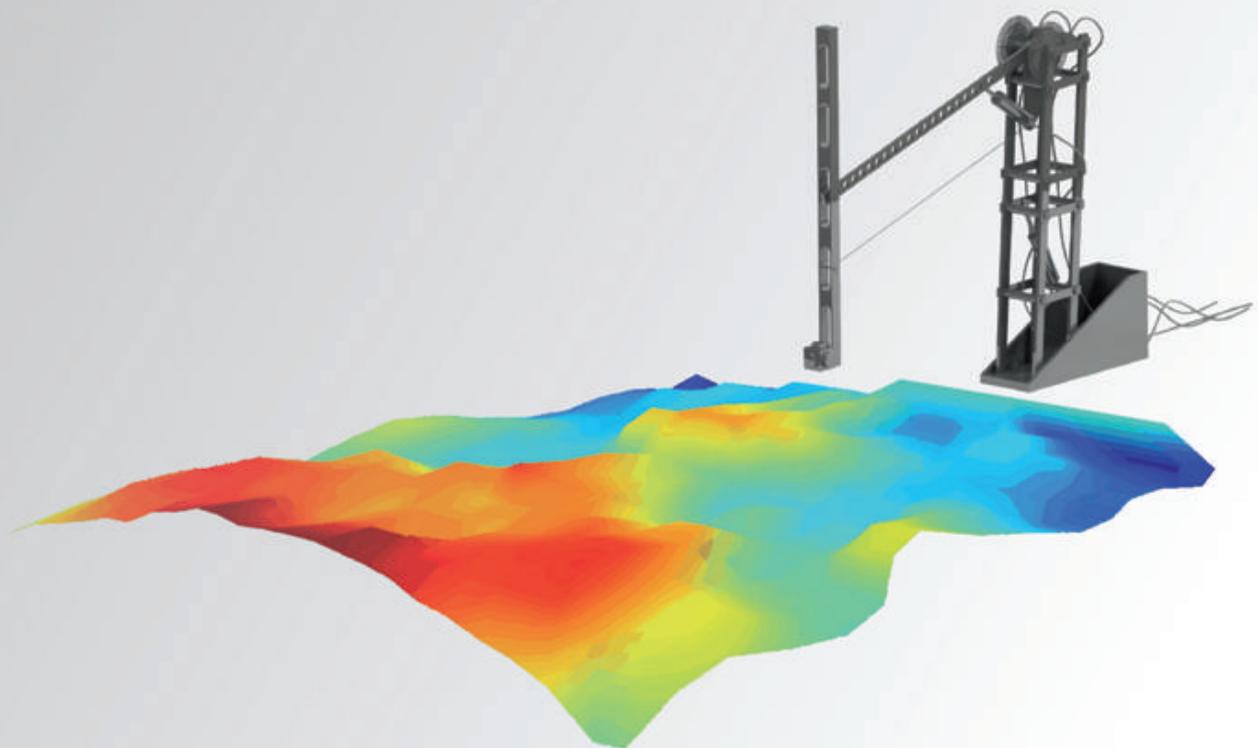


Automatisierte Messsysteme für elektromagnetische Felder komplexer Strahlungsquellen



Kai Haake



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

Automatisierte Messsysteme für elektromagnetische Felder komplexer Strahlungsquellen

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. Kai Haake

aus
Hamburg

2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2011

Zugl.: (TU) Hamburg-Harburg, Univ., Diss., 2011

978-3-86955-682-6

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. J. L. ter Haseborg

2. Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. C. Schuster

Tag der mündlichen Prüfung: 1. Oktober 2010

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2011

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2011

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-682-6

Danksagung

Diese Zeilen möchte ich nutzen, um meinen Dank denjenigen auszudrücken, die dieser Arbeit förderlich waren: Meinen über die gesamte Etage des Instituts verteilten Kollegen, die sich so oft meinen Kummer mit den Wellen anhören mussten und mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen, namentlich Herrn Dr. Schröder, der, obwohl fachfremd, das Gleiche tat und Herrn Dr. Brüns, der mich in die Welt der Diskretisierung von Strukturelementen einführte. Gedankt sei auch Herrn Prof. Dr. Dr. E.h. ter Haseborg für meine Anstellung am Institut und die Bereitstellung der Mittel, die der vorliegenden Arbeit ihre Grundlage gaben sowie Herrn Prof. Dr. Schuster, der freundlicherweise das Korreferat übernommen hat. Schließlich möchte ich auch Frau Brandlmaier meinen Dank aussprechen, die mich mit ihrer wundervollen Art sehr unterstützt hat.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der örtlich aufgelösten Bestimmung des elektrischen Feldes mit Hilfe von automatisierten Positioniersystemen (Robotern). Zur Vermessung unterschiedlicher Strahler mit komplexer Geometrie entstanden drei unterschiedliche Roboter, deren mechanische Konstruktion und elektronische Ansteuerung komplett im Rahmen der Promotionstätigkeit entwickelt wurde. Die Roboter unterscheiden sich grundlegend in Konstruktion und Bewegungsraum. Alle ermöglichen jedoch eine orts- bzw. winkelaufgelöste Abtastung über die Positionierung eines austauschbaren Feldmesssystems bzw. Prüflings bei gleichzeitiger geringer Beeinflussung des zu messenden Feldes. Dieses wurde sowohl durch die Wahl der Konstruktionsmaterialien, als auch durch spezielle Konstruktionen dieser Roboter ermöglicht.

Die Leistungsfähigkeit der Roboter für die automatisierte Feldvermessung und ihre geringe Beeinflussung konnten in der Arbeit anhand konkreter Feldanalysen dargelegt werden. So wurden die Strahlungsbilder verschiedener Strahlungsquellen mit komplexer Geometrie detailliert vermessen.

Die Untersuchung der Strahlungsquellen in der Arbeit ist thematisch wie folgt gegliedert:

- **Feldhomogenitätsuntersuchung der GTEM-5317:** Es wurde die Feldverteilung in horizontaler und vertikaler Ebene in der GTEM-5317 gemessen. Dieses geschah auch mit Fokus auf die Modenausbreitung, die in einer GTEM-Zelle für große Frequenzbereiche nicht mehr rein transversal elektromagnetisch ist. Zudem war es möglich, mittels eines speziellen Messaufbaus die Feldverzerrung in der GTEM-Zelle in Abhängigkeit des Beladungszustandes messtechnisch zu bestimmen.
- **Untersuchung der Abstrahlung von Antennen über leitender Ebene:** Es wurden eine Linear- und eine komplexe Rechteckantenne in Bezug auf ihre Abstrahlungscharakteristik, Gesamtabstrahlung und ihren Antennengewinn hin untersucht.
- **Feldkopplungsmessungen von Prüflingen in einer GTEM-Zelle in Abhängigkeit der Ausrichtung:** Es wurde die Einkopplung des elektromagnetischen Feldes in drei unterschiedliche Leiterbahnstrukturen in Abhängigkeit der Ausrichtung gemessen. Weiterhin wurden über die 15-Positionen-Methode die Dipolmomente von zwei Antennen bestimmt.

Die Vergleiche mit Ergebnissen numerischer Simulationen zeigen die hohe Güte der Feldvermessung, was auf eine geringe Beeinflussung des Feldes zurückzuführen ist. Mittels zusätzlicher Messungen mit Netzwerkanalysator und TDR konnte an einigen Stellen die Analyse der Felduntersuchungen zusätzlich unterstützt werden.

Die bei (automatisierten) Feldvermessungen auftretenden typischen Probleme wurden in der Arbeit an Beispielen herausgestellt, um die Ergebnisse der Messungen in Bezug auf ihre Güte einordnen zu können.

Inhalt

1	Einleitung	7
2	Grundlagen.....	10
2.1	Allgemeine Lösungen der Maxwellschen Gleichungen.....	11
2.2	Lösungen der Maxwellschen Gleichungen für spezielle Geometrien.....	12
2.2.1	Leitungswellenleiter - Modenausbreitung als Lösung der Maxwellschen Gleichungen.....	12
2.2.1.1	GTEM-Zelle	17
2.2.2	Wellenausbreitung im Freiraum	19
2.2.2.1	Kurze Empfangsantennen - Feldsensoren.....	24
2.3	Numerische Feldberechnung - Momentenmethode	26
3	Messtechnik und Messsysteme.....	28
3.1	Roboter	28
3.1.1	Konstruktionsmaterialien.....	28
3.1.2	Mechanik und Konstruktion.....	33
3.1.2.1	Roboter 1 - Positionierer mit pneumatischem Antrieb.....	36
3.1.2.2	Roboter 2 - Positionierer mit hydraulischem Antrieb	38
3.1.2.3	Roboter 3 - Positionierer mit elektrischem Antrieb	40
3.1.3	Software.....	42
3.2	Feldmesssysteme	43
3.3	Verwendung und Konfiguration der Messsysteme.....	46
4	Beurteilung von Fehlerquellen in der automatisierten Strahlungsmesstechnik	48
4.1	Einfluss des Hintergrundspektrums	48
4.2	Einfluss der Exzentrizität bei auf einer Kreisbahn abtastenden Feldmesssystemen	49
4.3	Feldverzerrung durch Nähwirkung des Sensorkopfes	51
4.4	Einfluss der räumlichen Messauflösung.....	52
4.5	Isotropiefehler	54
4.6	Einfluss der Veränderung der Messumgebung auf die Feldausbreitung.....	55
4.7	Auswirkung der Messunsicherheit bei der Verwendung logarithmischer HF-Detektoren	58
5	Messung und Simulation	60
5.1	Feldhomogenitätsuntersuchung der GTEM-5317	60
5.1.1	Untersuchung der Feldhomogenität in der x-z-Ebene der GTEM-5317	60
5.1.2	Untersuchung der Feldhomogenität in der x-y-Ebene der GTEM-5317	66
5.1.3	Untersuchung der Modenausbreitung in der GTEM-5317	71
5.1.4	Untersuchung der Feldverzerrungen durch Beladung der GTEM-5317	75
5.2	Feldkopplungsmessung von Prüflingen in einer GTEM-Zelle in Abhängigkeit der Ausrichtung	79
5.2.1	Richtungsabhängige Feldkopplungsmessung einer Platine.....	80
5.2.2	Bestimmung der äquivalenten Dipolmomente eines Strahlers.....	85
5.3	Untersuchung der Abstrahlung von Antennen über leitender Ebene	90

5.3.1	Messung verschiedener Abstrahlungsparameter von einer Linear- und komplexen Rechteckantenne.....	90
6	Ausblick.....	99
	Literaturverzeichnis	100

1 Einleitung

Mit steigender Ausnutzung der Frequenzspektren durch Funkübertragung und Störaussendungen durch immer höhere Prozessorgeschwindigkeiten in digitalen Geräten, einhergehend mit immer kleineren Signalpegeln und höheren Packungsdichten der elektronischen Bauelemente, wächst die Wichtigkeit der Untersuchung der feldgebundenen Kopplung als Bereich der Elektromagnetischen Verträglichkeit [Ao08], [Ba07]. Eine gezielte Analyse der Störquellen und Kopplungspfade ist für Maßnahmen zur Reduktion der Störaussendung oder Störeinkopplung essentiell. - Dafür werden detaillierte Informationen über die Antennenstrukturen und Feldverläufe benötigt [Ao08], [Ba07].

Zur Untersuchung der Feldverteilung stehen neben der Messtechnik auch numerische Simulationsverfahren als Alternative zur Verfügung [Ge03]. Mit steigender Komplexität und Frequenz wächst jedoch die Rechenzeit überproportional [Ge03], [Le00]. Außerdem sind die Ergebnisse nur maximal so gut, wie die Modelle, auf denen sie basieren, welche oft nur eine reduzierte Komplexität erlauben. So ist die Messtechnik nach wie vor bei komplexen Geometrien und hoher Frequenz ein Mittel, mit dem mit moderatem Zeitaufwand Daten über Feldverteilungen gewonnen werden können. Eine Automatisierung der Messprozeduren ermöglicht zudem einen Detailreichtum, welcher dem von Simulationen gleichkommt und spätere Analysen unterstützt.

Die Untersuchung komplexer Geometrien im Hinblick auf ihr Abstrahlverhalten erfordert hoch aufgelöste Feldmessungen, die mit manueller Positionierung einer Messsonde nicht mehr durchführbar sind.

Die Zielstellung der Arbeit war das Entwickeln von Positioniersystemen (Robotern), die das automatisierte Vermessen konkreter Strahlungsquellen mit komplexer Geometrie bei gleichzeitig geringer Messbeeinflussung ermöglichen.

Dazu wurden drei unterschiedliche der Problemstellung angepasste Roboter entwickelt. Neben einer schnellen und präzisen Positionierung mit hoher örtlicher Auflösung wurde besonders eine geringe Beeinflussung des zu messenden Feldes von den Spezialrobotern gefordert.

In Kapitel 2 der Ausarbeitung sind die wichtigsten Grundlagen für die nachfolgenden Abschnitte beschrieben. Es wird besonders auf Leitungswellenleiter und kurze elektrische Antennen eingegangen, da diese Themengebiete wesentlich für das Verständnis der Arbeit sind. Anschließend, in Kapitel 3, werden die Konstruktionen der drei entwickelten Roboter erläuternd dargestellt; dabei wird speziell auf die Materialwahl für die mechanischen Konstruktionselemente eingegangen. In diesem Abschnitt werden auch die verwendeten HF-Messsysteme vorgestellt. Es folgt in Kapitel 4 eine Abhandlung über verschiedene systematische Fehler bei (automatisierten) HF-Messungen, die für die Arbeit Relevanz besitzen. Die Fehlersimulationen dienen der Abschätzung der Güte der Messungen. Die messtechnischen Ergebnisse der Arbeit werden in Kapitel 5 dargelegt: Es werden die verschiedenen Strahlungsquellen vorgestellt sowie auch die Messaufbauten mit den jeweiligen Robotern für die automatisierte Feldvermessung beschrieben. Sofern die Möglichkeit und Notwendigkeit bestand, wurden die Messungen den Ergebnissen aus numerischen Simulationen gegenübergestellt. Teilweise wurden die Mess- und Simulationsergebnisse weitergehend analysiert. Obwohl dies kein ausgesprochener Bestandteil der Arbeit war, konnte so herausgestellt werden, welche Möglichkeiten detaillierte Feldvermessungen mit Spezialrobotern bieten. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick.

Die Veröffentlichungen, die im Rahmen dieser Promotion entstanden sind und bei denen der Verfasser als Haupt- oder Co-Autor auftritt, sind nachfolgend aufgeführt und im Literaturverzeichnis mit einem Stern (*) versehen.

- [Dy08] T. Dyballa, K. Haake, R. Keibel, T. Stadtler, J. L. ter Haseborg, „Measurement of the local distribution of the electric field coupled into shielding enclosures via apertures“, Electromagnetic Compatibility - EMC Europe: 2008 International Symposium, Hamburg, 8.-12. Sept. 2008, S. 455-458
- [Ha05] K. Haake, J. L. ter Haseborg, „Problems caused by insufficient electrical isolation in RF measurement setups“, International Symposium on EMC, Chicago, 8.-12. Aug. 2005, Vol. 1, S. 256-261
- [Ha06a] K. Haake, T. Stadtler, J. L. ter Haseborg, „Treatment of a low cost spherical coordinates electric field scanner under consideration of radiation measurement“, European Symposium on EMC, Barcelona, 4.-8. Sept. 2006, S. 690-694
- [Ha06b] K. Haake, J. L. ter Haseborg, „Vergleich verschiedener Messmethoden zur Bestimmung der Abstrahlung unterschiedlicher Strahlungsquellentypen“, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, 7.-9. März 2006, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 2006, S. 269-276
- [Ha07a] K. Haake, T. Stadtler, J. L. ter Haseborg, „On measuring the transfer function that correlates GTEM cell to OATS measurements“, European Symposium on EMC, Paris, 14.-15. Juni 2007
- [Ha07b] K. Haake, J. L. ter Haseborg, „Shielding effectiveness of mechanical feed through elements used in a GTEM cell“, International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Turin, 17.-21. Sept. 2007, S. 213-216
- [Ha08a] K. Haake, J. L. ter Haseborg, „Identification of the complex relative dielectric constant of porous polymers at different degrees of humidity“, Advances in Radio Science, Copernicus Publications, 2008, Vol. 6, S. 5-8
- [Ha08b] K. Haake, J. L. ter Haseborg: „High resolution field mapping inside a GTEM cell recorded with a new type of robot system“, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 50, 2008, S. 747-751
- [Ha08c] K. Haake, J. L. ter Haseborg, „Entwicklung eines speziellen 3-D-Positionierers zur automatisierten Bestimmung äquivalenter Multipolmomente in einer GTEM-Zelle für Emissionsmessungen“, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, 19.-21. Feb. 2008, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 2008, S. 261-268
- [Ha08d] K. Haake, J. L. ter Haseborg, „Precise investigation of field homogeneity inside a GTEM cell“, Electromagnetic Compatibility - EMC Europe: 2008 International Symposium, Hamburg, 8.-12. Sept. 2008, S. 225-228

- [Ha08e] K. Haake , J. L. ter Haseborg, „HIGH RESOLUTION SCAN OF THE E-FIELD DISTRIBUTION OF NON TEM MODES INSIDE A GTEM CELL”, 19th int. Wroclaw symposium & exhibition on electromagnetic compatibility, Breslau, 11.-13. Juni 2008, S. 277-280
- [Ha08f] K. Haake , J. L. ter Haseborg, „Determination of coupling of UWB pulses into complex PCB line structures using multi-alignment measurements“, International Symposium on EMC, Detroit, 18.-22. Aug. 2008, S. 1-5
- [Ha08g] K. Haake , J. L. ter Haseborg, „Development of a modular low cost robot for scanning the electromagnetic field within very large arbitrary areas or volumes”, Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 5/1, 2008, S. 49-46
- [KI08] C. Klünder, K. Haake, J. L. ter Haseborg, „Beschreibung der Abstrahlcharakteristiken von handelsüblichen Funksendern im 2,4-GHz-ISM-Band unter Gesichtspunkten der EMV“, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, 19.-21. Feb. 2008, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 2008, S. 381-388