Bachelorarbeit

PRECOMPLIANCE-MESSUNG MIT EINER TEM-ZELLE

ausgeführt am



Fachhochschul-Bachelorstudiengang Automatisierungstechnik

von

Ulrich Schratter

Personenkennzeichen

1010321032

betreut und begutachtet von Dipl.-Ing. Dr. techn. Manfred Pauritsch

Graz, im Juni 2013

Unterschrift

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

.....

Unterschrift

GLEICHHEITSGRUNDSATZ

Um den Lesefluss nicht durch eine ständige Nennung beider Geschlechter zu stören, wird in dieser Arbeit ausschließlich die männliche Form verwendet. Dies impliziert aber immer auch die weibliche Form.

DANKSAGUNG

Ich möchte mich recht herzlich bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Dr. techn. Manfred Pauritsch bedanken, der mir die Möglichkeit zur Bearbeitung dieses Themas gegeben hat. Ich bedanke mich bei Thomas Liebmann und der Firma Metallbau Stering, die bei der praktischen Realisierung ausgezeichnete Arbeit geleistet haben. Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Familie und ganz besonders bei Sandra bedanken, die mich moralisch unterstützte und mir den Rücken gestärkt hat.

KURZFASSUNG

Durch die Ausführungen in dieser Arbeit werden aufgezeigt, welcher technische Aufwand und welches theoretische Wissen erforderlich sind, um Störabstrahlungsmessungen gemäß Richtlinien für elektromagnetische Verträglichkeit durchführen zu können. Es wird auf Normen und Gesetze verwiesen, die gültige Grenzwerte beinhalten und die erforderlichen Messmethoden beschreiben. Nach einer kurzen Einführung in die Ausbreitungseigenschaften elektromagnetischer Wellen werden alle standardisierten Messmethoden beschrieben und deren Vor- und Nachteile aufgezeigt.

Die Möglichkeit der Messung von Gleichtakt- und Gegentaktströmen mithilfe von Nahfeldsonden für Vorabmessungen während der Entwicklungsphase wird beschrieben und auf deren Aussagekraft eingegangen.

Der Fokus liegt auf einer nach dieser Arbeit konstruierten TEM-Messzelle (Transversal Elektromagnetische Welle) mit der die Möglichkeit einer Messung der elektromagnetischen Abstrahlung unter gewöhnlichen Laborbedingungen praktisch ermöglicht wird. Dabei werden elektrostatische und elektrodynamische Simulationsprogramme genutzt, um sowohl die Eigenschaften einer TEM-Messzelle zu untersuchen, als auch die nötigen Abmessungen zur erfolgreichen Konstruktion der Messzelle zu eruieren.

ABSTRACT

The scope of this text is to point out the requirements for the successful measurement of electromagnetic emissions for electromagnetic compatibility tests. This is done by finding out the technical effort and the needed theoretical knowledge. Therefore references to standards and laws including limits and measurement methods are made. After a short discourse about the propagation properties of electromagnetic waves the standardized measurement methods are described with their advantages and disadvantages.

Different options for the measurement of common and differential mode currents with near field probes for precompliance measurements are discussed and the significance of such measurements is evaluated.

However the focus lies on the construction of a TEM cell (transversal electromagnetic wave) for the measurement of electromagnetic emissions in ordinary laboratories. For this reason electrostatic and electrodynamic simulations are made for validating the properties of measurement cells as well as for determining the dimensions for the construction of the cell.

INHALTSVERZEICHNIS

1	E	inle	itun	g	1		
2	L	Lösungsansatz			2		
3	Elektromagnetische Verträglichkeit - EMV			agnetische Verträglichkeit - EMV	3		
3.1			Nał	n- u. Fernfeld	4		
3.2			Ges	etzliche Grundlage	5		
	3.3		Gre	nzwerte für elektromagnetische Störstrahlung	7		
4	E	Emissionsmesstechnik			9		
	4.1 Freifeldmessplatz (OATS Open Area Test Side)			feldmessplatz (OATS Open Area Test Side)	9		
	4.2		Reflexionsarmer Schirmraum – Absorberraum 1				
	4.3	1.3		Modenverwirbelungskammer			
	4.4		TEI	A-Messzelle (Transversal-Elektromagnetische-Welle) 1	12		
	4.5		GT	EM-Messzelle (Gigahertz-Transversal-Elektromagnetische-Welle)	14		
5	P	rec	omp	liance1	15		
	5.1		Gleichtaktströme auf Kabeln		15		
	5.2		Nał	ıfeldsonden1	16		
	5.3	3 1-m Störfeldmessung		Störfeldmessung1	17		
	5.4		TEI	Л-Zelle 1	18		
	5	5.4.1		Konstruktion einer TEM-Zelle 1	18		
	5	.4.2 Ermittlung des Wellenwiderstandes mithilfe elektrostatischer Simulation		Ermittlung des Wellenwiderstandes mithilfe elektrostatischer Simulation 1	19		
	5	5.4.3 Untersuchung der Fernfeldbedingungen mithilfe elektrodynamischer Simulation		Untersuchung der Fernfeldbedingungen mithilfe elektrodynamischer Simulation	21		
	5	5.4.4		Ermittlung der Streuparameter mithilfe elektrodynamischer Simulation	23		
	5	6.4.5		Untersuchung auf Eigenresonanzen mithilfe elektrodynamischer Simulation	24		
	5	6.4.6		Störabstrahlungsmessung in TEM-Zellen 2	25		
		5.4	.6.1	TEM Mode2	25		
		5.4	.6.2	Testvolumen	25		
	5.		.6.3	Messmethode	25		
	5	5.4.7		Praktische Ausführung2	27		
6	E	Ergebnisse und Ausblick		se und Ausblick2	29		
Li	tera	turv	erze	ichnis	30		
Abbildungsverzeichnis				31			
Т	abellenverzeichnis						

1 EINLEITUNG

Die Einhaltung der Grenzwerte zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) ist als Teil des CE-Kennzeichens gesetzliche Voraussetzung, um Produkte in der EU in Umlauf zu bringen. Die Quelle der Störungen sind neben elektromechanischen Elementen wie Motoren und Relais, elektronische Bauteile die diskret aufgebaut oder als integrierte Schaltkreise zur Realisierung der Schaltung in unterschiedlichsten Produkten dienen.

Der Nachweis, dass hinsichtlich Störabstrahlung alle Grenzwerte eingehalten werden, kann durch eine akkreditierte Messstelle erfolgen. Die Möglichkeiten um diese Ergebnisse vorab quantitativ abschätzen zu können sind sehr begrenzt. Daraus ergibt sich die Aufgabenstellung dieser Arbeit, Möglichkeiten zu suchen, durch diese vorab Abstrahlungswerte gemessen werden können.

Abbildung 1 stellt einen Überblick über die in dieser Arbeit behandelten Themen in Form eines grafischen Projektrahmens dar.



Abbildung 1: Grafischer Projektrahmen, Quelle: Eigene Darstellung

2 LÖSUNGSANSATZ

Um gewünschte Emissionsmessungen, wie sie als Teil der EMV-Prüfung notwendig sind, durchführen zu können, benötigt man grundlegendes Wissen über die Ausbreitungseigenschaften elektromagnetischer Wellen im freien Raum.

Weitere wichtige Punkte sind das Wissen um die Grenzwerte welches das zu entwickelte Produkt einhalten muss, und durch wen diese vorgeschrieben werden. Dazu soll eine Übersicht über notwendige Normen erstellt werden.

Des Weiteren sollen angewandte Verfahren zur Störabstrahlungsmessung bekannt sein, um Ihre Eignung zur Vorabmessung unter gewöhnlichen Laborbedingungen bewerten zu können, bzw. um auf weitere Möglichkeiten eingehen zu können, die die Einflüsse gewöhnlicher Umgebungsbedingungen berücksichtigen.

Durch den gegenüber Absorberkammern einfacheren Aufbau von Messzellen wird der Fokus dieser Arbeit auf eine TEM-Zelle (Transversale Elektromagnetische Welle) gerichtet. Insbesondere die Funktionsweise einer TEM-Zelle und die Möglichkeit damit Abstrahlungsmessungen durchzuführen sollen untersucht werden. Es sollen die Voraussetzungen erarbeitet werden, um eine TEM-Zelle zu konstruieren und zu fertigen. Dabei müssen die Einschränkungen solcher Messungen berücksichtigt werden.

3 ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT - EMV

Elektromagnetische Verträglichkeit beschreibt die Anforderung an elektrische Geräte, sich gegenseitig nicht zu beeinflussen. Dabei gilt es einerseits die Aussendung von elektromagnetischer Energie zu reglementieren als auch andererseits die Beeinflussbarkeit von Geräten durch äußere Störungen zu minimieren. Als Sender gelten neben gewollten Sendeeinrichtungen wie Fernseh- und Rundfunksender ebenso alle Systeme, die ungewollt elektromagnetische Energie an die Umgebung abgeben. Genauso fungieren alle elektrischen Gerätschaften als Empfänger für Störungen.¹

Definition "elektromagnetische Verträglichkeit":

"Die Fähigkeit eines Betriebsmittels, in seiner elektromagnetischen Umgebung zufrieden stellend zu arbeiten, ohne dabei selbst elektromagnetische Störungen zu verursachen, die für andere Betriebsmittel in derselben Umgebung unannehmbar wären"²



Abbildung 2: Typische EMV-Anforderungen an Geräte, Quelle: Ott (2009), S. 27.

Abbildung 2 zeigt eine Übersicht verschiedener Möglichkeiten wie hinsichtlich EMV, Störungen vom Produkt abgegeben und aufgenommen werden können. Ein möglicher Störungsweg ist die galvanische Kopplung, die auftritt wenn Ströme von zwei Geräten an einem gemeinsamen Leiter einen Spannungsabfall verursachen. Als weitere Übertragungswege bestehen kapazitive Kopplung, bei der sich durch unterschiedliche Potentiale auf Leitern elektrische Felder ausbilden und induktive Kopplung, bei der durch Ströme magnetische Felder hervorgerufen werden. Treten elektrische und magnetische Wechselfelder nicht mehr unabhängig voneinander in Erscheinung, spricht man von Strahlungskopplung. Dabei werden von einer elektromagnetischen Welle Spannungen und Ströme in einer Störsenke verursacht.³

¹ Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 1 f.

² Richtlinie 2004/108/EG (2004), S. 3.

³ Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 99-142.

3.1 Nah- u. Fernfeld

Die theoretische Grundlage zu elektromagnetischen Hochfrequenzfeldern bilden die vier Maxwellschen-Gleichungen. Dabei werden Betrag und Richtung des elektrischen und magnetischen Feldes durch den elektrischen bzw. magnetischen Feldvektor beschrieben. Eine mögliche Lösung dieses Gleichungssystems beschreibt die Wellenausbreitung im freien Raum, die mit ausreichender Genauigkeit auch in Luft gilt.

Ist der Abstand zum Sender viel größer als die Wellenlänge, befindet man sich im sogenannten Fernfeld. Das Fernfeld ist charakterisiert durch einen elektrischen Feldvektor, der senkrecht zum magnetischen Feldvektor ausgerichtet ist, und die zusammen wiederum senkrecht zum Ausbreitungsvektor, oder auch Poyntingvektor \vec{S} genannt, angeordnet sind. Bei einer reinen transversalen Welle sind in Ausbreitungsrichtung weder elektrische noch magnetische Feldanteile vorhanden. Der Poyntingvektor kann durch Formel (3.1) mathematisch wiedergegeben werden.

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$
 (3.1) $\vec{S} / \frac{W}{m^2}$ Poynting Vektor
 $\vec{E} = \vec{E} \times \vec{H}$ (3.1) $\vec{E} / \frac{V}{m}$ elektrische Feldstärke
 $\vec{H} / \frac{A}{m}$ magnetische Feldstärke

Dabei oszillieren beide Felder in Phase. Sind diese Eigenschaften vorhanden, spricht man von einer TEM-Welle (Transversale-Elektromagnetische-Welle). Das Amplitudenverhältnis zwischen elektrischem und magnetischem Feld wird, wie in Formel (3.2) dargestellt, durch den Feldwellenwiderstand beschrieben, der im Vakuum unter Fernfeldbedingungen näherungsweise 377 Ω beträgt.⁴

$$Z_{\rm F} = \frac{\left|\vec{E}\right|}{\left|\vec{H}\right|}$$
(3.2)
$$Z_{\rm F} = \frac{\left|\vec{E}\right|}{\left|\vec{H}\right|}$$
(3.2)
$$Z_{\rm F} = \frac{\left|\vec{E}\right|}{\left|\vec{H}\right|}$$
elektrische Feldstärke
$$\vec{H} / \frac{A}{m}$$
magnetische Feldstärke

Im Nahfeld kann je nach elektromagnetischer Quelle das elektrische oder auch magnetische Feld überwiegen. Wenn diese zudem nicht in Phase zueinander sind entsteht ein komplexer Wellenwiderstand.⁵

⁴ Vgl. Kohlrausch (1996), S. 760 f.

⁵ Vgl. Gonschorek (2005), S. 43.



Abbildung 3: Feldwellenwiderstand, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 204.

Wie in Abbildung 3 dargestellt, ist auch für verschiedenartige Quellen ab einer bestimmten Entfernung kein Unterschied mehr im Verhältnis zwischen elektrischem und magnetischem Feld feststellbar. Die strichlierte Linie stellt eine Näherung dar, bei der ab einer Distanz r* von 1 ein konstanter Wellenwiderstand von 377 Ohm besteht. Dieser Abstand wird als Übergangsabstand bezeichnet und berechnet sich nach Formel (3.3).⁶

$$r_{0} = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{c_{0}}{2\pi f}$$
(3.3)
$$r_{0}/m$$

$$\frac{\eta}{2\pi} = \frac{c_{0}}{2\pi f}$$
(3.3)
$$\frac{r_{0}}{m}/\frac{1}{s}$$
Frequenz
$$c_{0}/\frac{m}{s}$$
Lichtgeschwindigkeit im freien Raum (299,8 · 10⁶ $\frac{m}{s}$)

Im Nahfeld lässt sich allerdings durch Messungen von elektrischer und magnetischer Feldstärke das Verhältnis daraus ermitteln, das wiederum Auskunft über die Art der Quelle zulässt. Dies kann sehr hilfreich sein um auf die Störungsursache zu schließen und Schirmungs- und Dämpfungsmaßnahmen zielgerichtet einsetzen zu können.⁷

3.2 Gesetzliche Grundlage

Es bestehen Anforderungen hinsichtlich Nichtüberschreitens der Emissionsgrenzwerte und Immunität gegenüber Immissionsgrenzwerten. Daraus kann man eine Einteilung der EMV-Normen vornehmen:⁸

Emissionsnormen

⁶ Vgl. Gonschorek (2005), S. 57.

⁷ Vgl. Gonschorek (2005), S. 61.

⁸ Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 465.

- Emissions-Grenzwerte
- o Emissions-Messverfahren und -geräte
- Störfestigkeitsnormen
 - Imissions-Grenzwerte (Prüfschäden)
 - Störfestigkeits-Prüfverfahren und –geräte
- Entstörmittelnormen
 - o Entstörmittel-Eigenschaften
 - o Entstörmittel-Prüfverfahren und -geräte

Die IEC (International Electrical Commission) gibt Normen für die gesamte Elektrotechnik auf internationaler Ebene heraus. Die CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) erstellt innerhalb der IEC Empfehlungen und Bestimmungen für den Bereich der EMV. Diese Schriften sind die Grundlage zu nationalen Bestimmungen.

Als weitere Kommissionen arbeiten CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) und ETSI (European Telecommunication Standards Institute) an der Harmonisierung der unterschiedlichen Normen in einer einheitlichen europäischen Norm (EN).⁹

Die durch das CENELEC erarbeiteten Normen sind in drei Bereiche gegliedert:¹⁰

• Fachgrundnormen / Generic Standards

beschreiben die Minimalanforderungen für Störaussendung und Störfestigkeit, gekoppelt an die Umgebungsart, z. B. Wohnbereich, Industrie, spezielle EMV-Umgebung

- Grundnormen / Basic Standards beschreiben phänomenbezogene Mess- und Pr
 üfverfahren zum Nachweis der EMV sowie die geforderten Grenzwerte (Wichtig zum Beispiel f
 ür Hersteller von EMV-Pr
 üfeinrichtungen).
- Produktfamilien- oder Produktnormen / Product Standards enthalten detaillierte Angaben über Prüf- und Messaufbauten, Betriebsbedingungen des Prüflings beim Messen bzw. Prüfen, zulässige Grenzwerte und Prüfschärfen etc. für bestimmte Produktfamilien oder Produkte.

Der freie Warenverkehr innerhalb der EG (Europäischen Gemeinschaft) ist seit 1.1.1996 durch europäische Normen bzw. mit ihnen harmonisierten nationalen Normen reglementiert.

Gekennzeichnet wird die Einhaltung der Richtlinien durch das CE-Zeichen, das vom Hersteller selbst angebracht werden darf. Jedoch muss zusätzlich eine Konformitätserklärung angefertigt werden. Einer solchen Kennzeichnungspflicht unterliegen jedenfalls alle Bauteile und Baugruppen, die auf dem EG Markt vertrieben werden und für Endnutzer erhältlich sind. Keiner Kennzeichnungspflicht unterliegen Bauteile, die als reine Zulieferteile erst nach weiterer Verarbeitung eine Funktion aufweisen, sowie ortsfeste Anlagen, wie z.B. Schaltschränke. Diese müssen zwar grundlegend nach EMV-Anforderungen konstruiert sein, benötigen jedoch keine CE-Kennzeichnung und Konformitätserklärung.

⁹Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 467 f.

¹⁰ Schwab/Kürner (2011), S. 468 f.

Die Typprüfung auf Einhaltung der einschlägigen Normen kann durch einen EMV-Dienstleister oder vom Hersteller selbst durchgeführt werden. Nach positivem Prüfungsergebnis und Ausstellung einer Konformitätserklärung durch den Hersteller kann an allen, nach den gleichen Fertigungsunterlagen hergestellten Produkten, das CE-Kennzeichen angebracht werden.¹¹

	Europa	Welt
Fachgrundnormen		
Aussendung	EN 61000-6-3/4	IEC 61000-6-3/4
Beeinflussung	EN 61000-6-1/2	IEC 61000-6-1/2
Grundnormen		
Grundlagen	EN 61000-4	IEC 61000-4
Messgeräte	EN 61000	CISPR 16 T1
Messverfahren	EN 61000	CISPR 16 T2
Oberschwingungen	EN 61000-3	IEC 61000-3
Produktnormen		
ISM (Industrial Scientific Medical)	EN 55011	CISPR 11
Hausgeräte	EN 55014	CISPR 14
Leuchten	EN 55015	CISPR 15
Ton- und Fernseh-Rundfunkempfänger	EN 55020	CISPR 20
Hochspannungsanlagen	EN 55018	CISPR 18
Informationstechnik	EN 55022	CISPR 22
Fahrzeuge	EN 55012	CISPR 12

Tabelle 1: Übersicht Normen

Tabelle 1 zeigt eine Auswahl an verwendeten Normen in Europa und weltweit.

3.3 Grenzwerte für elektromagnetische Störstrahlung

Als Beispiel sollen die Grenzwerte für Industrielle, wissenschaftliche und medizinische Hochfrequenzgeräte (ISM-Geräte) dienen.

¹¹ Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 470-477.

Vielfach werden in den Normen angegebene zulässige Grenzwerte für Störaussendung in 2 Klassen aufgeteilt. Die Grenzwertklasse A bezieht sich auf Industrieumgebung während sich Klasse B mit strikteren Störaussendungsgrenzen für den Einsatz in Wohnbereichen eignet.¹²

Des Weiteren wird bei Geräten unterschieden, ob in ihnen elektromagnetische Strahlung absichtlich erzeugt und genutzt wird oder nicht. Ist dies nicht der Fall fällt das Produkt in Gruppe 1, ansonsten in Gruppe 2.¹³

	Auf einem Mes	<i>Am Aufstell- und Betriebsort</i> gemessen		
Frequenzbereich	Gruppe 1, Klasse A 10 m Messentfernung	Gruppe 1, Klasse B 10 m Messentfernung	Gruppe 1, Klasse A Grenzwerte für die Messung in 30 m Entfernung von der Außenwand des Betriebs- gebäudes, in dem das Gerät sich befindet	
MHz	dB(µV/m)	dB(µV/m)	dB(µV/m)	
0,15 bis 30	in Beratung	in Beratung	in Beratung	
30 bis 230	40	30	30	
230 bis 1 000	47	37	37	

Tabelle 2: Grenzwerte für die elektromagnetische Störstrahlung, Quelle: ÖVE/ÖNORM EN 55011 (2008), S. 15.

Tabelle 2 zeigt einen Auszug aus der Norm zu ISM-Geräten. Wie aus der Tabelle ersichtlich beträgt der Grenzwert für Geräte der Gruppe 1 unter Industriebedingungen zwischen 30 MHz und 230 MHz 40 dBµV/m und von 230 MHz bis 1 GHz 47 dBµV/m.

¹² Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 480.

¹³ Vgl. ÖVE/ÖNORM EN 55011 (2008), S. 11.

4 EMISSIONSMESSTECHNIK

EMV Probleme treten in Frequenzbereichen bis weit über 1 GHz auf. Die Messung dieser elektromagnetischen Wechselfelder erfordert Wissen im Bereich der Hochfrequenztechnik. Die untere Frequenzgrenze von üblicherweise 30 MHz wurde so gewählt, da unterhalb dieser Frequenz bei üblichen Kabellängen leitungsgebundene Störungen dominieren. Des Weiteren kann der benötigte Abstand, damit man sich bei der Messung mit der Messantenne im Fernfeld befindet, bei niedrigen Frequenzen nicht eingehalten werden.¹⁴

4.1 Freifeldmessplatz (OATS Open Area Test Side)

Die von der IEC veröffentlichten Grenzwerte beziehen sich auf Freifeldmessungen die Messplatzbedingungen nach CISPR-Standards fordern. Freifeldmessplätze weisen einen bekannten Dämpfungsgrad zwischen Quelle und Messantenne auf. Um Umgebungseinflüsse zu minimieren, dürfen, wie in Abbildung 4 dargestellt, in einem elliptischen Umfeld bestimmter Abmessung keine reflektierenden Objekte vorhanden sein.¹⁵



Abbildung 4: CISPR OATS (Open Area Test Side), Quelle: Williams (2007), S. 142.

Um einen definierten Zustand für Bodenreflexionen zu schaffen wird durch Metallplatten im Boden für eine ausreichende Leitfähigkeit gesorgt. Vom Boden reflektierte Wellen können je nach Laufzeit zu einer Verstärkung oder Abschwächung des empfangenen Signals führen. Sind unerwünschte Reflexionen vorhanden, kann nicht mehr eindeutig auf die tatsächliche Störleistung rückgeschlossen werden. Durch die Messung der Messgeländedämpfung kann quantifiziert werden, inwieweit störende Reflexionen vorhanden sind. Dabei wird durch eine am Messsender angeschlossene Messantenne, die am Standort

¹⁴ Vgl. Williams (2007), S. 118.

¹⁵ Vgl. Williams (2007), S. 141.

des später zu testenden Objekts angebracht wird, ein bekanntes Signal abgestrahlt, und durch eine zweite Messantenne wieder empfangen.¹⁶



Abbildung 5: Messung der Messplatzdämpfung, Quelle: Williams (2007), S. 144.

Wie in Abbildung 5 dargestellt, muss dabei die Höhe der Empfangsantenne verändert werden, bis für jede Frequenz der Zustand erreicht wird, dass sich direkte und reflektierte Welle addieren.

Für den Abstand sind Werte von 3 m, 10 m und 30 m möglich. Der Umrechnung zwischen den einzelnen Entfernungen liegt die Eigenschaft der Feldstärke zugrunde, mit dem Kehrwert der Distanz nach Formel (4.1) abzunehmen.¹⁷

$$E \sim \frac{1}{d}$$
 (4.1) $E / \frac{V}{m}$ elektrische Feldstärke d/m Distanz

Als Beispiel ergibt sich bei der Umrechnung von 10 m auf 3 m Entfernung ein Faktor von 3, $\dot{3}$ bzw. 10,45 dB.¹⁸

Bei der Messung mit Testobjekt muss für jede Frequenz die Antennenhöhe mit maximalem Ausgangspegel gefunden werden. Des Weiteren muss das zu prüfende Gerät um die vertikale Achse gedreht werden und die ganze Messung für horizontale und vertikale Polarisation, durch Drehen der Antenne, durchgeführt werden.

Der Nachteil von Freifeldmessplätzen sind die in beinahe jeder Umgebung vorhandenen Fremdsignale, die die Messergebnisse größtenteils überdecken sowie die starke Witterungsabhängigkeit.

¹⁶ Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 297.

¹⁷ Vgl. Williams (2007), S. 144.

¹⁸ Vgl. Williams (2007), S. 142.

4.2 Reflexionsarmer Schirmraum – Absorberraum

Der Hauptvorteil von geschirmten Kammern ist der hinsichtlich Hochfrequenz störungsfreie Raum, in dem die Tests durchgeführt werden können. Dadurch kann auf die Untersuchung des Messergebnisses auf Umwelteinflüsse weitgehend verzichtet werden. Des Weiteren wird die Umgebung bei Immissionstests von Störungen geschützt.¹⁹

Die Einschränkung von reinen Metallabschirmungen ist die durch die Geometrie beeinflusste Ausbildung von Resonanzen, deren exakte Auswirkungen auf das Messergebnis kaum feststellbar ist. Resonanzen erzeugen Minima und Maxima, die eine Abstrahlungsmessung unmöglich machen.

In reflexionsarmen Schirmräumen, wie in Abbildung 6 dargestellt, werden die Wände mit absorbierendem Material ausgekleidet, damit Reflexionen reduziert werden. Wird der Boden nicht ausgekleidet, kann der leitende Untergrund eines Freifeldmessplatzes nachgebildet werden.²⁰



Abbildung 6: Absorberraum, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 224.

Um gute Ergebnisse zu erzielen, sollen dabei durch die Absorber an den Wänden Reflexionsdämpfungswerte von mindestens 10 dB oberhalb von 200 MHz und 20 dB oberhalb von 1 GHz erreicht werden.²¹

¹⁹ Vgl. Montrose/Nakauchi (2004), S. 96.

²⁰ Vgl. Montrose/Nakauchi (2004), S. 96.

²¹ Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 224 f.

4.3 Modenverwirbelungskammer

Eine alternative Methode ohne Absorber entsteht durch das ständige Verändern der Resonanzfrequenzen im Schirmraum. Dies geschieht durch mechanische Vorrichtungen, wie in Abbildung 7 ersichtlich, deren Metallstrukturen die elektromagnetischen Wellen in ihrer Ausbreitung ablenken, und dadurch ständig andere Resonanzfrequenzen entstehen lassen. Sind im vermessenen Frequenzbereich ausreichend viele Moden vorhanden, entstehen so viele unterschiedliche Ausbreitungsmöglichkeiten der elektromagnetischen Wellen, dass das Gesamtverhalten einem Wellenfeld gleicht, in dem alle möglichen Polarisationen und Richtungen gleichverteilt vorkommen. Durch diese Eigenschaft kann auf das Drehen des Prüflings bzw. der Antenne zur Polarisationsrichtungsänderung verzichtet werden. Mit statistischen Methoden, die eine Vielzahl von Einzelmessungen erfordern, kann auf die abgestrahlte Gesamtleistung rückgeschlossen werden.²²



Abbildung 7: Modenverwirbelungskammer, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 229.

4.4 TEM-Messzelle (Transversal-Elektromagnetische-Welle)

Bei kleiner Baugröße des zu testenden Objektes, kann eine TEM-Messzelle verwendet werden, in der eine Wellenausbreitung wie im Fernfeld stattfindet. Eine solche Zelle kann als aufgeweitete Koaxialleitung angesehen werden. Im Gegensatz zu bisher erwähnten Methoden muss das entstehende elektromagnetische Feld nicht durch eine Messantenne in eine Spannung transformiert werden, sondern

²² Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 225 ff.

steht an den Anschlüssen der Messzelle direkt zur Verfügung. Im Frequenzbereich ist die TEM-Zelle nach oben hin durch das Entstehen von Moden höherer Ordnung eingeschränkt.²³



Abbildung 8: Klassische TEM-Messzelle (Crawford-Zelle), Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 231.

TEM-Messzellen werden vorwiegend zur Immissionsmessung verwendet, können aber auch zur Emissionsmessung herangezogen werden. Der Aufbau in Abbildung 8 zeigt eine Anordnung zur Störfestigkeitsmessung, bei der durch ein vom Generator erzeugtes Signal als elektromagnetisches Feld auf den Prüfling einwirkt.



Abbildung 9: Doppel TEM-Messzelle, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 377.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist das Vermessen von Schirmmaterialien. Dabei werden zwei TEM-Zellen, wie in Abbildung 9 gezeigt, miteinander verbunden. An der Verbindungsstelle kann das zu untersuchende Material angebracht werden.²⁴

Vorteile von TEM-Zellen sind ihre geringe Größe, niedrige Kosten und dass zur Immissionsmessung hohe Feldstärken mit relativ niedriger Eingangsleistung erzeugt werden können. Dabei ist durch den Aufbau keine weitere Schirmung mehr erforderlich.²⁵

²³ Vgl. Kohlrausch (1996), S. 761.

²⁴ Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 376 f.

²⁵ Vgl. Montrose/Nakauchi (2004), S. 110.

4.5 GTEM-Messzelle

(Gigahertz-Transversal-Elektromagnetische-Welle)

Diese Konstruktion besteht, wie in Abbildung 10 dargestellt, aus einem pyramidenförmig größer werdenden Koaxialleiter, dessen Innenleiter an der Rückwand mit dem Wellenwiderstand abgeschlossen wird. Dieser Abschluss ist zweigeteilt und besteht einerseits aus einem Widerstandsnetzwerk und andererseits aus absorbierendem Material. Dadurch wird sowohl der auf dem Innenleiter fließende Strom als auch die elektromagnetische Welle absorbiert. Durch den Aufbau wird das Entstehen von Eigenresonanzen bis in den Gigahertzbereich verhindert.²⁶



Abbildung 10: Schematischer Aufbau einer GTEM-Zelle, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 233.

²⁶ Vgl. Morgan (1994), S. 126.

5 PRECOMPLIANCE

Messungen, die vollständig den EMV-Richtlinien entsprechen, können durch Einhaltung der europäischen harmonisierten Normen erreicht werden. Die Anforderungen an die Messausrüstung und den Messplatz können jedoch oft aus wirtschaftlichen Gründen und örtlichen Gegebenheiten nicht eingehalten werden. Die Alternative ist, solche Messungen an externe akkreditierte Stellen zu vergeben. Aus Kostengründen ist diese Möglichkeit jedoch nur für die finale Messung zum Nachweis der Einhaltung der Grenzwerte sinnvoll.²⁷

Messungen im Entwicklungslabor in einem frühzeitigen Stadium der Entwicklung sind jedoch nötig um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, den Abstrahlungstest des fertigen Produktes im akkreditierten EMV-Labor zu bestehen und dadurch teure Entwicklungsschleifen zu vermeiden.

Übliche Laborumgebungen stellen sehr ungünstige Bedingungen für Abstrahlungsmessungen dar. Es kann von einer Vielzahl von unkontrollierten Reflexionen ausgegangen werden, die das direkte Messen der Störabstrahlung erschweren. Daher wird versucht, auf Messungen zurückzugreifen, die von der Umgebung nur wenig beeinflusst werden. Dazu sind Nahfeldsonden besser geeignet als Antennen, die empfindlich auf Reflexionen und leitende Gegenstände in ihrer Umgebung reagieren.²⁸

5.1 Gleichtaktströme auf Kabeln

Kabel treten häufig als starke Störer in Erscheinung. Dabei kann die abgegebene Störleistung als direkt proportional zu den Gleichtaktströmen auf dem Kabel angenommen werden. Im Gegensatz zu den Signalströmen, die auf einem Leiter als Hinleiter und einem anderen als Rückleiter fließen, erzeugt bei Gleichtaktströmen die fehlende Rückleitung durch das Kabel die Abstrahlung der Energie an die Umgebung.

Das Messen der Gleichtaktströme erfolgt, wie in Abbildung 11 dargestellt, durch eine Stromzange und einen Spektrumanalysator. Der Großteil der Abstrahlung erfolgt bei üblichen Kabellängen in einem Frequenzbereich unter 250 MHz. Als Faustregel kann angenommen werden, dass 5 µA Gleichtaktstrom auf einem 1 m langen Kabel schon zum Überschreiten der Grenzwerte bei Abstrahlungsmessungen führen kann. Für kürzere Kabellängen sind höhere Werte zulässig. Diese Methode ist sowohl für geschirmte als auch nicht geschirmte Kabel geeignet.²⁹

²⁷ Vgl. Williams (2007), S. 147.

²⁸ Vgl. Ott (2009), S. 688 f.

²⁹ Vgl. Ott (2009), S. 690 ff.



Abbildung 11: Testaufbau zum Messen der Gleichtaktströme, Quelle: Ott (2009), S. 691.

Beachtet werden muss, dass durch stehende Wellen die gemessene Stromstärke von der Position der Stromzange auf dem Kabel abhängig sein kann. Deshalb ist es notwendig, immer die Position mit maximaler Ausgangsamplitude zu suchen. Ebenfalls sind Signale zu berücksichtigen, die nicht durch das untersuchte Gerät selbst entstehen, sondern durch Umgebungseinflüsse auf das Kabel eingekoppelt werden. Eine Vergleichsmessung mit ausgeschaltetem Gerät ist daher immer sinnvoll.³⁰

5.2 Nahfeldsonden

Während bei angeschlossenen Kabeln den Hauptmechanismus zur Abstrahlung Gleichtaktströme darstellen, kommen bei stromdurchflossenen Leiterschleifen auf Leiterplatten Gegentaktströme zur Wirkung. Die daraus resultierenden magnetischen Felder können durch Schleifenantennen detektiert werden. Dabei lassen die gemessenen Ergebnisse keinen Rückschluss auf die Höhe der Störwirkung im Fernfeld zu, jedoch kann eine Verbesserung, bzw. Verschlechterung durch eine Veränderung im Aufbau des untersuchten Gerätes qualitativ festgestellt werden.³¹



Abbildung 12: Einfache magnetische Nahfeldsonde, Quelle: Ott (2009), S. 696.

³⁰ Vgl. Ott (2009), S. 693.

³¹ Vgl. Ott (2009), S. 694 f.

Wie in Abbildung 12 gezeigt, lässt sich eine magnetische Nahfeldsonde auch einfach aus einem Stück Koaxialkabel selbst herstellen.

Als weitere Anwendung können mit Nahfeldsonden undichte Stellen an Schirmgehäusen aufgespürt werden. Dabei treten bei Schlitzöffnungen die stärksten magnetischen Feldstärken an den Enden auf, da dort die größten Ströme fließen.³²

5.3 1-m Störfeldmessung

Das größte Problem bei Störfeldmessungen in nicht nach EMV-Richtlinien konformen Messplätzen stellen unkontrollierte Reflexionen dar. Um dem entgegenzuwirken wird versucht die Amplituden aller reflektierten Signale zu minimieren und das direkt empfangene Signal zu maximieren. Ersteres wird erreicht, wenn sich die Messanordnung möglichst weit entfernt von leitenden Objekten befindet. Als weitere Maßnahme wird die Empfangsantenne möglichst nahe an das zu vermessende Gerät platziert. Dabei stellt aufgrund der Antennengröße und der gewünschten Messung im Fernfeld der Abstand von 1 m den Grenzwert dar.³³



Abbildung 13: 1-m Abstrahlungsmessplatz, Quelle: Ott (2009), S. 714.

Der Aufbau ist in Abbildung 13 dargestellt. Die Umrechnung der Ergebnisse auf 3 m oder 10 m Messplatzbedingungen kann durch Formel (4.1) erfolgen. Allerdings kommen bei diesem nahen Abstand zwischen Antenne und untersuchtem Objekt Effekte zum Tragen die den idealen Feldstärkeverlauf beeinflussen. In praktischen Versuchen konnte für die Umrechnung von 3 m auf 1 m Messentfernung ein Faktor von 6 dB herausgefunden werden, der den realen Bedingungen eher entspricht.³⁴

³² Vgl. Ott (2009), S. 696 f.

³³ Vgl. Ott (2009), S. 713.

³⁴ Vgl. Ott (2009), S. 714.

5.4 TEM-Zelle

Eine TEM-Zelle, oder auch nach ihrem Erfinder Crawford-Zelle genannt, wurde ursprünglich verwendet um transversale elektromagnetische Wellen mit definierter Feldstärke erzeugen zu können und damit elektromagnetische Feldproben kalibrieren zu können. Vor dieser Entwicklung hatten andere Aufbauten, wie sie z.B. Hornantennen und Streifenleiter darstellen, den Nachteil, elektromagnetische Energie an die Umgebung abzustrahlen. Im Gegensatz dazu bietet eine TEM-Zelle die Eigenschaft, dieses Feld abzuschirmen. Dadurch entfällt der Bedarf einer externen Abschirmungskammer.

Die Zelle besteht aus einer rechteckigen koaxialen Übertragungsleitung, die sich zu jeder Seite hin pyramidenförmig verjüngt. Der flache Innenleiter wird Septum genannt und spitzt sich ebenfalls zu beiden Abschlüssen hin zu. An den Enden sitzen Koaxialanschlüsse, an denen Messleitungen angeschlossen werden können. Die charakteristische Impedanz bleibt dabei über die gesamte Länge konstant und beträgt üblicherweise 50 Ω . Durch einen Signalgenerator, der an einem Port angeschlossen wird, kann eine transversale elektromagnetische Welle (TEM) in der Zelle erzeugt werden, die am zweiten Port durch einen Abschlusswiderstand reflexionsarm abgeschlossen wird.³⁵

5.4.1 Konstruktion einer TEM-Zelle

Ziele der Konstruktion sind ein möglichst großes Testvolumen, eine hohe obere Grenzfrequenz, minimale Fehlanpassung und ein dadurch entstehender möglichst gleichmäßiger Feldstärkeverlauf in der Zelle.

Die ersten Zellen wurden mithilfe der Näherungsformel (5.1) zur Impedanzbestimmung von Streifenleitern und durch experimentelles Modellieren entwickelt.³⁶

$$Z_{0} \approx \frac{94,15}{\sqrt{\varepsilon_{r}} \left(\frac{w}{b\left(1-\frac{t}{b}\right)} + \frac{C_{f}}{0,0885\epsilon_{r}}\right)}$$
(5.1) (5.1)

7 /0 Wollonimpodanz

Das Problem der Anpassung dieser Formel an eine rechteckige koaxiale Übertragungsleitung wurde durch das experimentelle Ermitteln der Streukapazität gelöst. Wie aus Tabelle 3 ersichtlich, wurde diese mit 0,087 pF/cm angenommen.³⁷

³⁵ Crawford (1974), S. 189.

³⁶ Crawford (1974), S. 189.

³⁷ Crawford (1974), S. 190.



Abbildung 14: Schnittdarstellung einer rechteckigen koaxialen Übertragungsleitung, Quelle: Crawford (1974), S. 190.

In Tabelle 3 sind für verschiedene Größenvarianten die Abmessungen und die dazu aus Formel (5.1) berechneten Wellenwiderstände aufgelistet. Die Kennbuchstaben der Abmessungen entsprechen den Bemaßungstexten aus Abbildung 14. Dabei wird immer von einem quadratischen Querschnitt ausgegangen (b=W).

$$f_{TE10} = \frac{c_0}{2W}$$
(5.2)
$$\begin{array}{c} f_{TE10} / \frac{1}{s} & \text{Modenfrequenz} \\ c_0 / \frac{m}{s} & \text{Lichtgeschwindigkeit im freien Raum } \left(299,8 \cdot 10^6 \frac{m}{s}\right) \\ W/m & \text{Breite Außenleiter} \end{array}$$

Die maximale Frequenz, für die noch die Ausbreitungseigenschaften einer transversalen elektromagnetischen Welle gelten, kann in erster Näherung durch Formel (5.2) ermittelt werden.³⁸

Oboro Cronsfroquenz	Plattenabstand	Septum Breite	Septum Dicke	Streukapazität	Zw
Obere Grenzirequenz	b	w	t	C _f	
(MHz)	(cm)	(cm)	(cm)	(pf/cm)	(Ω)
100	150	123,83	0,157	0,087	52,03
300	50	41,28	0,157	0,087	51,98
500	30	24,77	0,157	0,087	51,93

Tabelle 3: TEM-Zellen Abmessungen, Quelle: Crawford (1974), S. 191.

5.4.2 Ermittlung des Wellenwiderstandes mithilfe elektrostatischer Simulation

Eine alternative Methode zur Bestimmung des Wellenwiderstandes stellen Simulationswerkzeuge dar. Die Eigenschaften einer transversalen elektromagnetischen Welle ermöglichen die Ermittlung des Feldstärkeverlaufs nach elektrostatischen Methoden, da bei ihnen elektrisches und magnetisches Feld in Phase sind.³⁹

³⁸ Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 231.

³⁹ Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 232.

In Folge dessen kann im gleichförmigen Mittelteil der TEM-Zelle, mithilfe der Finiten-Elemente-Methode, der Kapazitätsbelag und daraus die Wellenimpedanz ermittelt werden.



Abbildung 15: Elektrische Feldstärke , Quelle: Eigene Darstellung

Die Geometrie einer TEM-Zelle mit 500 mm Außenbreite und –höhe wurde mit dem Programm Maxwell SV erstellt und elektrostatisch simuliert. Als Materialien wurden ein idealer Leiter für Septum und Außenschirm bzw. Vakuum für den umschlossenen Bereich angenommen. Als weitere Eingaben wurden dem äußeren Schirm ein Spannungswert von 0 V und dem inneren Leiter ein Spannungswert von 1 V zugewiesen. Abbildung 15 zeigt den Verlauf der elektrischen Feldstärke, der durch diese Anordnung entsteht.

$$E = \frac{U}{d}$$
 (5.3)
$$E / \frac{V}{m}$$
 Elektrische Feldstärke
U/V Spannung
d/m Abstand

Zum Vergleich können die physikalischen Eigenschaften eines Plattenkondensators dienen. Bei diesem entsteht zwischen den Platten ein näherungsweise homogenes Feld mit einer Höhe der elektrischen Feldstärke nach Formel (5.3). Setzt man die in der Simulation verwendeten Werte von 1 V Spannung zwischen den Platten und einen Abstand von 0,25 m ein, so erhält man eine elektrische Feldstärke von 4 V/m. Dieser Wert kann im homogenen Feldbereich in Abbildung 15 wiedergefunden werden.

$$Z_{0} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r}}}{C'} \frac{1}{c_{0}}$$
(5.4)
$$Z_{0} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r}}}{C'} \frac{1}{c_{0}}$$
(5.4)
$$Z_{0} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r}}}{C'} \frac{1}{c_{0}}$$
(5.4)
$$Z_{0} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r}}}{C'} \frac{1}{m}$$
Kapazitätsbelag
$$C_{0} / \frac{m}{s}$$
Lichtgeschwindigkeit im freien Raum (299,8 · 10⁶ $\frac{m}{s}$)

Als weitere Ausgabe des Simulationsprogrammes wird ein Kapazitätswert von 64,998 pF/m berechnet. Aus diesem lässt sich durch Einsetzen in Formel (5.4) der Wellenwiderstand ableiten. Da in der Simulation von einem Vakuum in der Zelle ausgegangen wurde, wird für die relative Dielektrizitätszahl der Wert 1 eingesetzt. Damit erhält man einen Wert von 51,3 Ω , der sehr gut mit dem Wert von 51,98 Ω aus Tabelle 3 korreliert.

5.4.3 Untersuchung der Fernfeldbedingungen mithilfe elektrodynamischer Simulation

Zur Validierung der Konstruktion, wurde die TEM-Zelle im Simulationsprogramm HFSS von der Firma Ansoft nachgebildet. HFSS steht für "High Frequency Structure Simulator" und stellt ein Tool zur Simulation von elektromagnetischen Feldern und zum Erstellen von 3D-Modellen dar. Das Programm nutzt die Finite-Elemente-Methode um die entstehenden Feldverläufe zu berechnen.

Zunächst wurden der Innenleiter und der Außenleiter mithilfe der 3D-Modellierungstools in HFSS erstellt. Dem Außenleiter wurde das Material rostfreier Stahl zugewiesen, und dem Innenleiter Kupfer. Die Abschlüsse an beiden Enden der Zelle wurden durch ein Stück Koaxialkabel nachgebildet. An den Enden beider Kabelnachbildungen wurden Ports angelegt, die zur Simulation dienen. Weitere Eingaben, die für das vollständige Modell benötigt werden, sind die Frequenz und die Eingangsleistung, für die die Simulation durchgeführt werden soll. Um auf vergleichbare Ergebnisse wie bei der statischen Simulation zu kommen, wurde eine Eingangsleistung von 20 mW angenommen. Daraus ergibt sich an 50 Ω eine Spannung von 1 V.



Abbildung 16: Betrag E-Feld bei 200 MHz

In Abbildung 16 ist das Ergebnis der Simulation in Form der elektrischen Feldstärke dargestellt. Es stellt den Querschnitt der Messzelle durch den mittigen quaderförmigen Teil dar. Da es sich um ein Wechselfeld handelt, dient zur farblichen Einteilung der Betrag der resultierenden Amplitude an der entsprechenden Position. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit dem elektrischen Feld aus Abbildung 15, das durch statische Simulation ermittelt werden konnte. Erstrebenswert ist ein möglichst großer Bereich mit konstanter Feldstärke, in dem der Prüfling getestet werden kann. Ein solcher Bereich befindet sich zu beiden Seiten hin, mittig zwischen Außen- und Innenleiter.

Die Pfeile hingegen stellen die Richtung der Feldstärke zu einer bestimmten Phasenlage dar. Bei 180 ° versetzter Phasenlage am Eingang, zeigen die Pfeile in genau umgekehrte Richtung.



Abbildung 17: Betrag H-Feld bei 200 MHz

Abbildung 17 zeigt die zur vorigen elektrischen Feldstärke zugehörige magnetische Feldstärke. Aus den Amplitudenwerten ist ersichtlich, dass sich das Verhältnis zwischen elektrischer und magnetischer Feldstärke mit dem Wellenwiderstand von annähernd 377 Ω im Vakuum deckt.

Des Weiteren zeigen die Pfeilrichtungen, dass elektrischer und magnetischer Feldvektor in einem Winkel von 90° zueinander ausgerichtet sind. Diese Eigenschaft ist ident mit der Ausbreitung elektromagnetischer Felder im Fernfeld.



Abbildung 18: E-Feld mit Poynting Vektor bei 200 MHz

Schließlich zeigt Abbildung 18 den Längsschnitt der Zelle mit farblich eingezeichneter elektrischer Feldstärke. Auch hier ist der Bereich ersichtlich, in dem annähernd konstante Feldstärken vorliegen.

In dieser Abbildung beziehen sich die Pfeile auf die Richtung der Poyntingvektoren, die senkrecht zu elektrischen und magnetischen Feldvektoren ausgerichtet sind und die Ausbreitungsrichtung darstellen.

Damit sind alle Beziehungen eingehalten, die auch im Fernfeld vorzufinden sind. Daraus kann angenommen werden, dass mithilfe dieser Messzelle vergleichbare Messungen zu Freifeldmessplätzen durchgeführt werden können.

5.4.4 Ermittlung der Streuparameter mithilfe elektrodynamischer Simulation

Idealerweise sollte die Messzelle durch den konstanten charakteristischen Widerstand von 50 Ω als idealer Leiter in einem 50 Ω -System fungieren. Als quantitative Aussage dieser Behauptung können Streuparameter dienen. Als weitere Möglichkeit der Simulation in HFSS kommen Sweeps in Frage. Dabei wird die Simulation für eine eingestellte Anzahl von Frequenzschritten wiederholt und als Ausgabedaten können die S-Parameter dargestellt werden.

Der Streuparameter S11 stellt den Eingangsreflexionsfaktor dar. Dieser beschreibt das Verhältnis der reflektierten Welle zur hinlaufenden Welle. Abbildung 19 stellt das Ergebnis der Simulation in einem Frequenzbereich von 300 kHz bis 1 GHz dar. Der Reflexionsfaktor steht in direktem Zusammenhang mit dem Stehwellenverhältnis. Eine stehende Welle erzeugt einen ungleichmäßigen Feldstärkeverlauf längs der Zelle, der sich ungünstig auf die Eignung zur Störabstrahlungsmessung bzw. auf den Bereich konstanter Feldstärke auswirkt. Deshalb kann der Reflexionsfaktor in erster Näherung als direktes Qualitätsmerkmal zur Gleichmäßigkeit der Feldstärke längs der Zelle angesehen werden.



Abbildung 19: S11 Simulation mit und ohne E.U.T. (Equipment under Test), Quelle: Eigene Darstellung

Um den Einfluss eines Prüflings zu untersuchen, wurde diese Simulation einmal mit leerer Zelle, und einmal mit einer Prüflingsnachbildung in Form eines 10 cm x 10 cm x 10 cm großen leitfähigen Würfels

wiederholt. Die schwarze Linie gibt die leere Zelle wieder, während die rote Linie das Ergebnis mit einem möglichen vorhandenen Testobjekt wiedergibt.

Im nutzbaren Frequenzbereich bis 300 MHz liegt die Rückflussdämpfung der leeren Zelle durchwegs unter -25 dB. Das bedeutet, dass die Leistung der rücklaufenden Welle etwa 1 / 316 der hinlaufenden Welle beträgt. Ein Wert von -20 dB wird nach IEC 61000-4-20 (2010) angestrebt.

Mit Testobjekt ist bei etwa 350 MHz ein erster schmalbandiger Rückgang des Eingangsreflexionsfaktors auf etwa -5 dB erkennbar. Dies kann durch das Anregen der Zelle bei einer Eigenresonanzfrequenz erklärt werden und schränkt den nutzbaren Frequenzbereich ein. Wie durch die zwei Simulationen mit und ohne Prüfobjekt ersichtlich, hat das Testobjekt einen Einfluss auf die Lage der Resonanzfrequenz. Bei 440 MHz ist eine Herabsetzung der Resonanzfrequenz durch das vorhandene Testobjekt feststellbar.

5.4.5 Untersuchung auf Eigenresonanzen mithilfe elektrodynamischer Simulation

Ein Hohlleiter bildet Resonanzfrequenzen aus, bei denen durch Reflexionen an den Wänden gegenseitige Überlagerungen das transversale Verhalten der elektrodynamischen Welle gestört wird. HFSS bietet dazu die Möglichkeit nach Frequenzen zu suchen, bei denen Resonanzen entstehen können. Bei dieser Simulation konnten für die ersten 10 Frequenzen die Werte aus Tabelle 4 ermittelt werden.

	f/MHz
1	231,737
2	355,707
3	367,806
4	440,273
5	487,840
6	506,638
7	574,487
8	615,425
9	637,890
10	641,762

Tabelle 4: Eigenresonanzen der Messzelle

Im Unterschied zu Formel (5.2), mit der eine unterste Resonanzfrequenz von 300 MHz ermittelt wurde, kann durch die Simulation von einer ersten Eigenresonanz bei 231 MHz ausgegangen werden. Diese scheint jedoch bei den Streuparametersimulationen durch das verwendete Modell nicht angeregt zu werden. Die nächste Resonanz bei 355 MHz lässt sich jedoch im Verlauf des Eingangsreflexionsfaktors deutlich wiederfinden.

Da die unteren Eigenresonanzen bis 506 MHz sehr schmalbandig ausgeprägt sind, entstehen in den Frequenzbereichen dazwischen deutlich abgegrenzte Abschnitte, in denen wiederum TEM-Bedingungen vorherrschen. Diese können für Messungen genutzt werden. Eine Voraussetzung dazu ist allerdings die

Kenntnis der genauen Lage der Resonanzfrequenzen, wie sie etwa durch die S-Parameter-Messung mit vorhandenem Testobjekt an einem Netzwerkanalysator ermittelt werden können.

5.4.6 Störabstrahlungsmessung in TEM-Zellen

Da die Grenzwerte von Störabstrahlung für die Messung auf einem Freifeldmessplatz ausgelegt sind, benötigt man eine Methode um mit TEM-Messzellen vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Dazu wird in IEC 61000-4-20 (2010) die Möglichkeit einer konformen Messung und deren Einschränkungen beschrieben.

5.4.6.1 TEM Mode

Die Messung muss in einem Frequenzbereich erfolgen, in dem keine Eigenmoden durch die Messzelle auftreten. Dies kann durch Messung der Feldkomponenten in vertikaler und horizontaler Richtung validiert werden. Eine reine TEM-Welle erzeugt nur in vertikaler Richtung ein elektrisches Feld. Von einer gültigen Messung wird ausgegangen, wenn die Feldstärke des Hauptfeldes in vertikaler Richtung um 6 dB über dem Feld in horizontaler Richtung liegt.⁴⁰

Als alternative Methode kann durch Messung der Verluste in der Zelle mit vorhandenem Prüfobjekt auf den brauchbaren Frequenzbereich geschlossen werden. Dabei muss der Wert nach Formel (5.5) unter 1 dB liegen.

$$A_{tloss} = \left| 10 \cdot lg \left(\frac{P_{refl}}{P_{fwd}} + \frac{P_{output}}{P_{fwd}} \right) \right| \le 1 dB \quad (5.5) \qquad \begin{array}{l} A_{tloss}/dB & Durchgangsverluste \\ P_{refl}/W & Reflektierte Leistung am Eingangsport \\ P_{fwd}/W & Hinlaufende Leistung am Eingangsport \\ P_{output}/W & Ausgangsleistung \end{array}$$

5.4.6.2 Testvolumen

Die Größe des zu messenden Objektes wird auf den Bereich in der Zelle begrenzt, in dem ein homogenes Feld ausgebildet wird. Es wird eine maximale Abmessung von 60 % der Messzellenbreite und 60 % der Länge des quaderförmigen Mittelteils der Messzelle empfohlen. Während eine maximale Höhe von 33 % des Abstandes zwischen Außenwand und Innenleiter empfohlen wird, geben die meisten Hersteller dafür einen Wert von 50 % an.⁴¹

5.4.6.3 Messmethode

Der verwendete Korrelationsalgorithmus basiert auf dem Grundprinzip, die an der Messzelle gemessene Spannung auf die äquivalente abgestrahlte Leistung umzurechnen. Die gesuchte elektrische Feldstärke ergibt sich dann durch den theoretischen Fall, dass diese Leistung durch einen idealen Dipol über einer perfekt leitenden Oberfläche abgestrahlt wird. Zur Ermittlung der Gesamtleistung muss das Testobjekt in mindestens 3 Positionen vermessen werden. Dann werden die einzeln gemessenen Spannungen durch Formel (5.6) quadratisch addiert.

⁴⁰ Vgl. IEC 61000-4-20 (2010), S. 12.

⁴¹ Vgl. IEC 61000-4-20 (2010), S. 12 f.

In IEC 61000-4-20 (2010) erfolgt die Umrechnung dieser Spannung in eine abgestrahlte Leistung durch einen Faktor, der experimentell durch Messen der Feldstärke in der Zelle bei bekannter Eingangsleistung oder analytisch durch eine mathematische Reihe angenähert ermittelt werden kann.⁴²

$$U_{\text{Res}} = \sqrt{U_{\text{X}}^{2} + U_{\text{Y}}^{2} + U_{\text{Z}}^{2}}$$
(5.6)
$$U_{\text{Res}} / V$$
Resultierende Spannung
$$U_{\text{X}}, U_{\text{Y}}, U_{\text{Z}} / V$$
Ausgangsspannung bei X, Y, Z Ausrichtung

Alternativ bietet sich die Möglichkeit der vereinfachten Berechnung der äquivalenten elektrischen Feldstärke durch Ermittlung des Antennenfaktors (5.7) aus der Geometrie der Messzelle an. Ein Antennenfaktor stellt das Verhältnis zwischen gemessener Spannung am Ausgang und elektrischer Feldstärke am Empfangsort der Antenne dar.⁴³

$$AF_{TEM} = 17 - 20 \log\left(\frac{\sqrt{Z_C}}{h}\right) \quad (5.7) \qquad \begin{array}{c} AF_{TEM} / dB\left(\frac{1}{m}\right) & Antennenfaktor TEM - Zelle \\ Z_C / \Omega & charakteristische Impedanz TEM - Zelle \\ h/m & Höhe Septum zu Außenleiter \end{array}$$

Um auf die elektrische Feldstärke in entsprechender Entfernung zu kommen, werden die Ausbreitungsverluste benötigt. Diese sind für Fernfeldbedingungen im freien Raum in Formel (5.8) wiedergegeben.

$$NSTL / aB$$
 Normalized Site Transmission Loss

$$NSTL = 32 + 20 \log(D) - 20 \log(f)$$
 (5.8) D/m Distanz
 f/MHz Frequenz

1.

1.01. 0

. .

Das Zusammenführen beider Formeln führt zu Formel (5.9).

$$E = U_{out} + AF_{TEM} - NSTL \quad (5.9) \qquad NSTL / dB \qquad Normalized Site Transmission Loss \\ E/dB \left(\frac{V}{m}\right) \qquad Elektrische Feldstärke \\ AF_{TEM}/dB \left(\frac{1}{m}\right) \qquad Antennenfaktor TEM - Zelle \\ U_{out}/dB(V) \qquad Ausgangsspannung Messzelle \end{cases}$$

Oder durch Einsetzen zu Formel (5.10).44

$$E = U_{Res} + 17 - 20 \log\left(\frac{\sqrt{Z_c}}{h}\right) - 32 - 20 \log(D) + 20 \log(f)$$
(5.10)

Elektrische Feldstärke
resultierende Ausgangsspannung TEM – Zelle
charakteristische Impedanz TEM – Zelle
Höhe Septum zu Außenleiter
Distanz
Frequenz

⁴² Vgl. IEC 61000-4-20 (2010), S. 20 ff.

⁴³ Vgl. Clay (1998), S. 1119 f.

⁴⁴ Vgl. Clay (1998), S. 1119 f.

5.4.7 Praktische Ausführung

Eine TEM-Messzelle wurde mithilfe der Software SolidWorks konstruiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 20 zu sehen. Als Material wurde nichtrostendes Stahlblech mit 2 mm Stärke gewählt. Die gesamte Zelle wurde so durch Biegen und Schweißen gefertigt, dass die Kanten keinerlei offene Schlitze aufweisen, sodass keine negative Beeinträchtigung der Schirmwirkung vorliegt. Als Innenleiter wurde ein Aluminiumblech verwendet, da dieses leicht bearbeitbar ist. An den Enden der Messzelle wurden N-Typ Koaxialsteckverbinder angeschraubt und mit dem Innenleiter verlötet.



Abbildung 20: Konstruktionszeichnung TEM-Messzelle, Quelle: Eigene Darstellung

Zur Validierung der Konstruktion wurden die Streuparameter der fertigen Messzelle mit einem Netzwerkanalysator ermittelt. Abbildung 21 gibt den Vergleich zwischen Messung und Simulation des Eingangsreflexionsfaktors wieder. Die gute Übereinstimmung ist deutlich erkennbar. Bis über 500 MHz wird ein Wert von unter -20 dB erreicht. Danach treten Resonanzeffekte in Erscheinung.



Abbildung 21: S11 Vergleich Simulation zu Messung, Quelle: Eigene Darstellung

6 ERGEBNISSE UND AUSBLICK

Im ersten Teil dieser Arbeit wurde auf Normen verwiesen, die die Grundlage zu EMV und CE-Kennzeichnung bilden. Dadurch konnte ein Überblick geschaffen werden, durch den man für konkrete Anwendungsfälle zügig die notwendigen Schriftstücke ausfindig machen kann.

Die im nächsten Kapitel behandelten Messmethoden zeigen die Möglichkeiten auf, Störabstrahlungsmessungen vorzunehmen, um mit den unterschiedlichen Messmöglichkeiten vertraut zu sein.

Im dritten Kapitel wurden Methoden behandelt, mit dessen Hilfe man auch in gewöhnlichen Laborumgebungen aussagekräftige Ergebnisse für Abstrahlungsmessungen erzielen kann. Neben Messungen mit Nahfeldsonden und Antennen wurde im Besonderen die Möglichkeit der Messung in TEM-Messzellen ausgearbeitet. Dazu wurden die unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung der Messzellenabmessungen behandelt, und an einem konkreten Beispiel angewandt. Dadurch konnten die Abmessungen für eine Zelle mit 500 mm Außenabmessungen und 50 Ω charakteristischer Impedanz ermittelt werden. Durch elektrodynamische Simulation wurden die Fernfeldbedingungen der Wellenausbreitung in der Zelle nachgewiesen. Des Weiteren konnte die Frequenzeinschränkung durch Ermittlung der Eigenresonanzen bestimmt werden.

Durch die praktische Ausführung konnte gezeigt werden, dass mit überschaubaren Mitteln eine TEM-Messzelle hergestellt werden kann und die Simulationsergebnisse den realen Bedingungen entsprechen. Die Messzelle bietet ein mögliches Testvolumen von 30 cm x 30 cm x 8 cm und einen verwendbaren Frequenzbereich bis 500 MHz.

Zur Untersuchung der praktischen Eignung zur Störabstrahlungsmessung könnten als nächster Schritt Messungen mit einem Referenzstrahler vorgenommen werden, bzw. mithilfe von Feldsonden die Homogenität der Feldstärke im Testvolumen untersucht werden.

Als weiterführende Themen bieten sich andere Anwendungsgebiete von Messzellen an, wie sie etwa für Kalibrierung von Feldsonden oder zur Untersuchung von Schirmmaterialien verwendet werden. Auch verschiedene Möglichkeiten zur Erweiterung des nutzbaren Frequenzbereiches bieten weitere Untersuchungsmöglichkeiten. Dies kann neben Anbringung von absorbierendem Material an den Zellwänden auch durch ähnliche Prinzipien wie sie in Modenverwirbelungskammern eingesetzt werden geschehen⁴⁵.

⁴⁵ Vgl. Kay (2009)

LITERATURVERZEICHNIS

Gedruckte Werke (11)

Clay, Stephen (1998): Improving the Correlation between OATS, RF Anechoic Room and GTEM Radiated Emissions Measurements for Directional Radiators at Frequencies between approximately 150 MHz and 10 GHz, veröffentlicht in: Electromagnetic Compatibility, 2. Auflage, IEEE International Symposium, Denver, Colorado USA

Crawford, Myron (1974): Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells,

Gonschorek, Karl-Heinz (2005): *EMV für Geräteentwickler und Systemintegratoren*, 1. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Kay, Paul (2009): *A Hybrid TEM-Reverbation Chamber for Electromagnetic Immunity Testing*, Dissertation, Adelaide, South Australia

Kohlrausch, Friedrich (1996): Praktische Physik 1, 24. Auflage, B. G. Teubner, Stuttgart

Montrose, Mark I.; Nakauchi, Edward M. (2004): *Testing for EMC Compliance: Approaches and Techniques*, 1. Auflage, IEEE Press, Piscataway

Morgan, David (1994): *A Handbook for EMC Testing and Measurement*, 1. Auflage, The Institution of Engineering and Technology, London, UK

Ott, Henry (2009): *Electromagnetic Compatibility Engineering*, 1. Auflage, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey

Schwab, Adolf; Kürner, Wolfgang (2011): *Elektromagnetische Verträglichkeit*, 6. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Williams, Tim (2007): EMC for Product Designers, 4. Auflage, Elsevier Ltd., Oxford, UK

Williams, Tim; Armstrong, Keith (2000): *EMC for Systems and Installations*, 1. Auflage, Newnes: An imprint of Butterworth-Heinmann, Oxford

Normen (3)

International Electrotechnical Commission, IEC (Hrsg.): (2010): *IEC 61000-4-20: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-20: Testing and measurement techniques - Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides*

Elektrotechnik, OVE (Hrsg.): (2008): ÖVE/ÖNORM EN 55011: Industrielle, wissenschaftliche und medizinische Hochfrequenzgeräte (ISM-Geräte) – Funkstörungen – Grenzwerte und Messverfahren

Europäische Parlament (Hrsg.): (2004): *Richtlinie 2004/108/EG: RICHTLINIE 2004/108/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES*

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Grafischer Projektrahmen, Quelle: Eigene Darstellung 1
Abbildung 2: Typische EMV-Anforderungen an Geräte, Quelle: Ott (2009), S. 27
Abbildung 3: Feldwellenwiderstand, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 204
Abbildung 4: CISPR OATS (Open Area Test Side), Quelle: Williams (2007), S. 142
Abbildung 5: Messung der Messplatzdämpfung, Quelle: Williams (2007), S. 144 10
Abbildung 6: Absorberraum, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 224
Abbildung 7: Modenverwirbelungskammer, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 229
Abbildung 8: Klassische TEM-Messzelle (Crawford-Zelle), Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 231 13
Abbildung 9: Doppel TEM-Messzelle, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 377
Abbildung 10: Schematischer Aufbau einer GTEM-Zelle, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 233 14
Abbildung 11: Testaufbau zum Messen der Gleichtaktströme, Quelle: Ott (2009), S. 691 16
Abbildung 12: Einfache magnetische Nahfeldsonde, Quelle: Ott (2009), S. 696
Abbildung 13: 1-m Abstrahlungsmessplatz, Quelle: Ott (2009), S. 714 17
Abbildung 14: Schnittdarstellung einer rechteckigen koaxialen Übertragungsleitung, Quelle: Crawford (1974), S. 190
Abbildung 15: Elektrische Feldstärke, Quelle: Eigene Darstellung 20
Abbildung 16: Betrag E-Feld bei 200 MHz 21
Abbildung 17: Betrag H-Feld bei 200 MHz 22
Abbildung 18: E-Feld mit Poynting Vektor bei 200 MHz 22
Abbildung 19: S11 Simulation mit und ohne E.U.T. (Equipment under Test), Quelle: Eigene Darstellung23
Abbildung 20: Konstruktionszeichnung TEM-Messzelle, Quelle: Eigene Darstellung 27
Abbildung 21: S11 Vergleich Simulation zu Messung, Quelle: Eigene Darstellung

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Übersicht Normen	. 7
Tabelle 2: Grenzwerte für die elektromagnetische Störstrahlung, Quelle: ÖVE/ÖNORM EN 55011 (2008 S. 15	s), . 8
Tabelle 3: TEM-Zellen Abmessungen, Quelle: Crawford (1974), S. 191	19
Tabelle 4: Eigenresonanzen der Messzelle	24