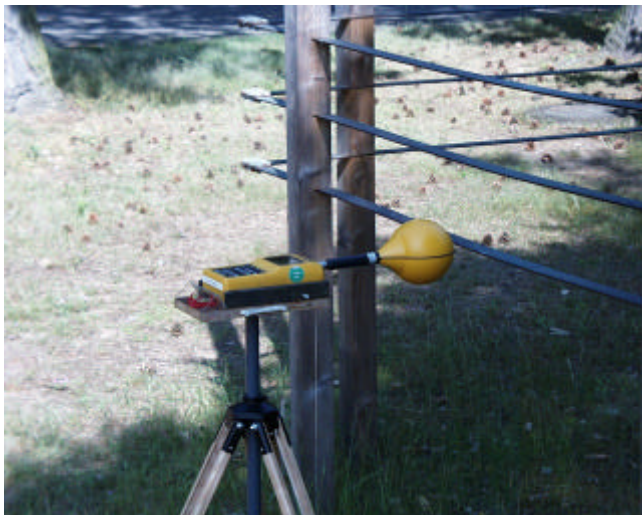


Bild 5.3: Ansicht der Feldsonden mit Auswerteeinheit

Eine genauere Positionierung der Spulen wurde durch die Verwendung von Sonden mit kleinerem Spulendurchmesser erhofft, wobei die geringe Messempfindlichkeit in Kauf genommen wurde. Geeignete Spulen waren vom Hersteller als Sonde angeboten. Leider hat diese Sonde den Nachteil, dass die Spulen nicht konzentrisch angeordnet sind, also keinen gemeinsamen Mittelpunkt haben, auf den sich die Angabe eines Abstands zu den Leitern beziehen kann. Die Unsicherheiten der Positionierung beider Messsonden und die sich daraus ergebenden Folgerungen für die gesamte Messunsicherheit werden im Abschnitt 5.3 im Zusammenhang mit den erzielten Messergebnissen besprochen.

5.3 Messergebnisse des ungestörten Drehstrom-Magnetfeldes

Eindeutige Messergebnisse sind in dem Mittelpunkt der Referenzanordnung in der Höhe des mittleren Leiters zu erwarten, da hier die Induktion nur aus der vertikalen Komponente besteht und die genaue Positionierung der Messsonde besonders leicht ist. Tabelle 5.1 vergleicht die hier gemessenen mit den berechneten Werten.

Höhe der Sonde	Magnetischen Induktion bei 407 A Scheitelwert in μT		Verhältnis Scheitelwert zu Effektivwert	Abweichung Messung von Rechnung %
	Gemessen	Berechnet		
mittlerer Leiter	2,036	2,084	1,414	- 2,3
oberer Leiter	7,289	7,257	1,414	0,44

Tabelle 5.1: Vergleich der gemessenen mit den berechnete Induktion (Abschnitt 4) im Zentrum der Referenzanordnung.

Für die praktische Anwendung ist die Induktion außerhalb der Referenzanordnung von größerer Bedeutung, da hier die Feldgeometrie mehr der bei praktischen Anordnungen auftretenden Geometrie entspricht. Bild 5.4 vergleicht die in einer ersten Messserie gemessenen Induktionen mit den berechneten Werten an verschiedenen Stellen. Die Abweichungen der 1. Messung von den berechneten Werten schwankt zwischen -3% und 4% , ohne dass eine eindeutige Tendenz erkennbar wäre.

Es war aufgrund mehrerer ähnlicher Beobachtungen bekannt, dass die Positionierung der Feldmesssonde einen wesentlichen Einfluss auf die beobachteten Unterschiede zwischen Messung hat. Die Messungen wurden daher an einigen ausgewählten Punkten wiederholt, wobei auf die exakte Positionierung besonderen Wert gelegt wurde. Die dabei erzielten Ergebnisse sind in Bild 5.4 als Wiederholungsmessung mit enthalten.

Es ist festzustellen, dass in der Wiederholungsmessung stets höhere Messwerte als Rechenwerte erzielt werden, insbesondere dann wenn das Feld sehr inhomogen ist. Diese Tendenz kann durch die Ausdehnung der Präzisionsmesssonde erklärt werden die aufgrund des gekrümmten Feldverlaufs bei Bezug auf den Mittelpunkt der Spule für die senkrechte Komponente stets zu hohe Werte anzeigen muss.

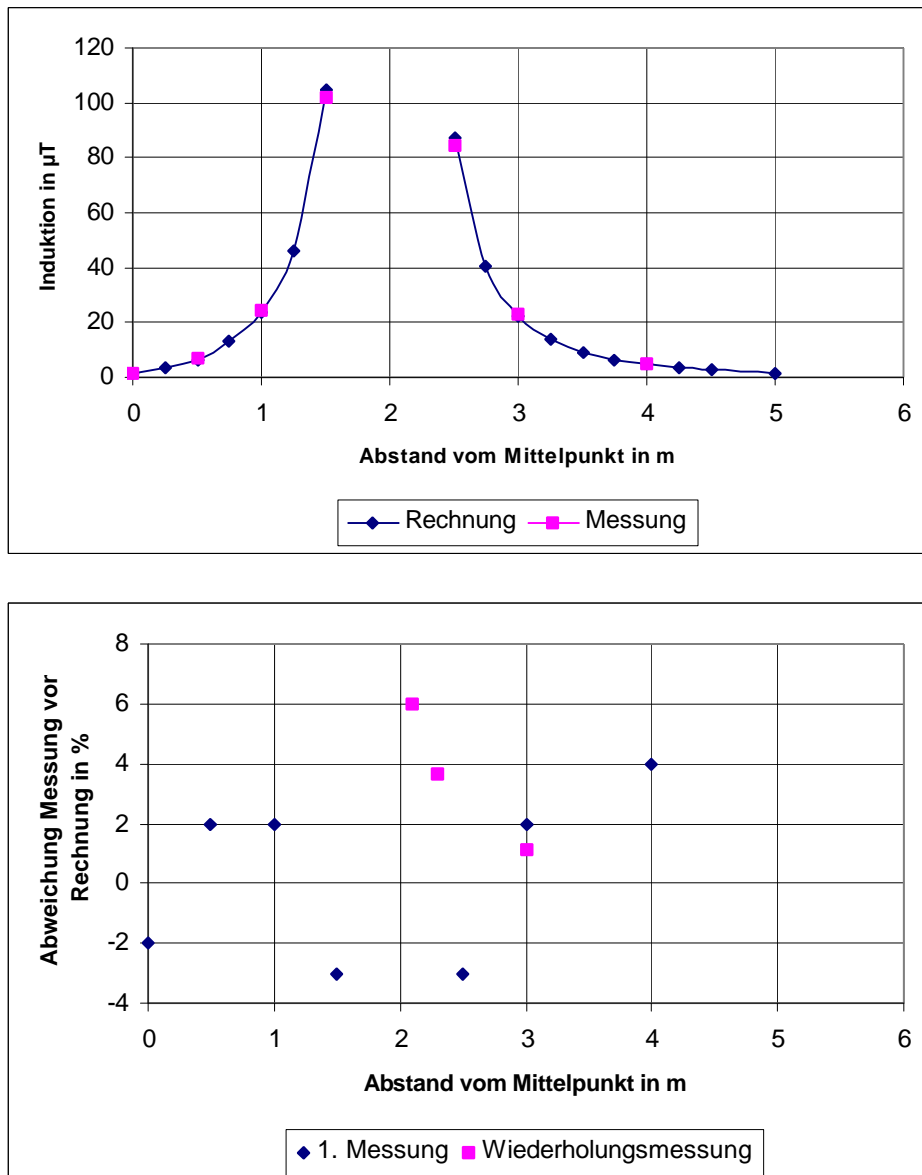


Bild 5.4: Vergleich der gemessenen mit den berechneten Induktionen (Effektivwerte) in der x-Achse in der Höhe des mittleren Leiters in Abhängigkeit von Abstand zum Mittelpunkt der Referenzanordnung.
Drehstrom 407 A
Oben: Gemessene Induktionswerte
Unten: Abweichungen der Messwerte von der Rechnung

Wie in Kapitel 2 dargestellt, sinkt die senkrechte (y) Komponente der Induktion umgekehrt proportional mit dem Abstand ab. Die Präzisionssonde mit den 100-cm²-Messspulen misst den Durchschnittswert dieses Feldes und bezieht diesen Messwert auf den Mittelpunkt dieser Spule als Messort. Dieser Messwert kann ohne Schwierigkeiten berechnet werden. Bild 5.5 zeigt den zu erwartenden Messfehler in Abhängigkeit vom Abstand zu den Leitern. Es ist ersichtlich, dass der Messfehler im sehr inhomogenen Bereich des Feldes sehr hoch wird und positive Werte annimmt. Die in der Wiederholungsmessung festgestellten positiven Abweichungen der Messung von der Rechnung sind damit erklärbar.

Bei größeren Abständen wird der zu erwartende Messfehler aus zwei Gründen klein. Einmal wird das Magnetfeld im Vergleich zur Messspule wesentlich homogener, zum anderen wird die horizontale Komponente des Magnetfeldes, bei der die Ausdehnung der Spulen weniger Bedeutung hat, ausschlaggebend.

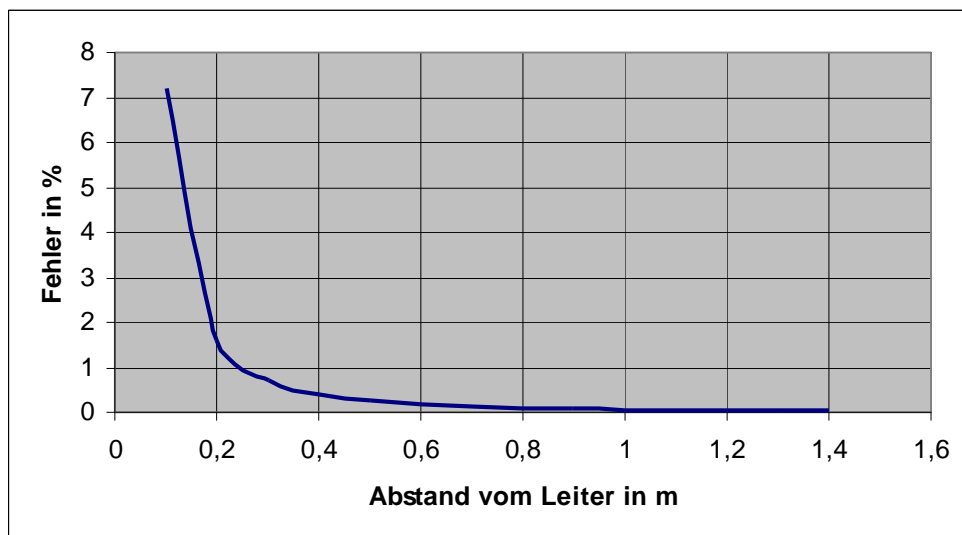


Bild 5.5: Zu erwartender Messfehler in der Messung der vertikalen Komponente des Magnetfeldes in Höhe des mittleren Leiters durch die Größe der Messspule der Präzisions-Messsonde

Korrigiert man die in der Wiederholungsmessung festgestellten Abweichungen zwischen Messung und Rechnung mit den zu erwartenden Messfehlern nach Bild 5.5, dann liegen die Abweichungen bei Werten zwischen -1% und 2%. Die Schwierigkeiten der genauen Positionierung der Sonde im inhomogenen Magnetfeld und die bei wiederholten Messungen festgestellten Schwankungen legen den Schluss nahe, dass die berechneten Werte verlässlicher sein könnten.

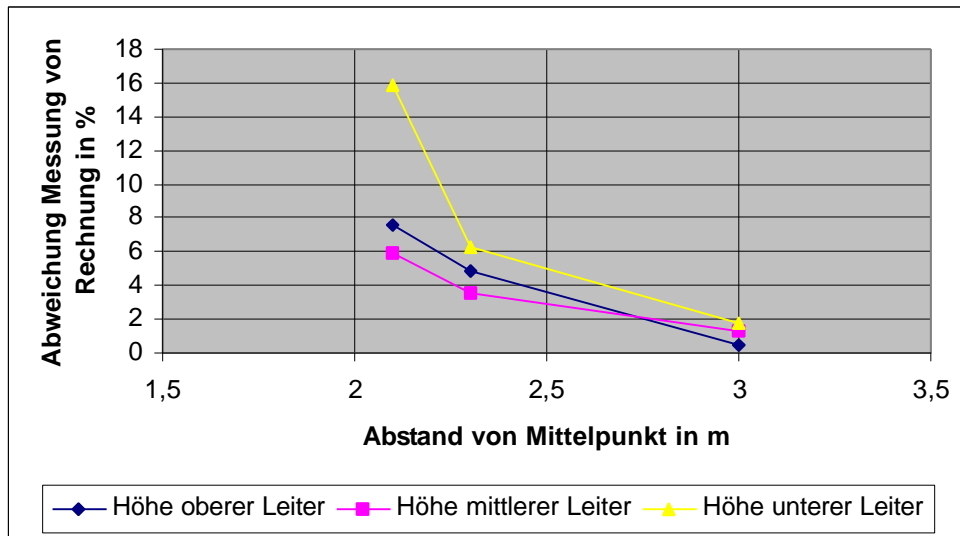


Bild 5.6: Abweichungen der gemessenen mit den berechneten Induktionen in der x-Achse in Abhängigkeit von Abstand zum Mittelpunkt der Referenzanordnung. Drehstrom 407 A

Bild 5.6 verdeutlicht, dass die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung an anderen Orten der Referenzanordnung höher sein können. Insbesondere in der Höhe des unteren Leiters wurden deutlich höhere Werte gemessen als berechnet. Welche Gründe neben den Einflüssen der Inhomogenitäten des Feldes hierbei eine Rolle spielen könnten, ist nicht geklärt.

Vergleichsmessungen mit den beiden in Abschnitt 5.2 beschriebenen Messsonden wurden zunächst an einer Modell-Rahmenanordnung durchgeführt, um die Erfahrungen mit einer möglichst korrekten Positionierung mit den drei nicht konzentrisch angeordneten Spulen für die Komponenten des Magnetfeldes zu erhalten. Die Ergebnisse sind in Bild 5.7 in logarithmischem Maßstab angegeben, um auch die Unterschiede bei kleinen Induktionswerten erkennen zu können.

Die Unterschiede zwischen den beiden Sonden sind selbst in der in Bild 5.7 gewählten Darstellung deutlich zu erkennen. Die großen Unterschiede bei den großen Abständen von den Leitern sind durch Positionierungsprobleme nicht voll zu erklären und müssen auf Messungenauigkeiten der Sonde selbst zurückgeführt werden.

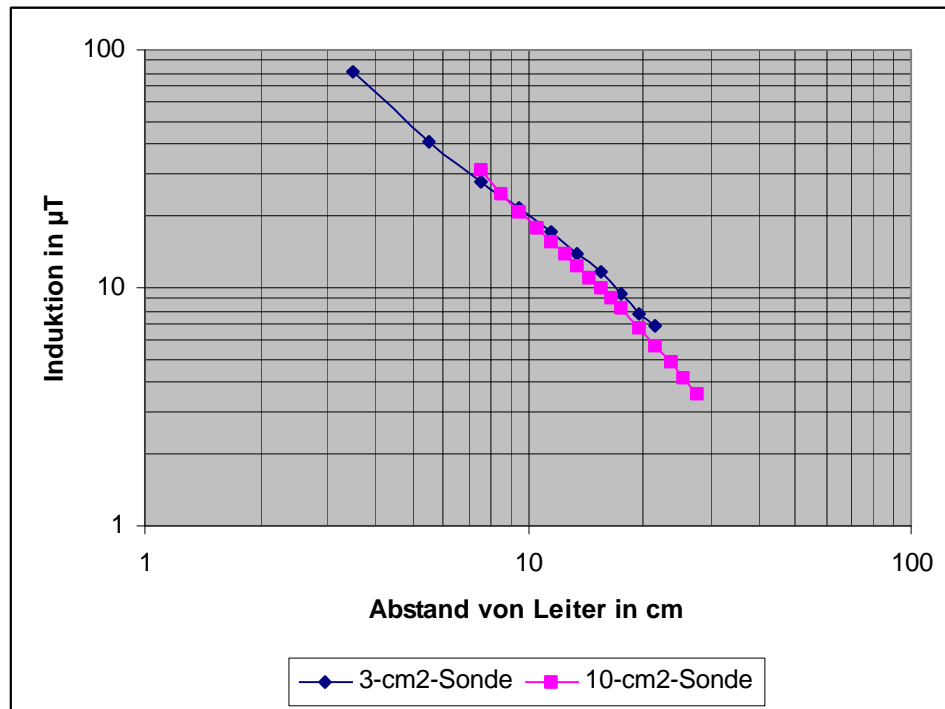


Bild 5.7: Vergleich der an einer Modell-Rahmenanordnung gemessenen Induktionen (Effektivwerte) mit den beiden in Abschnitt 5.2 beschriebenen Messsonden. Drehstrom 2 A

Die hohen Unterschiede zwischen den Messwerten der beiden Sonden betragen teilweise mehr als 10%. Eine Verbesserung der oben beschriebenen, auf der Präzisionssonde beruhenden Messgenauigkeiten konnte daher nicht erwartet werden. Die Messungen an der Referenzanordnung wurden daher für diese Sonde zurückgestellt.

5.4 Stromabhängigkeit des ungestörten Drehfeldes

Es bestand zu Beginn des Forschungsvorhabens die Befürchtung, dass das Magnetfeld der Referenzanordnung aufgrund von Stromverdrängungseffekten nicht stromproportional sein könnte. Die Kontrollmessung in der Höhe des mittleren Leiters bei einem Abstand von 2,3 m vom Mittelpunkt der Referenzanordnung ergab, dass das Magnetfeld im wesentlichen proportional zum Strom ist.

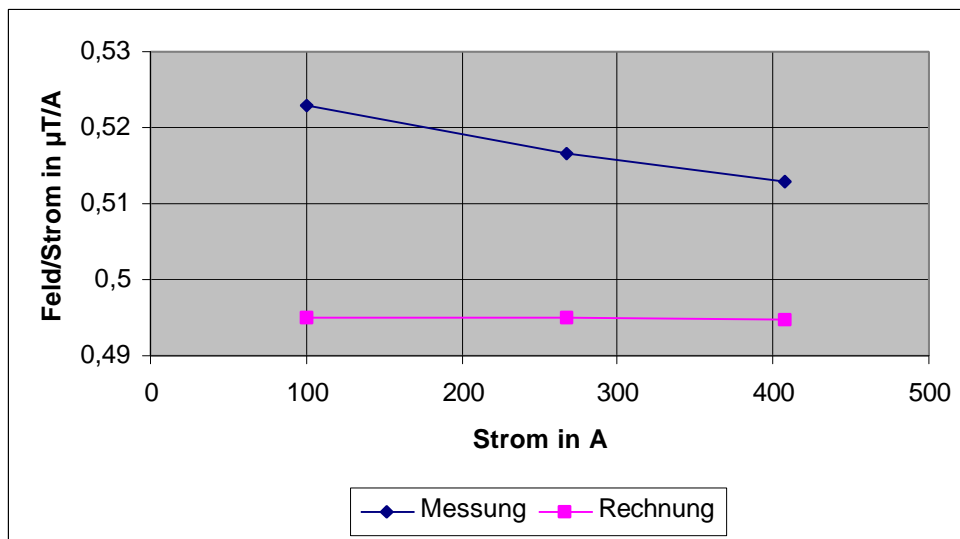


Bild 5.8: Verhältnis der Effektivwerte von Induktion zu Strom in Abhängigkeit vom Strom. Höhe des mittleren Leiters im Abstand von 2,3 m vom Mittelpunkt der Referenzanlage

Bild 5.8 zeigt das Verhältnis des Effektivwertes der Induktion zum Effektivwert des Drehstroms in Abhängigkeit vom Strom. Da zwischen den Messungen keine Änderungen in der geometrischen Anordnung der Sonde zur Referenzanordnung vorgenommen wurden, sind als Einflussgrößen nur der Wert des Stroms und die Messung der Magnetfeldsonde vorhanden. Das Verhältnis Induktion/Strom fällt mit dem Strom ab, was durch Stromverdrängungseffekte (Proximityeffekt) durchaus zu erklären wäre. Es schwankt um einen Mittelwert von $0,518 \mu\text{T/A}$ um $\pm 1\%$.

Es könnte jedoch auch sein, dass die in der Magnetfeldsonde integrierte elektronische Messtechnik für die geringfügige Nichtlinearität des Feldes mit dem Strom verantwortlich ist. Um dies ausschließen zu können, müssten sorgfältige Kalibrierungen in Anordnungen durchgeführt werden, in denen solche Effekte nachweislich nicht auftreten. Eine geeignete Anordnung für die hier festgestellten geringfügigen Nichtlinearitäten stand jedoch nicht zur Verfügung.

Es muss demnach zum augenblicklichen Zeitpunkt davon ausgegangen werden, dass eine Stromabhängigkeit des Magnetfeldes der Referenzanordnung besteht. Die Nichtlinearität beträgt im Strombereich zwischen 0 und 500 A etwa $\pm 2\%$. Eine Korrektur hierfür wäre nur dann sinnvoll, wenn es sich tatsächlich um Stromverdrängungseffekte handeln würde. Sie wäre falsch, wenn die Nichtlinearität durch die Messsonde selbst verursacht wäre.

5.5 Einflüsse von Metallbewehrungen

Da erwartet wurde, dass Stahlbewehrungen im Boden oder in der Wand einen merklichen Einfluss auf die magnetische Feldstärke haben kann, war als Aufstellungsort für die Referenzanordnung eine Aufstellung im Freien über natürlichem Boden gewählt worden. Nur unter diesen Bedingungen konnte eine ausreichend genaue Berechnung der magnetischen Feldstärke vorgenommen werden, die für die Festlegung der Unsicherheiten in der Messung der Magnetfelder der Referenzanlage unerlässlich war.

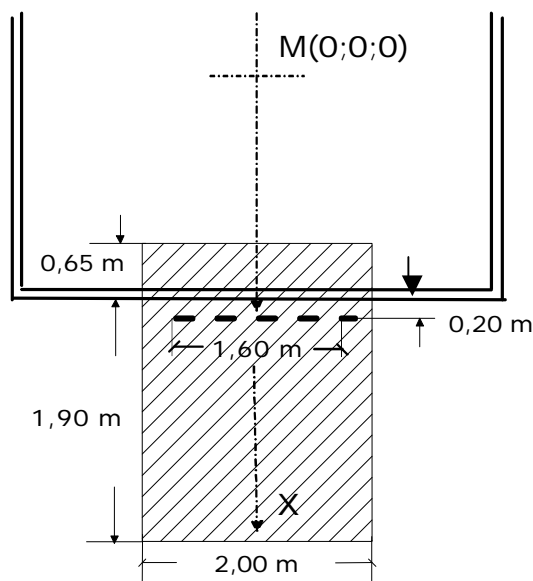


Bild 5.9: Abmessungen der Baustahlmatten am Boden und senkrecht zu den Leitern der Referenzanordnung und Ansicht der Feldmesssonde
Höhe der senkrechten Baustahlmatte 2,0 m

Zum Nachweis der zu erwartenden Einflüsse wurden solche Bewehrungen in zwei Anordnungen durch Baustahlmatten nachgebildet, wie sie in Bild 5.9 schematisch gezeigt sind

Bild 5.10 zeigt die gemessenen Absenkungen der Induktion im Vergleich zum ungestörten Drehstromfeld. Bereits die Baustahlmatte auf dem Boden führt zur Absenkung der Induktion um bis zu 10%. Bild 5.11 zeigt die gleichen Abhängigkeiten, wenn Baustahlmatten sowohl am Boden als auch in der Wand in Messrichtung vorhanden sind. Die Absenkungen betragen dann bis zu 22%.

Aus diesen Beobachtungen können zwei Schlüsse gezogen werden:

- Der Aufbau einer Referenzanordnung über einem mit Stahlbewehrung versehenen Fußboden ist nicht statthaft, ohne dass ihr Magnetfeld durch eine zuvor ebenfalls in einem genau bekannten Drehfeld kalibrierte Messsonde bestimmt wird. Eine Berechnung des magnetischen Feldes und die Bestätigung der Rechnung durch eine Messung, wie es in dem hier vorliegenden Fall geschehen ist, ist unter diesen Umständen nicht mehr möglich.
- Eine Berechnung der magnetischen Feldstärke in praktischen Anordnungen ist mit ausreichender Genauigkeit nur dann möglich, wenn stahlbewehrte Wände zwischen dem Beobachtungspunkt und den Stromleitern nicht vorhanden sind. Eine Stahlbewehrung im Boden könnte toleriert werden, wenn der Beobachtungspunkt ausreichend entfernt von der Bewehrung gewählt ist.

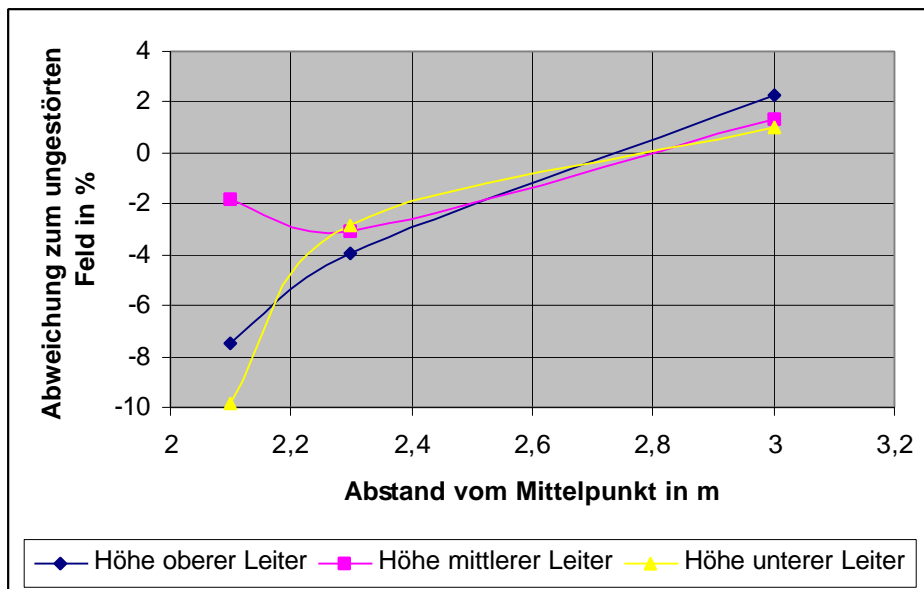


Bild 5.10: Abweichungen des durch eine Baustahlmatte auf dem Boden gestörten Magnetfeldes vom ungestörten Feld in Abhängigkeit vom Abstand zum Mittelpunkt der Referenzanordnung.
Drehstrom 407 A

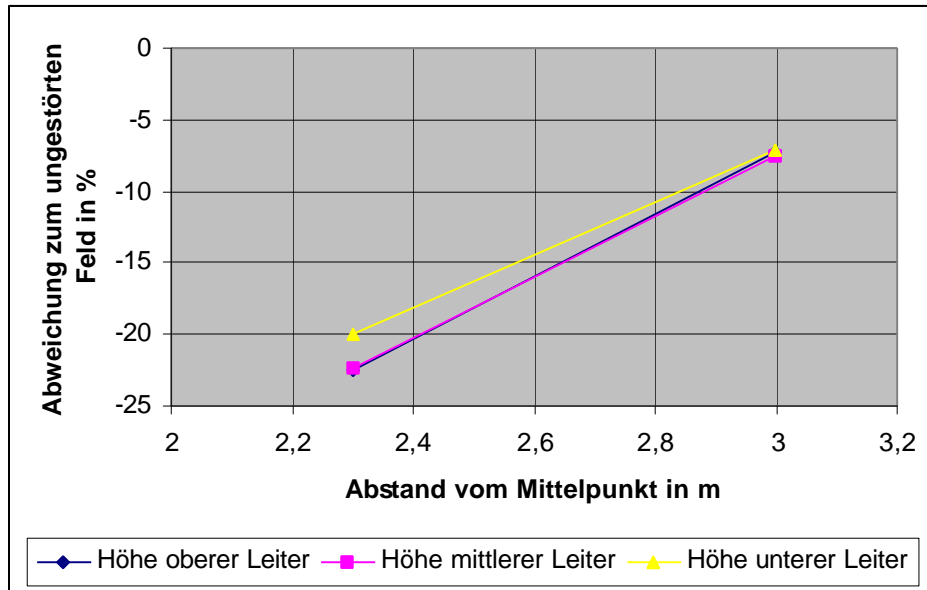


Bild 5.11: Abweichungen des durch Baustahlmatte auf dem Boden und senkrecht zur Messrichtung gestörten Magnetfeldes vom ungestörten Feld in Abhängigkeit vom Abstand zum Mittelpunkt der Referenzanordnung.
Drehstrom 407 A

5.6 Einflüsse von Oberschwingungen

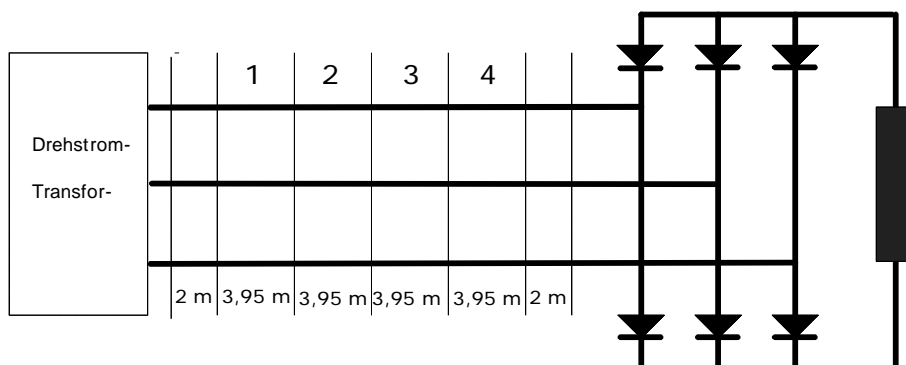


Bild 5.12: Schaltbild zur Erzeugung der Oberschwingungsströme durch einen 6pulsigen Gleichrichter
Die Zahlen geben die einzelnen Leiterabschnitte der Referenzanordnung nach Bild 3.1 an

Magnetfeld-Messeinrichtungen sind nicht in jedem Fall zur Messung von Oberschwingungsbehafteten Feldern geeignet. Sie sollten jedoch die 50-Hz-Komponente des Feldes mit ausreichender Genauigkeit messen können. Um die Referenzanordnung auch für eine solche Überprüfung zu ertüchtigen, wurde das Feld eines Oberschwingungshaltigen Stroms mit der in 5.2 beschriebenen Präzisionssonde gemessen.

Die hierzu gewählte Schaltung zur Erzeugung eines Oberschwingungshaltigen Stroms ist in Bild 5.12 wiedergegeben. Der damit erzielte Stromverlauf und dessen Oberschwingungsgehalt sind in Bild 5.13 wiedergegeben.

Die erzielten Ergebnisse sind in Bild 5.14 als Abweichungen zu den mit sinusförmigen Strömen gewonnenen Induktionswerten dargestellt. Die für die Grundschnwingungen geltenden Werte scheinen einen Trend zu systematisch mit dem Abstand vom Mittelpunkt sinkenden Abweichungen aufzuzeigen, doch sind die drei Ergebnisse für eindeutige Schlussfolgerungen zu gering.

Kontrollmessungen haben gezeigt, dass auch hier keine Nichtlinearität zwischen Induktion und Strom besteht.

Neben der Messung der Grundschnwingung bietet das Magnetfeld-Messgerät die Möglichkeit breitbandig mit einer Bandbreite zwischen 5 Hz und 1 kHz zu messen. Der Einfluss der Oberschwingungsströme auf den Effektivwert ist jedoch so gering, dass hierfür die gleichen Ergebnisse wie für die Grundschnwingung erzielt wurde.

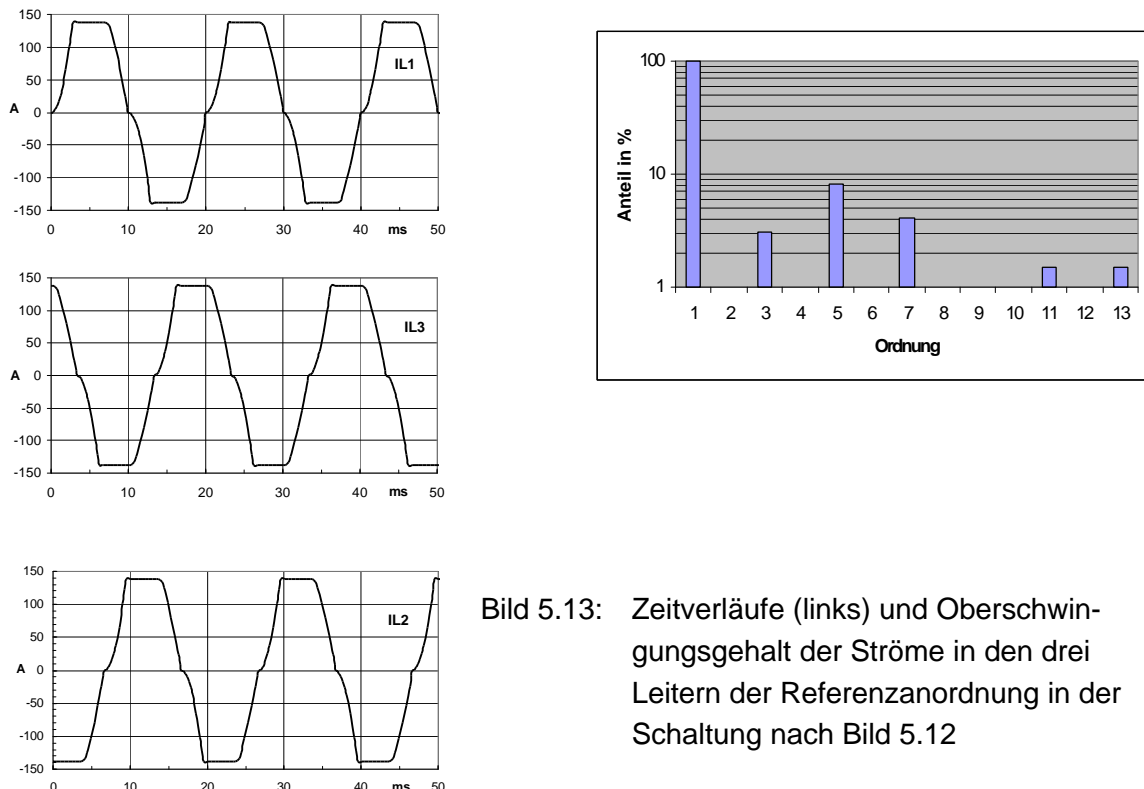


Bild 5.13: Zeitverläufe (links) und Oberschwingungsgehalt der Ströme in den drei Leitern der Referenzanordnung in der Schaltung nach Bild 5.12

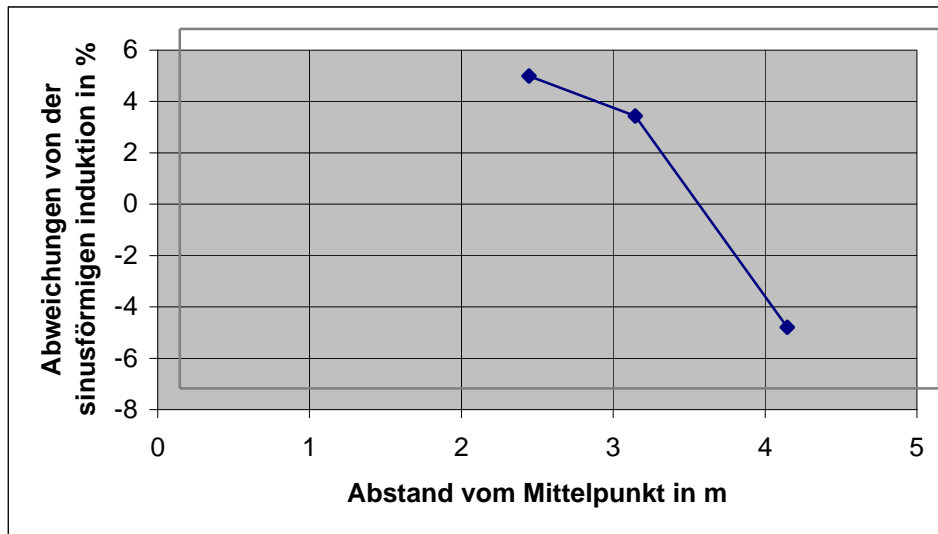


Bild 5.14: Abweichungen der Induktion durch die Grundschwingung des Oberschwingungsstromes gegenüber der Induktion bei sinusförmigem Drehstrom gleicher Amplitude in der x-Achse der Referenzanordnung in der Höhe des mittleren Leiters

6 Folgerungen

Die an der Referenzanlage mit sinusförmigen Drehströmen erzielte Übereinstimmung zwischen Berechnungen und Messungen der Induktionswerte ist Grund für die Annahme, dass das magnetische Feld dieser Anordnung bekannt ist. Die Unterschiede zwischen Messung und Rechnung liegen zwischen -2% und 3% , wobei wegen der sich bei der exakten Positionierung der Messsonden ergebenden Schwierigkeiten den Rechenergebnissen mehr Vertrauen geschenkt wird.

Auf der anderen Seite zeigen einige Messergebnisse Effekte, die in der Berechnung nicht festzustellen sind:

- Die gegenüber den Berechnungen höheren Werte in der Messung der Induktion an den beiden äußeren Leitern bei kleinen Abständen zu diesen Leitern.
- Die bei den Messungen festgestellte Stromabhängigkeit des magnetischen Feldes.

Bei Anwendung der Prinzipien zur Bestimmung der Messunsicherheiten z.B. nach der DKD-Richtlinie 3 auf die Unsicherheit der ortsabhängigen Induktion ergibt sich für einen Vertrauensbereich von 95% eine Induktionsunsicherheit von

$$u = k \cdot \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \sum a_i^2} \quad (14)$$

mit

k: = 2 für einen Vertrauensbereich von 95 %

a_i: Fehlermöglichkeiten

Für die Induktion in der x-Achse in der Höhe des mittleren Leiters ergeben sich die Unsicherheiten zu

a_F = 3% für die Unsicherheit aus der Übereinstimmung von Messung und Rechnung

a_S = 2% für die Unsicherheit der Stromabhängigkeit

a_I = 1% für die Unsicherheit in der Stromeinstellung und Strommessung

Es ergibt sich somit für diesen Bereich eine Unsicherheit in der Induktion der Referenzanordnung von

$$u = 4,3\%.$$

Es kann also gefolgert werden, dass die Induktion der Referenzanordnung in der x-Achse in der Höhe des mittleren Leiters mit einer Unsicherheit von etwa 4% bekannt ist. Für die Kalibrierung oder Überprüfung der Rechenprogramme oder der Magnetfeld-Messgeräte sollte die Induktion in diesem Bereich oder im Mittelpunkt der Referenzanlage angewendet werden. Bei den anderen Orten weichen Messung und Rechnung im Gebiet nahe den Leitern so stark voneinander ab, dass Aussagen über die Unsicherheiten hierfür kaum gemacht werden können.

Aufgrund der festgestellten Einflüsse von leitenden Teilen auf die Induktion ist die Aufstellung der Referenzanordnung in Gebäuden unzulässig, wenn Metallbewehrungen im Boden oder in den Wänden nicht sicher ausgeschlossen werden können.

Oberschwingungen scheinen einen systematischen Einfluss auf die gemessenen Induktionen auszuüben. Dieser Effekt kann nicht ausreichend genau spezifiziert werden und eine Überprüfung der Messgeräte bei überschwingungshaltigen Strömen ist anzuraten.

7 Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben wurde durch die Festlegung von zulässigen Grenzwerten für magnetische Feldstärken in der 26. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz (26. BimSchV) angeregt. Diese Festlegung hatte zur Folge, dass die von elektrischen Energieversorgungsanlagen verursachten Magnetfelder entweder durch Berechnungen oder durch Messungen bestimmt werden müssen. Das Forschungsvorhaben hatte daher das Ziel, eine Referenzanordnung mit genau bekanntem Magnetfeld zu erstellen, in der Berechnungsprogramme und Messeinrichtungen kalibriert oder in Diskussionsfällen überprüft werden können.

Die im Vorhaben gewählte Referenzanordnung zur Erzeugung von Magnetfeldern, wie sie in elektrischen Anlagen typisch sind, besteht aus einer quadratischen Anordnung mit den übereinander angeordneten drei Leitern eines Drehstromsystems. Die von der Anordnung erzeugten magnetischen Feldstärken wurden durch ein umfangreiches und erprobtes Rechenprogramm an verschiedenen Stellen berechnet. Die Berechnungen wurden durch Messungen mit Magnetfeldmesseinrichtungen verifiziert, wobei der Grad der Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung als Maß für die Unsicherheit in der Angabe der magnetischen Induktion angesehen wird.

Nach Beendigung des Forschungsvorhabens steht nun eine Anordnung zur Verfügung, bei der die ortsabhängigen magnetischen Induktionen in bestimmten örtlichen Bereichen mit einer Unsicherheit von etwa 4% bekannt sind. In diesen Bereichen haben Berechnung und Messung bei sinusförmigen Drehströmen geringe Abweichungen voneinander gezeigt, während in anderen Bereichen beträchtliche Abweichungen festgestellt wurden.

Es hat sich gezeigt, dass Rechnung und Messung nur dann gut übereinstimmen, wenn das Magnetfeld nicht durch Wirbelströme im Boden oder in Wänden gestört wird. Für Referenzanordnungen bedeutet dies, dass eine Aufstellung in Gebäuden nur dann möglich ist, wenn sichergestellt ist, dass keine stromführenden Bewehrungen oder Installationen in Boden und Wänden vorhanden ist. Die hier erstellte Referenzanlage befindet sich daher im Freien über natürlichen Boden. Wenn eine solche Aufstellung nicht möglich ist, muss das Magnetfeld der Anordnung mit einer sorgfältig an einer anderen Referenzanordnung überprüften Messeinrichtung gemessen werden.

Oberschwingungsströme können die Messung des Magnetfeldes merklich beeinflussen, insbesondere wenn die dritte Oberschwingung in den Strömen vorhanden ist. Hierbei sind die für das sinusförmige Drehfeld geltenden Zusammenhänge nicht ohne weiteres anwendbar und das Ergebnis der Messung hängt sehr von der im Gerät vorhandenen Auswerteelektronik ab. Eine Kalibrierung der Messgeräte in einem Drehfeld aus überschwingungshaltigen Strömen ist in jedem Fall anzuraten.

Das Forschungsziel wurde erreicht.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electro-magnetic fields (up to 300 GHz)
ICNIRP Guidelines
Health Physics, April 1998, Vol. 74, No. 4
- [2] Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern - Mess- und Berechnungsverfahren
VDE 0848, Teil 1, August 2000
- [3] Measurement of low-frequency magnetic and electric field with regards to exposure of human beings
Special requirements for instruments and guidance for measurement
IEC 61768 – 1998
- [4] W. M. Frix, G. G. Karady, B. A. Venetz: Comparison of Calibration Systems for Magnetic Field Measurement Equipment
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, January 1994
- [5] R. M. Sicree, G. B. Rauch, F. M. Dietrich: Comparison of Magnetic Flux Density Meter Responses over a Database of Residential Measurements
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 2, April 1993
- [6] An evaluation of instrumentation used to measure ac power system magnetic fields
IEEE Magnetic Fields Task Force
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 1, January 1991
- [7] R. G. Olsen, Ch. E. Lyon: Modeling of extremely low frequency magnetic field sources using multipole techniques
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No 3, July 1996
- [8] R. G. Olsen, S. L. Backus, R. D. Stearns: Development and Validation of Software for Predicting ELF Magnetic Fields Near Power Lines
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July 1995
- [9] P. Schwetz: Ein Verfahren zur Berechnung von dreidimensionalen Magnetfeldern im Nahbereich von Leitungen der elektrischen Energieversorgung
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 85 (1986), H. 21

- [10] O. Plotzke, G. Prümper: Effektivwert, Spitzenwert und Ersatzgrößen in n-dimensionalen Vektorfeldern
Elektrie 52 (1998) S. 7-9

- [11] H.-J. Haubrich: Das Magnetfeld im Nahbereich von Drehstrom-Freileitungen
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 73 (1974), H. 18

- [12] Magnetic fields from electric power lines - theory and comparison to measurements
IEEE Magnetic Fields Task Force
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988

- [13] W. Hadrian: Der Transformator als Feldquelle - Theoretische Grundlagen und messtechnischer Befund
Elektrie, Berlin 45 (1991) 6, S. 235 – 237

- [14] H. Bauer: Elektromagnetische Verträglichkeit von elektronischen Einrichtungen gegenüber technischen Magnetfeldern in der Nähe von Elektroenergieanlagen
Elektrie 45 (1991) S. 10

- [15] R. G. Olsen, P. S. Wong: Characteristics of low frequency electric and magnetic fields in the vicinity of electric power lines
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, October 1992