

Wolfram Sorge
Beitrag zur Entwicklung von Störstrahlungstests
im Nahfeld großer Prüflinge

Beiträge aus der Elektrotechnik

Wolfram Sorge

**Beitrag zur Entwicklung von Störstrahlungstests
im Nahfeld großer Prüflinge**

 VOGT

Dresden 2009

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by Die Deutsche Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie;
detailed bibliographic data is available in the internet at <http://dnb.ddb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2009

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation
„Beitrag zur Entwicklung von Störstrahlungstests im Nahfeld großer Prüflinge“
von Wolfram Sorge überein.

© Jörg Vogt Verlag 2009
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor
Printed in Germany

ISBN 978-3-938860-25-0

Jörg Vogt Verlag
Niederwaldstr. 36
01277 Dresden
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
e-mail: info@vogtverlag.de
Internet : www.vogtverlag.de

Technische Universität Dresden

Beitrag zur Entwicklung von Störstrahlungstests im Nahfeld großer Prüflinge

Wolfram Sorge

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der
Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grads eines

Doktoringenieurs

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Professor Dr.-Ing. habil. Albrecht Reibiger

Gutachter: Professor Dr.-Ing. Karl-Heinz Gonschorek Tag der Einreichung: 10.10.2008

Professor Dr.-Ing. habil. Ernst Habiger Tag der Verteidigung: 14.08.2009

Dr.-Ing. Franz Schlagenhauer



Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand als Ergebnis meiner Tätigkeit an der Professur und am Laboratorium für Theoretische Elektrotechnik und Elektromagnetische Verträglichkeit (Professur TET und EMV) der Technischen Universität Dresden.

Mein Dank gilt allen, die zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben. Zuerst gilt er Herrn Professor Karl-Heinz Gonschorek, ehemaliger Inhaber der Professur TET und EMV, der mich als betreuender Hochschullehrer bei meiner Arbeit unterstützte und mir dabei Freiräume zu neuen Sichtweisen ließ. Ihm sowie Herrn Professor Ernst Habiger und Herrn Dr. Franz Schlagenhauer danke ich für das Erstellen der Gutachten zu dieser Arbeit.

Ein Anteil, wie sich anregende Fachdiskussionen oder weniger fachbezogene Hilfen im ganz alltäglichen Arbeitsleben in einer solchen Arbeit niederschlagen, ist nur schwer zu ermessen. Deshalb sei allen Mitarbeitern der Professur TET und EMV gleichermaßen für die gute und unkomplizierte Zusammenarbeit gedankt.

Mein Dank gilt Herrn Professor Hans Georg Krauthäuser, Inhaber der Professur TET und EMV, und Herrn Dr. Markus Wehr von der Rundfunk-Betriebstechnik GmbH Nürnberg für das Überlassen eigener Dissertationen, auf die ich Untersuchungen in meiner Arbeit aufbauen konnte. Er gilt den Herren Dres. Tim Hentschel und Thorsten Dräger von der Signalion GmbH Dresden, die mir die Teilnahme an zwei für diese Arbeit wichtigen Konferenzen ermöglichten. Er gilt Herrn Wieland Mann von der enprobe GmbH Berlin, der mir Abbildungen für diese Arbeit überließ, die z. T. über den Stand dieser Arbeit hinausreichen.

Mein Dank gilt nicht zuletzt meinen Eltern Christine und Raimund Sorge und meiner Schwester Sigrid, die lange vor Beginn dieser Arbeit die Weichen zum Erreichen ihrer Ziele stellten. Meiner Frau Christine danke ich für den familiären Rückhalt, mit dem ich diese Arbeit fertigstellen konnte.

Dresden, am 24. September 2009

Wolfram Sorge



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	IX
Legende	XI
1 Einführung	1
1.1 Motivation	1
1.1.1 Elektromagnetische Verträglichkeit großer Geräte	1
1.1.2 Ziel dieser Arbeit	2
1.2 Zur Felddescription komplexer Strahlersysteme	2
1.2.1 Der Weg zu einer umfassenden EMV-Analyse	3
1.2.2 Stromsynthese aus Felddaten	3
1.2.3 Möglichkeiten einer statistischen Auswertung des Strahlungsverhaltens	4
1.3 Störstrahlungstests nach genormten Testmethoden und Alternativen	5
1.3.1 Störstrahlungstests nach der Grundnorm CISPR 16	5
1.3.2 Alternativen zu genormten Methoden für Störstrahlungstests	6
1.3.3 Die Testdrahtmethode - Entwicklung anwenderfreundlicher Tests	8
1.4 Zum Inhalt dieser Arbeit	9
2 Grundlagen	11
2.1 Statistisches Auswerten von Meßdaten	11
2.1.1 Definition von Dichte- und Verteilungsfunktionen	11
2.1.2 In der EMV angewendete Wahrscheinlichkeitsverteilungen	13
2.1.3 Aussage von Datenmaxima über das Einhalten von Grenzwerten	16
2.1.4 Statistischer Test auf Einhalten eines Grenzwerts	22
2.2 Feldeigenschaften in der Strahlerumgebung	23
2.2.1 Ausbilden elektrischer Feldkomponenten bei der Reflexion ebener Wellen am Boden	24
2.2.2 Richtwirkung und Halbwertsfläche von Strahlern	25
2.2.3 Grenzen elektrisch kleiner Strahler	30
2.2.4 Abstandsgesetze für Strahler verschiedener Größe	34
2.3 Empfangseigenschaften von Antennen	40
2.3.1 Antennenübertragungsfaktor	40
2.3.2 Definition eines k-Faktors	41
2.4 Leitungsmodell für Feldeinkopplungen in lange Drähte	42
2.4.1 Koppelgleichungen und Systemmodell	42

2.4.2	Anpassen der Leitungsabschlüsse	44
2.4.3	Resonanzen bei der Feldeinkopplung in lange Leitungen	44
2.4.4	Übertragungs- und k-Faktor bei Einkopplung von Dipolfeldern	46
3	Methoden zur Feldstärkemessung	51
3.1	Messen gestrahlter Störaussendungen nach der Grundnorm CISPR 16	51
3.1.1	Freifeldmeßanordnung	51
3.1.2	Gründe für eine Weiterentwicklung von Störstrahlungstests	53
3.1.3	Forderung nach einer geschlossenen Testfläche	54
3.2	Optimales Abtasten von Testflächen	56
3.2.1	Die Halbwertsfläche als Maß für das Strahlungsverhalten	56
3.2.2	Punktezah bei gleichmäßig auf der Testfläche verteilten Meßpunkten	59
3.2.3	Meßpunktzahl bei Strahlern verschiedener Größe	62
3.2.4	Ableiten der Meßpunktdichte aus Feldstärkewerten	65
3.3	Feldregionen und Abstandsgesetz	69
3.3.1	Herleiten eines Abstandsgesetzes für große Strahler	70
3.3.2	Abstandsgesetz zum Bewerten von Grenzwertüberschreitungen im Normabstand	79
4	Alternative Test- und Meßmethoden für Störstrahlungen in Prüflingsnähe	85
4.1	Störstrahlungstests mit Testdraht oder Testrahmen	85
4.1.1	Trend der Ergebnisse bei Mehrfachmessungen	85
4.1.2	Ableiten des k-Faktors	89
4.2	Dipolgruppen mit großer Sensorfläche	91
4.2.1	Ersetzen eines Testrahmens durch kurze Dipole	91
4.2.2	Meßsonden mit geringer Rückwirkung auf das Feld	96
4.3	Praktisches Ausführen des adaptiven Feldstärkeabtastens	98
4.3.1	Aufbau einer Meßeinrichtung	98
4.3.2	Schließen auf Feldstärkemaxima in Normabstand	100
5	Zusammenfassung und Ausblick	103
5.1	Einordnen der Vorschläge zu alternativen Testmethoden	103
5.1.1	Ergänzungen zu Testmethoden für gestrahlte Störaussendungen nach der Norm CISPR 16	103
5.1.2	Die Testdrahtmethode als Schritt zur Entwicklung von Feldsensoren mit großer Sensorfläche	104
5.1.3	Alternative Testsysteme mit Eigenschaften langer Drähte	104
5.2	Offene Probleme und Ausblick	105
5.2.1	Störstrahlungstests in natürlichen Betriebsumgebungen	105
5.2.2	Ziel der Entwicklung eines Meßsystems aus Dipolen	105
A	Anhang	107
A.1	Ergänzungen zur Felddausbreitung großer Strahler	107

A.1.1	Definition von Feldregionen	107
A.1.2	Statistische Merkmale des reaktiven Nahfelds	109
A.1.3	Reflexionskoeffizienten bei realer Reflexion	111
A.2	Feldstärkemaxima bei verschiedenen Meßpunktzahlen	113

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird das Verhalten der Störstrahlung großer Prüflinge untersucht mit dem Ziel, vorhandene Standards für Störstrahlungstests wie CISPR 16 zu verbessern.

Diese Arbeit sieht als Standardtestumgebung einen reflektierenden, ausgedehnten Grund vor, auf dem sich der Prüfling befindet. Die Strahlung, die dieser aussendet, wird durch die Verteilung der elektrischen Feldstärke auf einer Testhalbkugel oberhalb des Grunds bewertet. Ihr Zentrum befindet sich am Fußpunkt des Prüflings. Eine solche Halbkugel stellt nahezu gleiche Abstände von etwa der Länge des Kugelradius' zwischen dem Prüfling und den auf ihr definierten Meßpunkten her. Da die Halbkugel geschlossen ist, kann auf ihr das gesamte vom Prüfling nach außen gestrahlte Feld nachgewiesen werden.

Meßabstände mit in Normen vorgegebenen Längen sind in der Praxis nicht immer einzuhalten, vor allem dann, wenn sich Prüflinge in einer normalen Betriebsumgebung befinden. In beengten Umgebungen ist es hilfreich, Meßabstände zu verkürzen. Hieraus ergibt sich eine kleinere Testhalbkugel, die sich leichter abtasten läßt.

Bei kurzen Meßabständen jedoch können Meßsonden in das Nahfeld des Prüflings ragen. Für diesen Fall werden in dieser Arbeit Feldeigenschaften in Prüflingsnähe untersucht. Aus denen ergeben sich Mindestabstände zum Prüfling, jenseits derer sich gemessene Feldstärkewerte zu größeren, in Normen vorgegebenen Abständen extrapolieren lassen.

Um die Verteilung der Feldstärke auf einer Testfläche zu beschreiben, wird der Begriff der Halbwertsfläche eingeführt: Die Halbwertsfläche definiert jenen Teil der Testfläche, auf dem die Dichte der abgestrahlten Leistung mindestens die Hälfte ihres Maximums beträgt. Die Halbwertsfläche ergibt sich aus der Richtwirkung des Prüflings als Strahler. Sie ist somit ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, auf der Testfläche das Strahlungsmaximum zu finden. Aus der Größe der Halbwertsfläche ergibt sich die nötige Anzahl an gleichmäßig auf der Testfläche verteilten Meßpunkten, um das Strahlungsmaximum mit gegebener Wahrscheinlichkeit zu finden. Wird an den Meßpunkten die Größe der Feldstärke berücksichtigt, läßt sich die Anzahl der Meßpunkte optimieren und das Vertrauen in den Test erhöhen.

Als ein erster Schritt zur Entwicklung einer praktikablen Strahlungstestmethode wird die Testdrahtmethode untersucht. Bei dieser Methode wird Strahlung mit einem langen, um den Prüfling herum gespannten Draht erfaßt. Die Strahlung induziert in dem Draht einen Strom, der an den Drahtabschlüssen gemessen werden kann. Weil der Draht i. allg. lang ist, ist er sehr meßempfindlich. Ist er jedoch länger als eine Wellenlänge des abgestrahlten Felds, sind sein Übertragungsfaktor und damit die Meßergebnisse schwer zu bestimmen. Statistische Methoden der Auswertung werden hierzu untersucht.

Ein System aus kleinen Meßsonden kann denselben Teil des Prüflings abdecken wie ein Testdraht. Weil als Übertragungsfaktor eines solchen Systems der einer Einzelsonde wirksam ist, lassen sich Ergebnisse aus Messungen mit einem solchen System leichter auswerten.

Jedoch ist die Empfindlichkeit kleiner Sonden i. allg. gering. Der Weg zu einer praktischen Anwendung führt somit vorerst in die Richtung herkömmlicher Meßantennen, die in einem beweglichen System geeignete Testflächen abtasten.

Legende

Verwendete Formelzeichen

a	Draht- bzw. Stabradius
a	Teilgebiet einer Testfläche mit überschrittenem Feldstärkegrenzwert
a	Abstand von einem Mittelwert eines Wertebereichs
a_{3dB}	Teilgebiet einer Testfläche, auf dem ein Schwellwert E_{3dB} überschritten ist
a_h	Halbwertsfläche als Teil einer Testfläche
c_0	Lichtgeschwindigkeit
d	Dipolabstand
d	Richtfaktor im logarithmischen Maß
e	Eulersche Zahl
f	allgemeine Funktion
f	Dichtefunktion
f	Frequenz
h	Höhe
i	Teilmenge einer Auswahlmenge
i	Zählindex
j	imaginäre Einheit
j	Zählindex
k	ausgewählte Teilmenge (natürliche Zahl)
k	Wellenzahl
k_A	Antennenübertragungsfaktor
k_{AS}	Übertragungsfaktor eines großen Sensors
k_{AL}	Übertragungsfaktor einer Leitung bei Feldeinkopplung
k_{Amax}	aus Datenmaxima gebildeter Übertragungsfaktor
k_F	k-Faktor
l	Antennen- oder Leitungslänge
l_D	Länge des Direktors einer Yagi-Uda-Antenne
l_R	Länge des Reflektors einer Yagi-Uda-Antenne
m	Anzahl
m	Freiheitsgrad der χ^2 -Verteilung
m	Mittelwert gemessener Daten
n	Anzahl
n	Teilmenge (natürliche Zahl)
p	(Treffer-)Wahrscheinlichkeit

Legende

p_h	Trefferwahrscheinlichkeit für die Halbwertsfläche a_h
r	Abstand zum Strahler
\vec{r}	Abstandsvektor zum Strahler
\vec{r}'	Abstandsvektor zwischen dem Phasenzentrum eines Strahlers und einem Strahlerelement
r_1	Abstand der Regionengrenze zwischen Nah- und Fernfeld vom Phasenzentrum
r_2	Abstand der Regionengrenze zwischen reaktivem und strahlendem Nahfeld vom Phasenzentrum
r_G	Radius eines Kreises, in dem kein Grenzwert überschritten wird
r_M	Meßabstand
r'_{max}	Radius der kleinsten einhüllenden Kugel um einen Strahler
r_N	Meßabstand nach einer Normvorgabe (Normabstand)
s	Standardabweichung gemessener Daten
s^2	Streuung gemessener Daten
t	Laufparameter
v	Verlaufsexponent der Feldstärke
v_0	festgelegter Wert des Verlaufsexponenten der Feldstärke
v_G	Verlaufsexponent der Feldstärke zwischen Meß- und Grenzwert
x	beliebige Größe
x	kartesische x-Komponente
x'	kartesische x-Komponente einer Quellgröße
x_0	Mittelwert eines Wertebereichs
$\langle x \rangle$	Erwartungswert der Größe x
y	kartesische y-Komponente
y'	kartesische y-Komponente einer Quellgröße
z	kartesische z-Komponente
z'	kartesische z-Komponente einer Quellgröße
\vec{A}	magnetisches Vektorpotential
A	Testfläche
A_{CISPR}	Testfläche nach CISPR 16
A_{Kug}	Projektionskugel für die Abstrahlung
B_m	Meßbandbreite
D	größte Strahlerausdehnung, Durchmesser
D	Richtfaktor
E	Feldstärkewert (elektrische Feldstärke)
E_0	Eingangsfeldamplitude
E_{3dB}	Schwellwert der Feldstärke bei 3 dB unter dem Feldmaximum
E_G	Feldstärkegrenzwert
E_{G3dB}	Feldstärkegrenzwert, gesenkt um 3 dB
E_{max}	Feldmaximum

E_M	Feldstärkewert in einem Abstand r_M bzw. im Meßabstand
E_N	Feldstärkewert in einem Abstand r_N bzw. im Normabstand
E_{NE}	äquivalente Rauschfeldstärke
F	Funktion der Strahlungscharakteristik
F	Verteilungsfunktion
H	Feldstärkewert (magnetische Feldstärke)
I	Stromstärke
\vec{J}	elektrische Stromdichte
\mathbf{K}	charakteristische sphärische Wellenfunktionen
K	konstanter Faktor, Skalierung
M	magnetischer Stromdichtewert
N	Gesamtmenge (natürliche Zahl)
N	Maximum wirksamer Wellenmoden
P	Leistung
P	Punkt, Meßpunkt
P_{St}	Strahlungsleistung
Q	Koeffizient einer charakteristischen sphärischen Wellenfunktion
R	Halbmesser von Flächensegmenten
R	Strahlerradius
R_h	Reflexionsfaktor einer horizontal zur Reflexionsfläche polarisierten Welle
R_v	Reflexionsfaktor einer vertikal zur Reflexionsfläche polarisierten Welle
S	Strahlungsleistungsdichte
T	Systemübertragungsfunktion
U	Spannung
V	Volumen
Z	Impedanz
α	Winkel der Feldpolarisation zum Lot
α	Schnitt durch den halben Öffnungswinkel
β	Phasenkonstante
ε	Permittivität
ε'	komplexe Permittivität
ε_0	Permittivitätskonstante
ε_r	relative Permittivität
ϑ	Winkel zwischen Vektor und senkrechter Koordinate
κ	Leitfähigkeit
λ	Feldwellenlänge
μ	Mittelwert
μ_L	Erwartungswert der logarithmischen Normalverteilung
$\mu(f)$	von der Frequenz abhängige Trendfunktion
ρ	Radius eines Testzylinders (Meßabstand am Boden)
σ	Standardabweichung

σ^2	Streuung
σ_L	Standardabweichung der logarithmischen Normalverteilung
σ_L^2	Streuung der logarithmischen Normalverteilung
φ	Auslenkwinkel
φ_R	Auslenkwinkel eines Teststrahmens
ξ	Winkel zwischen dem Vektor vom Phasenzentrum zum Meßpunkt und vom Phasenzentrum zum Strahlerelement
π	Kreiskonstante
τ	Bezugsparameter bei der Faltung
ψ	Erhebungswinkel
ω	Kreisfrequenz
$\Delta\phi$	Phasendifferenz
Γ	Leitungs- oder Feldwellenwiderstand
Γ_0	Feldwellenwiderstand im Fernfeld
Ω	Öffnungswinkel

Verwendete Abkürzungen

Abb.	Abbildung
ca.	circa (etwa)
CISPR	Comité international spécial des perturbations radioélectriques (Internationales Sonderkomitee für Funkstörungen)
d. h.	das heißt
ggf.	gegebenenfalls
i. allg.	im allgemeinen
Tab.	Tabelle
TEMCA2	Projektkürzel für „Alternative EMC Testing Methods for Large Machines“
o. g.	oben genannte
u. a.	unter anderem
u. U.	unter Umständen
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

1 Einführung

1.1 Motivation

1.1.1 Elektromagnetische Verträglichkeit großer Geräte

Moderne Elektrogeräte, -maschinen oder -anlagen enthalten viele Elemente zu ihrer Steuerung und zum Umsetzen von elektrischer Energie. Das Umsetzen elektrischer Energie in andere Energieformen erfordert einen hohen Aufwand für den elektromagnetisch verträglichen Betrieb. Bei Elektromaschinen fließen u. U. Ströme von mehr als 30 A in drei Phasen. Doch auch bei Geräten mit geringerer Stromaufnahme können Steuerschaltungen mit Frequenzen von mehreren hundert MHz getaktet sein und Oberwellen mit einem Vielfachen dieser Frequenzen erzeugen. Elemente der Energieumsetzung und der Steuerung sind durch Schnittstellen und Strompfade verbunden, die zusammen komplexe elektromagnetische Strahler bilden. So ist von Elektrogeräten und -maschinen eine große Störaussendung zu erwarten. Um zu verhindern, daß Elektrogeräte ihre Umwelt unzulässig beeinflussen, sind gesetzlich Obergrenzen für die Stärke der Störaussendung festgelegt. Diese sollen einen weitgehend störungsfreien Betrieb aller Geräte in ihrer Umgebung garantieren. Ein Überschreiten dieser Grenzen darf jedoch nicht erst anhand von Störungen festgestellt werden, sondern Tests müssen das Überschreiten anzeigen, bevor Störungen auftreten oder Menschen gefährdet werden.

Zahlreiche nationale und internationale Normen setzen die Obergrenzen für die elektromagnetische Strahlung in Gebrauchsvorschriften für Tests um. In ihnen werden Methoden vorgeschlagen, durch die sich das Einhalten von Grenzwerten überprüfen läßt. Grundlegendes für Tests großer Geräte beschreibt die internationale Grundnorm CISPR 16. Sie beinhaltet Testmethoden für drahtgebundene und gestrahlte Störaussendungen. Außerdem beschreibt sie Testaufbauten sowie weitere Gesichtspunkte, die mit diesen Testmethoden zusammenhängen. Der Abschnitt 1.3.1 dieser Arbeit gibt dazu an, wie weit diese Norm Ausgangspunkt und Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit ist. Weiterführend behandelt der Abschnitt 3.1 Grenzen dieser Norm. Als ein Ziel dieser Arbeit ergibt sich daraus, diese Grenzen zu erweitern.

Jedoch beschränkt sich diese Arbeit nicht nur auf Vorschläge zur Weiterentwicklung der Norm CISPR 16. Zunächst werden Phänomene zu Störstrahlungen untersucht und Analyse-möglichkeiten entwickelt. Anhand von Untersuchungen zu alternativen Testmethoden für gestrahlte Störaussendungen bietet diese Arbeit Ansätze zur Anwendung in der Praxis.

1.1.2 Ziel dieser Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die gestrahlte Störaussendung großer Prüflinge hinreichend genau zu bestimmen oder wenigstens einzuschätzen. Das betrifft die theoretische Beschreibung ihres Strahlungsverhaltens sowie dessen praktisches Testen. Solche Tests sind bereits in einer ganzen Reihe von Normen beschrieben. Der Umfang der Anforderungen und die Schwierigkeiten, die sich aus diesem Umfang ergeben, setzen den vorhandenen Normen Grenzen. So wird auch deutlich, daß z. B. von einer Norm vorgegebene Meßabstände nicht in allen Situationen eingehalten werden können. Deshalb gehören zum Thema dieser Arbeit Untersuchungen darüber, diese zu verkürzen.

Bei kurzen Meßabständen reichen die Meßmittel ins Nahfeld der Strahler, wodurch die Nahfeldbeschreibung ein besonderes Augenmerk erfordert. Hier bezieht diese Arbeit Beschreibungsmittel aus der Antennentheorie ein und baut auf Ergebnisse vorangegangener Arbeiten auf, so z. B. auf [WEH94].

Wenn in einem Test auf genormte Bedingungen verzichtet werden muß, sinkt das Vertrauen in die Ergebnisse. Weil sich jedoch nie alle Einflüsse beherrschen lassen, hängt die gemessene Störstrahlung großer Prüflinge stets auch vom Zufall ab. So müssen statistische Berechnungsmethoden einen Zusammenhang herstellen zwischen gewonnenen Ergebnissen und Normvorgaben. Doch auch, um den Aufwand von Störstrahlungstests richtig einzuschätzen, werden in dieser Arbeit Wahrscheinlichkeitsanalysen aus [SSC06] und [SSG08] weiterentwickelt. Auf der Grundlage dieser Analysen werden in den Kapiteln 3 und 4 Vorschläge zur Weiterentwicklung einer alternativen Testmethode unterbreitet.

In dieser Arbeit wird nichts über Tests von Serien ausgesagt und damit nichts über deren Prüfabläufe. Die beschriebenen Testmethoden sind für Einzelanfertigungen (Unikate) vorgesehen, d. h., jeder Prüfling wird für sich auf elektromagnetische Verträglichkeit untersucht. Grundlage dafür sind seine Strahlungscharakteristik und deren in Tests gewonnene Abbilder.

1.2 Zur Feldbeschreibung komplexer Strahlersysteme

In dieser Arbeit werden Strahlersysteme betrachtet, die die Wellenlänge des abgestrahlten Felds um ein Mehrfaches überschreiten können. Mit klassischen Mitteln, z. B. solchen aus der Antennentheorie, ist deren Abstrahlung nicht hinreichend genau zu beschreiben. Das Zerlegen eines Systems in Elemente ermöglicht in Grenzen eine Beschreibung als Antennensystem. Entscheidend dabei ist es jedoch, Ströme und Ladungen als Strahlungsursache richtig zu modellieren. Werden ihre Zustände und ihr Verhalten jedoch allein aus gemessenen Feldstärkewerten abgeleitet, ergeben sich Fehler in der Modellierung. Werden dann aus den so erzeugten Modellen wieder Störfelder errechnet, pflanzen sich die Fehler weiter fort (siehe Abschnitt 1.2.2).

Eine Aussage über die Abstrahlung eines Prüflings ist immer eine Aussage mit begrenztem Vertrauen in die Ergebnisse. Dieses Vertrauen läßt sich jedoch bewerten und in die Strahlungsanalyse einbeziehen (siehe Abschnitt 1.2.3).

1.2.1 Der Weg zu einer umfassenden EMV-Analyse

Der Hauptsatz der Hochfrequenztechnik besagt, daß das Feld eines Strahlers in einem Volumen dann bestimmt ist, wenn vollständig die Ersatzströme auf der Volumenoberfläche bestimmt sind. Schon während der Anfänge der modernen Physik wurde nachgewiesen, daß die Kenntnis aller elektrischen und magnetischen Tangentialfeldstärken auf einer geschlossenen Oberfläche um einen Prüfling herum das vollständige Berechnen des vom Prüfling verursachten Felds außerhalb der Oberfläche ermöglicht [LOV01]. Im Umkehrschluß wurde u. a. in [WEH94, GHS05, SSC06] gezeigt, daß bei unvollständiger Kenntnis der Tangentialfeldstärken nur eine ungenaue Feldberechnung möglich ist. [WEH94] schlägt deshalb vor, an möglichst vielen Meßpunkten die elektrische wie auch die magnetische Feldstärke mit allen kartesischen Komponenten in Betrag und Phase zu bestimmen und daraus ein hinreichend genaues Strahlermodell aus Ersatzdipolen zu synthetisieren. Grenzen für das Umsetzen dieses Vorschlags setzt jedoch die Praxis. Da für elektrisch große Prüflinge besonders viele Ersatzstrahler modelliert werden müssen, bleibt die hierfür notwendige Anzahl von Meßpunkten und -werten stets größer als die, die das praktische Messen ermöglicht.

1.2.2 Stromsynthese aus Felddaten

Für Antennen sind verschiedene Methoden entwickelt worden, um aus Felddaten deren ursächliche Ströme zu berechnen. Schwierigkeiten, solche Methoden auf komplexe Strahler zu übertragen, können an zwei Ansätzen aufgezeigt werden:

Strombelegung aus Tangentialfeldstärken auf einer Hüllfläche

Durch eine in [JON95] beschriebene Methode lassen sich Antennenströme aus Tangentialfeldstärken auf einer den Strahler umhüllenden geschlossenen Fläche berechnen. Die Orte, an denen die Strahlerströme fließen, müssen dabei bekannt sein, z. B. durch die Antennen-geometrie. Die Methode wendet so den Hauptsatz der Hochfrequenztechnik an (siehe Abschnitt 1.2.1). Die Form der Oberfläche, auf der die Ersatzströme angesetzt werden, kann durch Transformationen an Möglichkeiten mathematischer Methoden anpaßt werden. In der Praxis jedoch begrenzen Möglichkeiten von Testmethoden diese Anpassung. Bei großen Prüflingen kommen Schwierigkeiten wegen großer erforderlicher Datenmengen hinzu.

Ersatzströme aus Feldstärkewerten

Eine weitere Synthesemethode wurde u. a. in [LHS06] vorgestellt und geht zurück auf ein Integralgleichungssystem aus [BAL89]:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = -\frac{1}{4\pi} \iiint_V \begin{bmatrix} 0 & (z - z') & -(y - y') \\ -(z - z') & 0 & (x - x') \\ (y - y') & -(x - x') & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \frac{1 + j\beta r}{r^3} e^{-j\beta r} dx' dy' dz'. \quad (1.1)$$

Im Gleichungssystem (1.1) ergibt sich die Feldstärke \vec{E} in jedem Punkt außerhalb des Strahlers aus magnetischen Ersatzstromdichten $\vec{M}(x', y', z')$ im Strahler ($[M] = \frac{V}{m^2}$). Eine inverse Berechnung liefert aus bekannten Feldstärkewerten an bestimmten Orten magnetische Ersatzstromdichten für einen Strahler mit bekannter Geometrie, aus denen sich das Gesamtfeld rekonstruieren läßt.

In [LHS06] wurde die Synthesemethode auf die Feldberechnung zweidimensionaler Aperturantennen angepaßt. Bei der Entwicklung dieser Methode zeigte sich, daß für Antennenberechnungen eine hinreichend genaue Stromsynthese allein aus den Beträgen der elektrischen Feldstärke möglich ist. Das System (1.1) kann dazu stark vereinfacht werden, und der Phasenterm $e^{-j\beta r}$ in der Berechnung kann entfallen. Diese Methode kommt damit einer Anwendung auf Störstrahlungstests mit üblichen Meßempfängern oder Spektrumanalysatoren entgegen.

Ein Anwenden der Synthesemethode auf komplexe Strahler stößt jedoch schnell an Grenzen, weil zu einer ausreichend genauen Feldberechnung präzise die Abstände r von jedem Primärelement des Strahlers zu jedem Meßpunkt bestimmt werden müssen. Das setzt ein exaktes Modellieren des Strahlers voraus. Müssen bei komplexen Strahlern viele Primärelemente einbezogen werden, pflanzen sich auftretende Fehler in vielfältiger Weise fort. Solche Fehler treten schon bei der Synthese der Stromdichten in den Strahlerelementen auf. Sie fließen dann ein weiteres Mal in die Berechnung des Gesamtfelds aus den Stromdichten ein. Die Fehlerempfindlichkeit dieser Methode wird insgesamt so groß, daß schon kleine Positionsänderungen einzelner Strahlerelemente die Fernfeldstärke stark schwanken lassen. Eine erfolgreiche Anwendung auf komplexe Strahler kann damit nicht erreicht werden. Die Apertur einer Antenne hingegen ist i. allg. kleiner und erstreckt sich nur in zwei Dimensionen. Sie läßt sich somit einfacher modellieren. Die in [LHS06] vorgestellte Synthesemethode bleibt somit auf die Berechnung von Aperturantennen beschränkt.

1.2.3 Möglichkeiten einer statistischen Auswertung des Strahlungsverhaltens

Wie der Abschnitt 1.2.2 zeigt, sind die bekannten deterministischen Feldsynthesemethoden auf Grundlage gemessener Felddaten wegen ihrer Unsicherheiten zur Feldbeschreibung großer Strahler wenig geeignet. Wenn Unsicherheiten nicht zu vermeiden sind, müssen sie in die Feldanalyse einbezogen werden. Das legt nahe, Analysen auf statistische Betrachtungen aufzubauen. Dazu wird im Abschnitt 3.2 die Größe des Gebiets auf einer Testfläche, in dem Grenzwerte überschritten sind, ins Verhältnis gesetzt zur Größe der gesamten Testfläche. Im Abschnitt 3.3 werden in Gesetze zum Strahlungsverhalten elektromagnetischer Felder Unsicherheiten mit einbezogen, die sich besonders bei großen Strahlern einstellen. Diese Unsicherheiten bezeichnen u. a. Unterschiede zwischen dem Strahlungsverhalten großer und kleiner Strahler und zeigen einen Ansatz, um den Aufwand zum Beschreiben des Strahlungsverhaltens großer Strahler auf das kleiner Strahler zu senken.

1.3 Störstrahlungstests nach genormten Testmethoden und Alternativen

1.3.1 Störstrahlungstests nach der Grundnorm CISPR 16

Um die Störstrahlung von Geräten zu bewerten, wurden national wie international eine Reihe von Normen entwickelt. Viele von ihnen beziehen sich auf bestimmte Gerätetypen oder richten sich nach dem Bedarf der Anwender. Eine Norm, die in einer großen Breite Methoden vorschlägt, Störstrahlungen von Geräten und Anlagen zu erfassen, ist die Grundnorm CISPR 16. Diese Norm steht deshalb in besonderer Weise im Blickfeld dieser Arbeit.

Einen Überblick über die Neuorganisation der Grundnorm CISPR 16 im Jahr 2003 gibt u. a. [STE04]. Im Zuge dieser Neuorganisation ist diese Norm stärker als zuvor in Teile untergliedert. Von diesen Teilen sind nur solche Thema dieser Arbeit, die eine gestrahlte Störaussendung elektromagnetischer Felder behandeln. Teile der Norm CISPR 16, die in diese Arbeit nur wenig einbezogen sind, jedoch ebenfalls dieses Thema berühren, sind z. B.:

CISPR 16-1-4: Ausrüstungen zu Störstrahlungstests,

CISPR 16-4: Gesichtspunkte zu Unsicherheiten von Meßausrüstung und Meßverfahren.

In besonderem Maße behandelt der Normenteil CISPR 16-2-3 [CIS16] Testmethoden für Störstrahlungen, die auch Thema dieser Arbeit sind. Konkrete Gesichtspunkte zum Testen des Strahlungsverhaltens großer Prüflinge sind dabei:

Testumgebungen: Für beschriebene Testmethoden werden Umgebungen definiert, in denen diese auszuführen sind. Das sind sowohl Anordnungen in Labor- als auch in Betriebsumgebungen. Für große Prüflinge lassen sich Laborumgebungen häufig nicht einrichten. Untersuchungen hierzu erfolgen in dieser Arbeit nur für Freiraumanordnungen über reflektierendem Boden. Praxisbedingungen dazu werden nur kurz angeführt.

Messen bei Umgebungstörungen: Wenn Tests nicht in Laborumgebungen ausgeführt werden, ist mit Umgebungstörungen zu rechnen. Dazu empfiehlt [CIS16], wie Störungen im Testvorgang zu behandeln sind. In dieser Arbeit werden Störstrahlungstests im Nahfeld empfohlen. Hier übersteigt häufig die Störstrahlung des Prüflings die der Umgebung. Weitere Unterscheidungsmöglichkeiten zwischen Störstrahlungen vom Prüfling und Störsignalen aus der Umgebung werden nicht behandelt.

Betriebszustände des Prüflings: Ungeachtet der Breite der Norm CISPR 16 beschränkt sich diese Arbeit auf einen annähernd stationären Betriebszustand des Prüflings. Vor- und Anlaufzustände sind so im Testzustand abgeschlossen. Beim Wiederholen von Testreihen unter gleichen Bedingungen werden ähnliche Phänomene vorausgesetzt.

Klassifikation von Störsignalen und Störungsdauer: Störsignale werden in [CIS16] eingeteilt nach Wiederholung und Wirkungsdauer. In einem stationären Betriebszustand spielen dauerhafte oder periodisch wiederkehrende Störereignisse eine größere Rolle als einmalige. Während CISPR 16 vorschreibt, wie häufig und in welchem zeitlichen Abstand Tests für welche Phänomene zu wiederholen sind, beschränkt sich diese Arbeit auf über längere Zeit unveränderliche, gestrahlte Störsignale in einem Frequenzbereich von 30 MHz bis 1 GHz. Eine zeitliche Änderung der Störsignale beachtet diese Arbeit ebenfalls nicht.

1.3.2 Alternativen zu genormten Methoden für Störstrahlungstests

Wenn mit bisher verwendeten Testmethoden die elektromagnetische Verträglichkeit nicht ausreichend gewährleistet werden kann, ist eine Grenze der EMV-Analyse erreicht, die es zu überschreiten gilt. So gibt dieser Abschnitt einen Überblick über Ziele der Weiterentwicklung von Methoden zu Störstrahlungstests und schlägt Alternativen vor.

Anforderungen an Anordnungen für Störstrahlungstests

Das Vertrauen in Ergebnisse aus standardisierten Störstrahlungstests kann nur so groß sein, wie es der Entwicklungsstand der zugrundeliegenden Norm zuläßt. Damit die Norm CISPR 16 auch in Zukunft geeignete Testmethoden bereitzustellen vermag, bedarf sie der Weiterentwicklung, was das damit betraute CISPR-Subcommittee A bestätigt [STE04]. Die Entwicklung orientiert sich dabei an auftretenden Störphänomenen einerseits und an Möglichkeiten einer Testausführung in der Praxis andererseits. Die Anforderungen sind jedoch sehr vielfältig, so daß die Norm CISPR 16 keine allumfassende Testmethode anbieten kann. Einige ihrer Vorschläge lassen sich in der Praxis nicht überall ausführen. So kann z. B. ein Prüfling nicht auf einem Trägersystem positioniert werden, wenn sein Gewicht das zulässige dieses Systems überschreitet. Eine weitere Rolle spielen Kosten und Schwierigkeiten beim Transport zu Testlaboren. Oft bleibt nur übrig, Prüflinge an ihrem Betriebsort zu testen. Unter diesen Gesichtspunkten stellt diese Arbeit Ansätze vor, wie weit standardisierte Testmethoden, wie solche nach CISPR 16, durch alternative ergänzt werden können oder gar müssen.

Weil alternative Testmethoden während ihrer Entwicklung noch nicht von Normen erfaßt sind, sind für sie auch keine Normwerte spezifiziert. So muß ein Zusammenhang hergestellt werden zwischen alternativ und nach einer Norm gewonnenen Testergebnissen. In dieser Arbeit ergeben sich Unterschiede zwischen den Ergebnissen besonders aus den Meßabständen zum Prüfling. Aus dem Einfluß der Meßabstände folgen Forderungen zu folgenden Problemen:

Meßabstand: Bei Störstrahlungsmessungen am Betriebsort verhindern häufig die Ausdehnung des Prüflings und seine Umgebung das Einhalten von Standardmeßabständen von z. B. 10 m. Häufig lassen sich nicht einmal 3 m einhalten. Daher ist es ein Ziel

dieser Arbeit, aussagekräftige Meßergebnisse auch in kürzeren Meßabständen zu erzielen. Jedoch reichen dann die Meßsensoren ins Nahfeld der Prüflinge, was gesonderte Feldbetrachtungen erfordert. Das Eingrenzen des Nahfelds ist wie die gesamte Felddescription bei großen Prüflingen aufwendig. In die Entwicklung alternativer Methoden für Störstrahlungstests werden solche Betrachtungen mit einbezogen.

Antennenhöhe: Nicht immer kann eine vorgegebene Antennenhöhe eingehalten werden, weil z. B. der Umgebungsraum zu niedrig ist oder Meßantennen sich aus anderen Gründen nicht in entsprechender Höhe positionieren lassen. Aus dem Verkürzen des Meßabstands ergibt sich bei gleicher Antennenhöhe ein größerer Erhebungswinkel ψ (siehe Abb. 3.3).

Richtung der größten Abstrahlung: Die Hauptrichtung der Störstrahlung zeigt bei großen Prüflingen nicht immer auf einen in CISPR 16 festgelegten Meßpunkt. CISPR 16 legt keinen Meßpunkt oberhalb des Prüflings fest, sondern die Meßpunkte so, daß ihre Anordnung dem Mantel eines endlich hohen Zylinders um den Prüfling herum entspricht (siehe Abb. 3.1). Der Prüfling ist somit von Meßpunkten nicht vollständig eingeschlossen. Dadurch bleibt der Test unvollständig (siehe Abschnitt 3.1.3).

Störstrahlungen von außerhalb: CISPR 16 fordert einen Störabstand zwischen dem Feld des Prüflings und dem aus der Umgebung von 6 dB. Ausnahmen sind zugelassen, wenn die Summe beider Felder um 6 dB unter dem vorgegebenen Grenzwert liegt. Kann diese Forderung nicht erfüllt werden, soll der Prüfling entweder in einer günstigeren Testumgebung oder wenigstens zu einer Zeit mit weniger Fremdstörung gemessen werden. Eine Betriebsumgebung kommt dieser Forderung häufig nicht nach. Bei starker Störstrahlung des Prüflings, übersteigt in seiner Nähe das von ihm abgestrahlte Feld fremde Felder deutlicher als in der Ferne. Das läßt Tests in Prüflingsnähe vorteilhafter erscheinen.

Reflexionen in der Testumgebung: Oft ist in natürlicher Betriebsumgebung der Boden nicht die einzige Reflexionsebene, und zusätzliche Reflexionen beeinflussen die Meßergebnisse genauso wie Felder aus Fremdquellen. Bei Nahfeldtests überwiegt auch hier wegen ihres kürzeren Ausbreitungswegs die direkte Strahlung des Prüflings die indirekte.

Ziele für die Entwicklung alternativer Testmethoden

Neue Testmethoden sollen für Geräte und Maschinen in einer industriellen Umgebung entwickelt und dort ausgeführt werden. Dazu lassen sich folgende Ziele zusammenfassen:

- Prüflinge werden in ihrer Betriebsumgebung im Normalbetrieb geprüft.
- Testanordnungen werden so einfach wie möglich gehalten. Tests mit solchen Anordnungen sollen sich möglichst durch Personal ohne ausgeprägte Erfahrung oder Ausbildung in der EMV ausführen lassen.

- Testanordnungen benötigen wenig Platz und können in Betriebsumgebung in der Nähe des Prüflings aufgebaut werden.
- Testmethoden sind weitgehend umgebungsunabhängig und können so Ergebnisse auch unter Störeinflüssen erzielen.

Bei der Entwicklung alternativer Testmethoden muß immer ein Kompromiß gefunden werden zwischen einfacher Ausführung der Anordnung und dem Nutzen der Ergebnisse. So erfordert das Bestimmen der Strahlungscharakteristik eines komplexen Strahlersystems einen hohen Testaufwand. Dieser verringert sich, wenn die Hauptrichtung der Abstrahlung bekannt ist. Da diese im Voraus jedoch nur selten bekannt ist, sinkt das Vertrauen in die Ergebnisse von Tests, die nicht alle Richtungen der Abstrahlung berücksichtigen.

Im Abschnitt 1.3 und in [GHS05] wurde bereits darauf hingewiesen, daß auch genormte Störstrahlungstests nach [CIS16] nicht das gesamte Gebiet um einem Prüfling herum erfassen können und damit nur einen Teil der Störstrahlung. Für Störstrahlungstests über dem Boden eignet sich als geschlossene Testfläche die Fläche einer Halbkugel mit dem Prüfling in der Mitte [GHS05, SSC06]. Verteilung und Dichte von Meßpunkten auf der Testfläche bestimmen das Vertrauen in die Ergebnisse, daß diese ein Störstrahlungsmaximum anzeigen. In den Abschnitten 3.2.2 und 3.2.3 sind diese Zusammenhänge näher beschrieben.

Vergleich verschiedener Testmethoden

Zum Vergleich verschiedener Testmethoden lassen sich effizient statistische Methoden auf Zusammenhänge zwischen Einfluß- und Meßgrößen anwenden. So kann z. B. ein Übertragungsfaktor mit erweiterter Definition als Bewertungskriterium für die Empfindlichkeit von Strahlungssensoren herangezogen werden (vgl. [DIJ05]). Der Übertragungsfaktor braucht sich also als Kenngröße nicht auf Antennen zu beschränken. Durch Erweiterungen der Definition lassen sich Alternativtests mit Testvorschlägen aus Normen vergleichen, z. B. mit Vorschlägen aus CISPR 16 (siehe Abschnitt 4).

1.3.3 Die Testdrahtmethode - Entwicklung anwenderfreundlicher Tests

Bei der Entwicklung alternativer Methoden zum Testen von Störstrahlungen werden verschiedene Ansätze verfolgt, die zum Teil von konventionellen Methoden wegführen. Diese Arbeit führt diese Entwicklung weiter und weist dabei nicht immer in die Richtung bisheriger Untersuchungen. So wurde in [GHS03, GHS05] die Testdrahtmethode als Methode für Störstrahlungen vorgestellt, bei der ein Drahtsensor den Prüfling umschließt. Wenn ein Test für die elektromagnetische Strahlung nur mit Hilfe eines langen Drahts ausgeführt werden kann, steht eine ökonomisch günstige Testmethode zur Verfügung. Als weitere Vorteile werden erwartet:

- ein einfacher Aufbau der Testanordnung,

- das Ausführen von Tests bei laufendem Betrieb in ungünstigen Raumverhältnissen,
- ein geringerer Einfluß von Fremdstörungen auf den Testraht in der Nähe des Prüflings.

Trotz vieler Vorteile lassen Testdrahtmethoden keine gesicherten Testergebnisse erwarten. Ein langer Draht stellt einen Sensor mit vielen Unsicherheiten dar. Diese Unsicherheiten ergeben sich einmal aus dem Verhalten des Drahts selbst, aus der Wechselwirkung zwischen ihm und dem Prüfling und dem Einfluß der elektromagnetischen Umwelt. So wurde schon in [VIG04] auf mögliche Anwendungen hingewiesen, jedoch auch darauf, daß ein Testdraht zu einem ausgedehnten Prüfling wie eine große Maschine schwer optimal positioniert werden kann.

Alle bisherigen Veröffentlichungen zu dieser Methode zeigen, daß das Ergebnis einer Einzelmessung mit einem elektrisch großen Sensor nur eine Tendenz der Störstrahlung aufzeigt. In [GHS03, GHS05] werden deshalb Schlußfolgerungen erst aus einer großen Anzahl von Testdurchläufen gezogen. Dabei hebt sich durch das Bilden des Maximums aus vielen gewonnenen Testdaten ein Trend hervor mit dem das Sensorverhalten bewertet werden kann (vgl. Abschnitt 2.1.3).

In [CIS16] ist für eine ähnliche Anwendung wie der Testdraht bereits die Van-Veen-Antenne standardisiert. Jedoch sind hier Antenne und Prüfling kleiner als eine halbe Wellenlänge des abgestrahlten Felds. Als Höchstfrequenz für die Anwendung sind 30 MHz festgelegt. Ein Testdraht, der i. allg. länger ist als eine halbe Wellenlänge, liefert deutlich veränderte Testergebnisse. Das Modell einer Leitung über dem Boden erlaubt einen Überblick über einfache Koppeleigenschaften von Langdrahtsensoren. Schon die Leitungstheorie macht deutlich, daß der Zusammenhang zwischen eingekoppeltem Feld und der Spannung am Drahtabschluß nicht eindeutig ist (siehe Abschnitt 2.4) und daß bei der Auswertung der Ergebnisse auf andere, z. B. statistische Verfahren zurückgegriffen werden muß.

Das Verhalten des Testdrahts und seine Wechselwirkung zur elektromagnetischen Umwelt wird im Abschnitt 4.1 analysiert. Mehrdeutige Testergebnisse bei großen Sensoren heben deren Vorteile zum Teil wieder auf. Nützlich ist daher ein Testsystem, das den Vorteil eines großen Sensors, viele Feldanteile gleichzeitig erfassen zu können, mit der Übertragungskennlinie eines kleinen Sensors in sich vereinigt. Im Abschnitt 4.2 wird zu diesem Zweck untersucht, wie sich viele kleine Sensoren zum Bestimmen der Störstrahlung eignen, wenn sie zu einem Sensorsystem vereinigt sind.

1.4 Zum Inhalt dieser Arbeit

In dieser Arbeit werden das Störstrahlungsverhalten großer Prüflinge und Möglichkeiten seiner Bewertung untersucht. Nachdem als Einleitung in diesem Kapitel die Untersuchungen dieser Arbeit und deren Ziele umrissen sind, werden folgende Themen behandelt:

Als Grundlage der Untersuchungen zeigt das Kapitel 2 mathematische und feldtheoretische Methoden dieser Arbeit auf, die auf Störstrahlungsanalysen angewendet werden. Zu

den in dieser Arbeit beschriebenen mathematischen Methoden gehören vor allem statistische Analysen, die im Abschnitt 2.1 erklärt sind. Zu den feldtheoretischen Methoden gehört eine Analyse des Strahlungsverhaltens allgemeiner Strahler und von Antennen im Abschnitt 2.2. Im Rahmen von Beschreibungen zu Empfangseigenschaften von Antennen (siehe Abschnitt 2.3) wird im Abschnitt 2.4 ein Modell zur Feldeinkopplung in Leitungen behandelt. Aufgrund dieser Gesetzmäßigkeiten läßt sich die im Abschnitt 4.1 behandelte Testdrahtmethode in Ansätzen theoretisch bewerten.

Das Kapitel 3 geht auf das Strahlungsverhalten großer Prüflinge ein und auf Möglichkeiten zu dessen Beschreibung. Ziel ist es dabei, die Beschreibung so zu vereinfachen, daß sie sich auch in praktischen Situationen ausführen läßt. Im Zusammenhang mit einer Feldmessung an vielen Meßpunkten in gleichem Abstand zum Prüfling ergeben sich Anhaltspunkte zur Testsicherheit von Testmethoden. Im Abschnitt 3.1 werden dazu Probleme analysiert, die bei standardisierten Testmethoden auftreten, wie z. B. solchen nach der Norm CISPR 16. Durch alternative Methoden soll das Feld besonders in der Richtung der stärksten Störstrahlung bestimmt werden, auch wenn diese Richtung vor Testbeginn unbekannt ist. So wird im Abschnitt 3.2.2 die Wahrscheinlichkeit bestimmt, mit der ein Störfeld in einem genormten Meßabstand einen Grenzwert überschreiten kann. Aus dieser Wahrscheinlichkeit ergibt sich eine Mindestzahl von Messungen, durch die ein Nichtüberschreiten des Grenzwerts nachzuweisen ist [GHS05, SSC06]. Hieraus leitet sich eine Grundlage für Testpläne ab.

Diese Arbeit stellt vorhandene Normenwerke nicht grundsätzlich in Frage, sondern schlägt Verbesserungen zu einer begrenzten Anzahl von Gesichtspunkten vor. Im Kapitel 4 ist die Weiterentwicklung standardisierter Testmethoden begründet, und es werden Alternativen vorgeschlagen. Die vorgestellten alternativen Testmethoden werden im Hinblick auf die Entwicklung vorhandener Normen bewertet und mit standardisierten Methoden verglichen. Für standardisierte wie für alternative Methoden werden Grenzen aufgezeigt.

Da auch diese Arbeit die Entwicklung von Störstrahlungstests nur einen Schritt weiterbringen kann, verweist der Abschnitt 5.2 auf Ziele dieser Entwicklung, die jedoch über den Horizont dieser Arbeit hinausreichen.