

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterthesis

Thomas Kepsch

Inbetriebnahme und Validierung einer
EMV-Absorberkabine

Thomas Kebsch
Inbetriebnahme und Validierung einer
EMV - Absorberkabine

Masterthesis eingereicht im Rahmen der Masterprüfung im
Masterstudiengang Informations- und Kommunikationstechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.-Ing. Ralf Wendel
Zweitgutachter : Prof. Dr.-Ing. Jürgen Missun

Abgegeben am 22.März 2016

Thomas Kebisch

Thema der Masterthesis

Inbetriebnahme und Validierung einer EMV - Absorberkabine

Stichworte

EMV, Absorberkabine, Validierung

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit umfasst die Beschreibung des Aufbaues der Absorberkabine. Weiterhin werden während der Validierung die Eigenschaften der EMV Absorberkabine herausgearbeitet. Die Abschätzung der Messunsicherheit bildet den Abschluss der Arbeit.

Thomas Kebisch

Title of the paper

Operation and validation of EMC - anechoic chamber

Keywords

EMC, anechoic chamber, validation

Abstract

This work covers a description of the structure of an anechoic chamber. Furthermore, the properties of the EMC anechoic chamber are also worked out during validation. The inaccurate measurement estimation completes the work.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	1
2 Begriffe	3
3 Theoretische Einleitung	4
3.1 Elektromagnetische Verträglichkeit	4
3.1.1 Kopplungspfad	4
3.1.2 EMV-Umgebungen	5
3.1.3 Störquelle	6
3.1.4 Störsenke	9
3.1.5 Entstörung	9
3.2 Elektromagnetische Felder	10
3.2.1 Nahfeld	10
3.2.2 Fernfeld	12
3.3 Detektoren	14
3.3.1 Max-Peak Detektor	14
3.3.2 Average Detektor	14
3.3.3 Root-Mean-Squer Detektor	15
3.3.4 Quasi-Peak-Detektor	15
4 Absorberkabine	16
4.1 Semi - Anechoic - Chamber	16
4.2 Fully - Anechoic - Chamber	17
4.3 Absorbermaterialien	18
4.3.1 Ferritkacheln	18
4.3.2 Absorberpyramiden	20
4.4 Aufbau der Absorberkabine der HAW Hamburg	21
4.4.1 Platzierung des Absorbermaterials	22
4.4.2 Öffnungen in der Schirmung	22
4.4.3 Messkette	23
4.4.4 Sendekette	24
4.4.5 Störaussendung in der Absorberkabine	25
5 Validierung EMV-Kabine	28
5.1 Schirmdämpfungsmessung	28
5.1.1 Normative Grundlage der Schirmdämpfung	29
5.1.2 Messung der Schirmdämpfung	29
5.1.3 Ergebnisse	31
5.1.4 Fazit	32
5.2 Validierung des Empfangswegs	33

5.2.1	Überprüfung mittels Einzelträger	33
5.2.2	Vergleichsmessung mit dem Messlabor der Bundesnetzagentur in Kolberg	35
5.2.3	Zusammenfassung	37
5.3	Validierung der Homogenität in der EMV-Kabine	38
5.3.1	Kriterien für die Beurteilung der Homogenität	39
5.3.2	Messung normenkonform ohne Bodenabsorber	40
5.3.3	Messung normenkonform mit Bodenabsorbern	43
5.3.4	Messung normenkonform mit 16 Messpunkten	45
5.3.5	Messung der Feldhomogenität nicht normenkonform	47
5.3.6	Messung der Feldhomogenität für 9 Punkte	49
5.3.7	Messung der Feldhomogenität für 9 Punkte, Antennenposition 2 . .	52
5.3.8	Messung der Feldhomogenität für 9 Punkte, Antennenposition 3 . .	55
5.3.9	Messung der Feldhomogenität für 9 Punkte, Antennenposition 4 . .	57
5.3.10	Messung der Feldhomogenität für 9 Punkte, 50 MHz bis 250 MHz .	59
5.3.11	Zusammenfassung	61
5.4	Validierung der Messplatzdämpfung	62
5.4.1	Prüfaufbau sowie Messorte	62
5.4.2	Messung	65
5.4.3	Auswertung	65
5.4.4	Verfahren zum Nachweis der Sättigungsfreiheit	68
5.4.5	Zusammenfassung	70
6	Messunsicherheit	71
6.1	Messunsicherheit Störstrahlung	71
6.2	Messunsicherheit Störfestigkeit	73
7	Fazit	75
7.1	Zusammenfassung	75
7.2	Schlussbetrachtung	76
7.3	Ausblick	76
A	Anhang	VII
A.1	Literaturverzeichnis	VII
A.2	Liste der Anlagen	IX
A.3	Liste der verwendeten Antennen	X
A.4	Geräteliste	XI
A.5	Ablauf der Messung nach DIN EN 61000-4-3	XII
A.5.1	Kalibrierverfahren mit konstanter Feldstärke	XII
A.5.2	Kalibrierverfahren mit konstanter Leistung	XII
A.6	Erklärung	XIII

Abbildungsverzeichnis

3.1	EMV-Modell mit Kopplungspfad	4
3.2	Gegenüberstellung Intrasystem-Störung und Intersystem-Störung	5
3.3	Klassifizierung von Störquellen	6
3.4	Gegenüberstellung des belegten Spektrums eines Rechtecks sowie eines Cosinus	8
3.5	Leistungsdichte S einer elektromagnetischen Strahlung [Wik15]	12
3.6	Gegenüberstellung verschiedener Detektoren	14
4.1	Schematischer Aufbau einer Semi - Anechoic - Chamber [nach GK15, S. 220]	17
4.2	Schematischer Aufbau einer Full - Anechoic - Chamber [nach GK15, S. 220]	18
4.3	Aufbau Ferritkacheln	18
4.4	Dämpfungsverlauf Ferritkacheln [abgelesen aus GLO]	19
4.5	Dämpfungsverlauf Absorberpyramiden	20
4.6	Montage von Pyramidenabsorbern	21
4.7	Aufbau Pyramiden und Ferritabsorber an Kabinenwand	21
4.8	Schematische Platzierung des Absorbermaterials und Schirmöffnungen in der Absorberkabine der HAW	22
4.9	EMC32 Software: Messkette der Absorberkabine der HAW	23
4.10	EMC32 Software: Sendekette der Absorberkabine der HAW	24
4.11	Störaussendung in der EMV-Kabine, Frequenzbereich	25
4.12	Störaussendung in der EMV-Kabine, Zeitbereich	26
4.13	Abschaltung der Störquelle	27
5.1	Darstellung der Schirmwirkung über den Frequenzbereich [GK15, Kapitel 6.5.1 Seite 218]	29
5.2	Messaufbau zur Validierung des Schirmungsmaßes	30
5.3	Zusammenfassung der Schirmdämpfungsmessung	32
5.4	Validierung der Messkette mittels KSQ1000, Schrittweite 10 MHz	36
5.5	Differenz zwischen Messlabor Kolberg und Absorberkabine HAW	37
5.6	Aufbau der Messpunkte nach DIN EN 61000-4-3, Ansicht von Oben	38
5.7	Aufbau der Messpunkte nach DIN EN 61000-4-3, Frontansicht	38
5.8	Aufbau zur Messung der Homogenität ohne Absorber auf der Bodenfläche	40
5.9	Auswertung zur Messung der Homogenität ohne Absorber auf der Bodenfläche	41
5.10	Feldstärkenverteilung der Gitterpunkte bei 266,7 MHz, ohne Pyramidenabsorber auf dem Boden	42
5.11	Aufbau zur Messung der Homogenität mit Absorber auf der Bodenfläche	43
5.12	Auswertung zur Messung der Homogenität mit Absorber auf der Bodenfläche	44
5.13	Auswertung zur Messung der Homogenität mit Absorber auf der Bodenfläche und 16 Messpunkten	45
5.14	Feldstärkenverteilung der Gitterpunkte bei 266,7 MHz, mit Pyramidenabsorber auf dem Boden	46
5.15	Aufbau zur Messung der Homogenität abweichend von der Norm DIN EN 61000-4-3	47
5.16	Auswertung zur Messung der Homogenität abweichend von der Norm DIN EN 61000-4-3	48
5.17	Aufbau zur Messung der Homogenität mit einer Fläche von 1 qm	49

5.18 Auswertung zur Messung der Homogenität 1 qm Zentrum	50
5.19 Feldstärkenverteilung für neun Gitterpunkte bei 309,59 MHz	51
5.20 Schematische Darstellung der Antennenposition für die Messung der Feld- homogenität	53
5.21 Vergleich Ausgangsmessung zur verschobenen Antenne, Links	53
5.22 Auswertung zur Messung der Homogenität 1 qm, links	54
5.23 Vergleich Ausgangsmessung zur verschobenen Antenne, Mitte Links	55
5.24 Auswertung zur Messung der Homogenität 1 qm, mitte links	56
5.25 Darstellung der zugeführten Leistung aller Gitterpunkte	57
5.26 Auswertung zur Messung der Homogenität 1 qm, mitte vorne	58
5.27 Auswertung zur Messung der Homogenität 1 qm, Position 4 50 MHz bis 250 MHz	59
5.28 Aufbau der Messeinrichtung nach Typ 1 der Norm DIN EN 61000-4-22 [DIN11c, S. 11]	63
5.29 Aufbau des Prüfvolumens in der Absorberkabine [DIN11c, S. 19]	64
5.30 Auswertung der Messplatzdämpfung nach DIN EN 61000-4-22, vertikale Polarisation	67
5.31 Auswertung der Messplatzdämpfung nach DIN EN 61000-4-22, horizonta- le Polarisation	68
5.32 Auswertung zur Prüfung auf Sättigung	69

Tabellenverzeichnis

3.1	Einteilung des subjektiven Störeindrucks [ITU90, ITU02]	9
3.2	Zeitkonstanten des Quasi-Peak-Detektors nach [CR00]	15
4.1	Eigenschaften der Ferritkacheln HSN-1 [nach GLO]	19
5.1	Ergebnisse der Schirmdämpfungsmessung mit Antenne 4 und 5 aus A.3 und Verstärker 2 aus Geräteliste A.4	31
5.2	Ergebnisse der Schirmdämpfungsmessung mit Antenne 1 und 3 aus A.3 sowie Verstärker 2 aus Geräteliste A.4	31
5.3	Ausgangsdaten für die Validierung des Empfangsweges	34
5.4	Validierungsergebnisse des Empfangsweges	35
5.5	Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für 16 Punkte, ohne Boden- absorber	42
5.6	Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für 4 Punkte, mit Bodenab- sorbern	44
5.7	Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für 16 Punkte, Normkonform	46
5.8	Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für 16 Punkte, nicht Norm- konform	48
5.9	Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für 9 Punkte, Antennenposi- tion 1	51
5.10	Symmetrien zwischen Sendeantenne und Abmessungen der Absorberka- bine	52
5.11	Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für 9 Punkte, Antennenposi- tion 2	54
5.12	Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für 9 Punkte, Antennenposi- tion 3	56
5.13	Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für 9 Punkte, Antennenposi- tion 4	58
5.14	Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für 9 Punkte, Antennenposi- tion 4, 50 MHz bis 250 MHz	60
5.15	Geräte für den Validierungsaufbau der Messplatzdämpfung	63
5.16	Abmessungen des Prüfvolumen der Absorberkabine	64
5.17	Anforderung zur Validierung [DIN11c, S. 22]	66
6.1	Parameter für die Messunsicherheitsberechnung [DIN14d, Tabelle D6] . . .	72
6.2	Ergebnisse der Messunsicherheitsbetrachtung für Störstrahlung	73
6.3	Parameter für die Messunsicherheitsberechnung [DIN11c, Tabelle D1] . . .	74
6.4	Ergebnisse der Messunsicherheitsbetrachtung für Störfestigkeit	74
A.1	Verwendete Antennen	X
A.2	Verwendete Geräte	XI

Abkürzungsverzeichnis

AF:	Antennenfaktor
DUT:	Device Under Test
DVB:	Digital Video Broadcasting
EIRP:	equivalent isotropically radiated power
EMV:	Elektromagnetische Verträglichkeit
EUT:	Equipment Under Test
FAC:	Fully Anechoic Chamber
FT:	Fourier Transformation
GFB:	gleichförmiger Feldbereich
GSM:	Global System for Mobile Communications
HAW:	Hochschule für Angewandte Wissenschaften
LCD:	liquid crystal display
LTE:	Long Term Evolution
RMS:	Root Mean Square (Effektivwert)
SAC:	Semi Anechoic Chamber
TEM-Zelle:	transversale elektromagnetische Zelle
UKW:	Ultrakurzwellen
UMTS:	Universal Mobile Telecommunications System

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

In der heutigen Zeit, mit vielen drahtlosen Übertragungssystemen wie Mobilfunk (GMS, UMTS, LTE), Rundfunk (UKW, DAB, DVB) oder Betriebsfunk ist es notwendig, Regelungen zu finden, um einen effizienten und störungsfreien Betriebsablauf jedes Funkdienstes zu gewährleisten.

Die Koexistenz verschiedener Funkdienste wird mit dem Begriff der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMVG) gekennzeichnet. Die elektromagnetische Verträglichkeit ist bidirektional und beschreibt die Fähigkeit einer elektrischen Einrichtung in ihrem Umfeld fehlerfrei zu funktionieren, ohne diese unzulässig zu beeinflussen.

In der Europäischen Union ist jeder Inverkehrbringer von elektrischen Geräten dazu verpflichtet, die Gesetze über die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln, kurz EMVG einzuhalten. Der Hersteller bzw. der Inverkehrbringer muss somit nachweisen, dass seine Einrichtung die entsprechenden Grenzwerte einhält.

Der Nachweis, dass eine Einrichtung den entsprechenden Grenzwert einhält, wird in speziell ausgerüsteten Messlaboren geliefert. Um die Reproduzierbarkeit dieser Messergebnisse gewährleisten zu können, müssen für die Grenzwertbetrachtungen gewisse Voraussetzungen erfüllt werden. Einer der wichtigsten Aspekte dabei ist, dass ausschließlich die Aussendung der Einrichtung erfasst und bewertet wird.

Die Messung der Emission einer Einrichtung ist nur möglich, in dem sich die Einrichtung in einer EMV neutralen Umgebung befindet. Dies setzt voraus, dass die Umgebung Aussendungen von außen abschirmt bzw. die äußeren Einflüsse bekannt sind. Weiterhin sollen ausschließlich die direkten Aussendungen der Einrichtung untersucht werden, was bedeutet, dass Reflexion in diesem EMV neutralen Raum unterdrückt bzw. absorbiert werden.

Solche Bedingungen sind nur in EMV-Messkabinen oder TEM-Zellen zu finden. Eine solche EMV-Messkabinen wurde an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg installiert. Die EMV-Messkabine weist zum Start der Abschlussarbeit die reine mechanische Installation auf.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Abschlussarbeit ist es, auf Grundlage der vorhandenen Absorberkabine den Betrieb für Störstrahlungs- sowie Störfestigkeitsmessungen zu gewährleisten. Im Rahmen der Abschlussarbeit muss der korrekte Ablauf der Kommunikation zwischen den Geräten und der Messsoftware, sowie die Einrichtung der Messgeräte und die Messung von Hilfsmitteln, wie den Dämpfungsverlauf von Übergängen und Übertragungswegen, sichergestellt werden.

Ein weiteres Ziel ist die Validierung der EMV - Messkabinen. Im Abschnitt der Validierung sollen die Eigenschaften und gegebenenfalls Schwächen der Kabine herausgearbeitet werden.

Für die Validierung von EMV - Messumgebungen sind drei Verfahren vorgesehen. Zum Einen wird die Messung der Feldhomogenität sowie der normierten Messplatzdämpfung durchgeführt. Zum Anderen wird im Kapitel der Validierung auf die Eigenschaft der Schirmdämpfung eingegangen.

Ein weiterer Punkt für die Bestimmung der Eigenschaften der Absorberkabine wird die Beurteilung der Qualität des Empfangsweges sein. Die Bewertung der Qualität des Empfangsweges wird anhand einer Gegenüberstellung von theoretischen Berechnungen und einer Messung erfolgen.

Eine Vergleichsmessung mit dem Messlabor der Bundesnetzagentur und der EMV - Messkabine der HAW bildet den Abschluss der Beurteilung des Empfangsweges. Diese Vergleichsmessung soll zeigen, ob signifikante Unterschiede in der Bewertung von Prüflingen bestehen.

Im Abschließenden Kapitel wird auf die Messunsicherheit eingegangen, da eine Messung ohne aufzuführen bzw. berücksichtigen der Unsicherheitsfaktoren keinen Anhaltspunkt über die Qualität der Messung geben kann. Dieses letzte Kapitel zeigt mögliche Einflüsse auf die Sende- und Messketten, die zu einer Messunsicherheit führen.

2 Begriffe

Antenne

Oder auch Wellentypwandler ist ein Gebilde, welches eine leitungsgeführte Welle in eine elektromagnetische Welle wandelt. Eine Antenne ist immer bidirektional, was bedeutet, dass jede Antenne als Sende- und Empfangsantenne genutzt werden kann.

Antennenfaktor

Beschreibt ein Verhältnis zwischen Feldstärke und erzeugter Spannung an der Antenne.

Antennengewinn

Ist die Eigenschaft einer Antenne, in Hauptstrahlrichtung eine erhöhte Leistungsflußdichte im Vergleich zu einer Bezugsantenne in gleicher Entfernung zu erzeugen.

EMV

Fähigkeit einer elektrischen Einrichtung, in ihrer elektromagnetischen Umgebung Ordnungsgemäß zu funktionieren, ohne diese Umgebung, zu der auch andere Einrichtungen gehören, unzulässig zu beeinflussen.

FWD

Die Vorwärtsleistung beschreibt die Summe aus Sendeleistung und reflektierter Leistung.

Grenzwert

Der in einer Festlegung enthaltene größte oder kleinste zulässige Wert einer Größe (siehe DIN 40200).

Hauptstrahlrichtung

Ist die Vorzugsrichtung einer Antenne mit einem ausgeprägtem Antennengewinn.

RWD

Die reflektierte Leistung ist jene Leistung, die nicht von der Antenne in eine elektrische Feldstärke umgewandelt werden kann.

Sättigung

Beschreibt einen Zustand, bei dem Halbleiterelemente einen vollständig leitenden Zustand erreichen, was dazu führt, dass die Verstärkung gegen Null geht.

3 Theoretische Einleitung

3.1 Elektromagnetische Verträglichkeit

Um klären zu können, was Elektromagnetische Verträglichkeit bedeutet, werden zunächst einige Begriffe und Modelle der Elektromagnetischen Verträglichkeit untersucht.

Elektrische Geräte, Systeme oder Einrichtungen müssen heutzutage zwei Bedingungen erfüllen. Zum einen dürfen sie keine Aussendungen aufweisen, die zu einer fehlerhaften Funktion eines anderen Teilnehmers führt. Zum anderen müssen sie eine Störfestigkeit besitzen.

Dies bedeutet, dass ein elektromagnetische Feld mit geringer Feldstärke zu keiner Fehlfunktion des Prüflings führt. Zusammengefasst bedeutet das, dass das Gebiet der Elektromagnetischen Verträglichkeit immer bidirektional ist.

Für die Vereinfachung wird im Weiteren folgende Bezeichnung eingeführt. Ein Sender ist der Ausgang einer Aussendung oder die Störquelle. Die Gerät, System oder die Einrichtung, die diesem Feld ausgesetzt wird, werden im Weiteren als Empfänger oder Störsenke bezeichnet. Die Verbindung zwischen Sender und Empfänger wird in folgender Abbildung als Kopplungspfad bezeichnet.

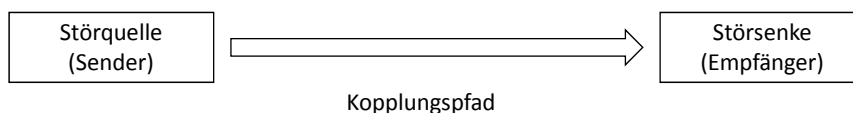


Abbildung 3.1: EMV-Modell mit Kopplungspfad

3.1.1 Kopplungspfad

Der Kopplungspfad verbindet den Sender und Empfänger und kann in fünf Kopplungsarten aufgeteilt werden.

- galvanisch
- induktiv
- kapazitiv
- Leitung gekoppelt
- Strahlung gekoppelt

Im Fall einer Störung ist das Wissen über das Eintreten der Störung, dem sogenannten Störort, und dem damit verbundenen Kopplungspfad von entscheidender Bedeutung. Weiterhin ist es wichtig, zwischen inneren und äußeren Störungen zu unterscheiden.

Von einer inneren Störung spricht man, wenn sich Komponenten innerhalb eines geschlossenen Systems beeinflussen. Diese Störungen werden als Intrasystem-Störung bezeichnet. Die Entstörung solcher innerer Effekte liegt im Interesse und der Verantwortung des Herstellers des Gesamtsystems. Ein Beispiel für eine Intrasystem-Störung kann ein Motor sein, der einen magnetischen Sensor innerhalb eines Gerätes oder Systems beeinflusst.

Das Gegenteil der Intrasystem-Störung ist die Störung, die von externen Geräten bzw.

Systemen zu einer Fehlfunktion führt. Dies wird als äußere Störung oder Intersystem-Störung bezeichnet. Die Koexistenz mehrerer Geräte und Systeme ist gesetzlich durch die jeweiligen Produktzulassungen geregelt. In den einzelnen Zulassungen wird festgeschrieben, in welchem Maß ein Gerät/System Störaussendung produzieren darf. Weiterhin ist geregelt, wie viele Störungen einwirken dürfen, ohne das dies zu einer Fehlfunktion führt.

In Abbildung 3.6 sind die Unterschiede der inneren und äußeren Störung gegenübergestellt.

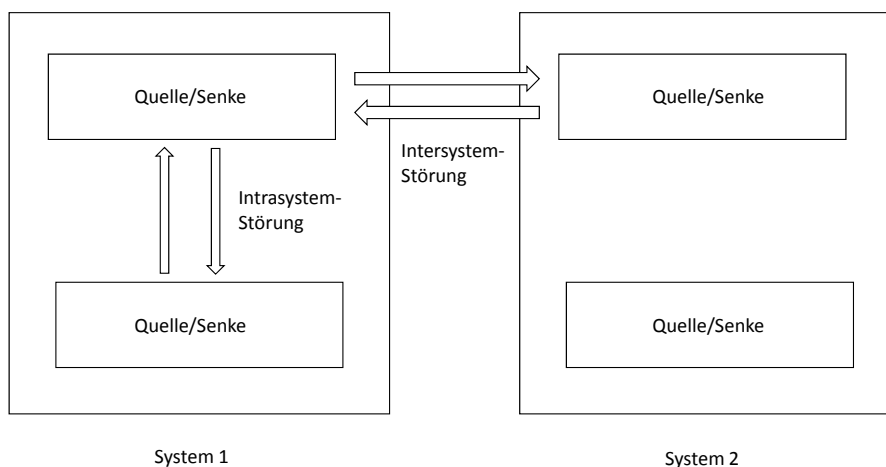


Abbildung 3.2: Gegenüberstellung Intrasystem-Störung und Intersystem-Störung

3.1.2 EMV-Umgebungen

Wie im Abschnitt 3.1.1 beschrieben, ist der Kopplungspfad entscheidend für das Entstehen einer Störung. So ist das Auftreten einzelner Kopplungseffekte an bestimmten Orten und Gebieten wahrscheinlicher als an anderen. Im Folgenden wird die Einteilung in üblichen EMV-Umgebungen dargestellt.

Wohngebiet Der Bereich der Wohngebiete gilt für Geräte und Betriebsmittel, die über das 50 Hz Niederspannungsnetz, Gleichspannung oder über Batterien versorgt werden. Hier ist davon auszugehen, dass keine größeren Leistungen geschaltet werden. Weiterhin ist davon auszugehen, dass sich in dieser Umgebung keine großen Leistungsabnehmer befinden, wie zum Beispiel Schmelzöfen oder Schweißgeräte. Dies hat zur Folge, dass die Grenzwerte der Störfestigkeit der Geräte gering ausfallen. Beispielhafte Aufstellungs-/Betriebsstandorte sind Wohnungen, Läden, Büros oder Gaststätten.

Industriegebiete Produkte, die in den Bereich des Industriegebietes eingestuft werden, dürfen eine höhere Störaussendung aufweisen. Dies hat zur Folge, dass die Störfestigkeit dieser Produkte wesentlich größer sein muss.

Geschützte Gebiete Bei unter einem geschützten Einsatzort ist davon auszugehen, dass die Bedingungen vor Ort bekannt sind. *“Man geht von kontrollierten Bedingungen aus (d.h. z.B. dem Verbot der Nutzung von Mobiltelefonen) muss daher wenig Störfestigkeit einfordern. Viele sehr empfindliche Messapparaturen und Sensoren bedeuten aber auch scharfe Anforderungen an das Emissionsverhalten.”*[GK15, S.20]

3.1.3 Störquelle

Als Störquelle wird der Ursprung einer elektromagnetischen Welle bezeichnet, die zu einem Fehlverhalten eines Gerätes bzw. Systems führt. Eine Störquelle kann in zwei Bereiche unterteilt werden. Zunächst gibt es natürliche Störquellen, wie Blitze oder die kosmische Hintergrundstrahlung. Diese soll im Folgenden nicht weiter betrachtet werden. Neben den natürlichen Quellen gibt es auch künstliche Störquellen. Diese künstlichen Quellen werden in funktionale und nicht funktionale Quellen eingeteilt.

Funktionale Störquellen Funktionale Störquellen sind gewollte Aussendungen wie WLAN, Mobil- oder Rundfunk. Bei der Entwicklung von Geräten und Systemen sind diese gewollten Aussendungen bekannt und können von Beginn an berücksichtigt werden und sollten so zu keiner Fehlfunktion führen.

Nicht funktionale Störquellen Als nicht funktionale Störquellen werden die Arten von Aussendungen bezeichnet, die ungewollt abgestrahlt werden. Diese Aussendungen machen es einem Hersteller schwer, die Funktionalität ihrer Produkte sicherzustellen. Beispiele für ungewollte Störquellen sind Motoren oder Frequenzumrichter.

So problematisch Störungen für den Hersteller sind, so interessant sind Störaussendungen für die Messtechnik. Ungewollte Störquellen können im Folgendem in schmalbandige und breitbandige Störquellen unterteilt werden.

Schmalbandige Störungen weisen meist ein klares Spektrum auf und werden ungewollt von Systemen, wie Schaltnetzteilen, ausgesendet. Breitbandige Störquellen sind überwiegend Nebenprodukte von Schaltvorgängen, wie die Zündanlage in Motoren.

Abbildung 3.3 stellt die oben beschriebene Einteilung bzw. die Klassifizierung von Störquellen grafisch dar.

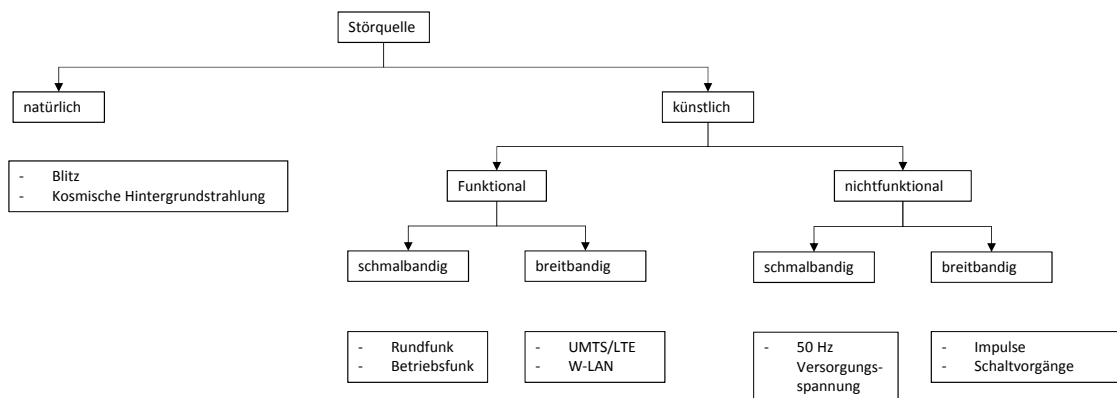


Abbildung 3.3: Klassifizierung von Störquellen

Folgendes Beispiel zeigt, warum kurze Schaltimpulse eine große Spektrumsbelegung aufweisen. Das Beispiel stellt, anhand der komplexen Fourier Zerlegung eines Rechteckes sowie eines kontinuierlichen Signals die Unterschiede dar.

Für dieses Beispiel wird eine Rechteckfunktion mit folgenden Grenzen angenommen:

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t \leq -t_0 \\ 1 & \text{für } -t_0 < t \leq t_0 \\ 0 & \text{für } t_0 < t \end{cases} \quad (3.1)$$

Die Amplitude dieses Signals ist lediglich in der Zeit von $-t_0$ bis t_0 konstant eins, sonst Null. Das nun so definierte Signal beschreibt ein ideales Rechteck und dient im Folgendem als Ausgangssignal. Für die Berechnung des Spektrums wird der Ansatz der Fourier Transformation gewählt. Die Fourier Transformation (FT) wird durch folgende Gleichung dargestellt.

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (3.2)$$

Der Ansatz der FT auf das Rechteck angewandt ergibt:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt = \int_{-t_0}^{+t_0} 1 \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (3.3)$$

In diesem Schritt wurde aus dem unendlichen Fourierintegral ein endliches Integral, da lediglich im Bereich von $-t_0$ bis t_0 das Ergebnis des Integrals einen Wert annimmt, der ungleich Null ist. Für das Lösen des Integrals wird die Stammfunktion der Exponentialfunktion genutzt

$$\int e^{at} dt = \frac{1}{a} \cdot e^{at} \quad (3.4)$$

Mit Gleichung 3.4 ist alles vorhanden, um das Fourierintegral zu lösen.

$$X(\omega) = \int_{-t_0}^{+t_0} 1 \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (3.5)$$

$$= \frac{1}{-j \cdot \omega} \cdot e^{-j\omega t} \Big|_{-t_0}^{+t_0} \quad (3.6)$$

$$= \frac{1}{-j \cdot \omega} (e^{-j\omega t_0} - e^{+j\omega t_0}) \quad (3.7)$$

$$= \frac{-2 \cdot j \cdot \sin(\omega \cdot t_0)}{-j \cdot \omega} \quad (3.8)$$

$$= 2 \cdot t_0 \cdot \frac{\sin(\omega \cdot t_0)}{\omega \cdot t_0} = \underline{\underline{2 \cdot t_0 \cdot \text{si}(\omega \cdot t_0)}} \quad (3.9)$$

Anschließend wird das Ausgangssignal, der Rechteck, mit seinen steilen Flanken einem kontinuierlichen Signal gegenübergestellt werden. Im Folgenden wird die Fourier Transformation an einem Cosinus durchgeführt. Für die FT des Cosinus bedient man sich der Eulerschen Form.

$$x(t) = \cos(\omega_0 t) = \frac{1}{2} (e^{+j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t}) \quad (3.10)$$

Die Fouriertransformierte ergibt folgendes:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} (e^{+j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t}) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (3.11)$$

$$= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} (e^{+j(\omega-\omega_0)t} + e^{-j(\omega+\omega_0)t}) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (3.12)$$

$$= \frac{1}{2} [\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)] \quad (3.13)$$

Vergleicht man nun die Gleichungen 3.9 und 3.13, so ist zu erkennen, dass die Fouriertransformation (FT) eines Rechteckes im Spektrum eine si-Funktion zur Folge hat. Die FT eines kontinuierlichen Signals, wie dem Cosinus, wird durch zwei Diracs im Spektrum dargestellt.

Die folgende Abbildung zeigt das Ausgangssignal sowie das Spektrum eines Rechteckimpulses. Dem Rechteck ist ein endlicher Cosinus gegenübergestellt, was die Abweichung zum Dirac erklärt. Für den besseren Vergleich des Spektrums wurde die Amplitude des Cosinus gedämpft.

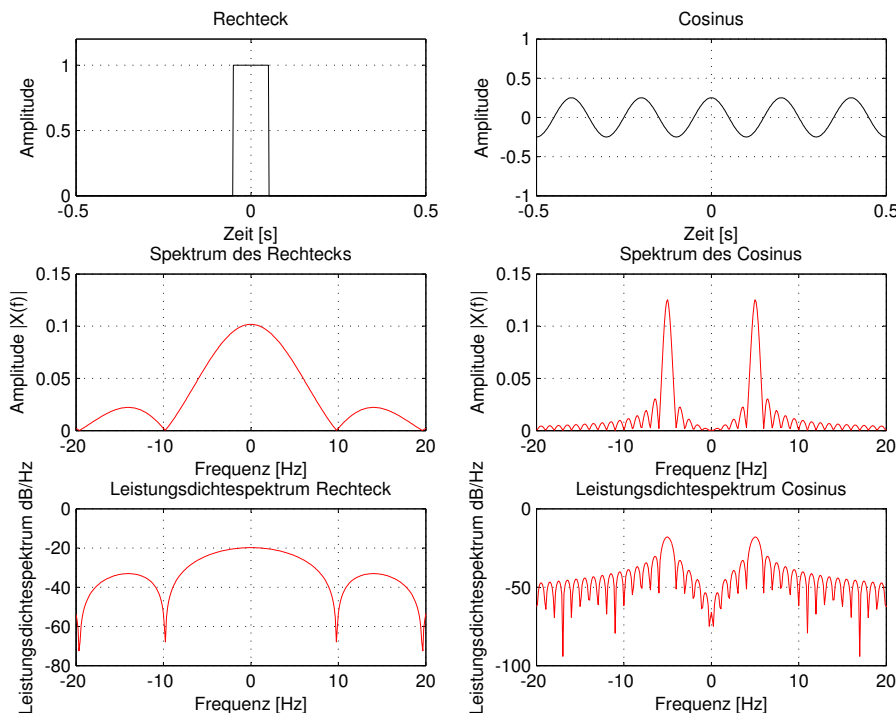


Abbildung 3.4: Gegenüberstellung des belegten Spektrums eines Rechtecks sowie eines Cosinus

3.1.4 Störsenke

Störungen durch elektromagnetische Wellen werden meist am Ort der Störung zuerst wahrgenommen. Wie eingangs beschrieben, wird dieser Ort der Störung als Störsenke bezeichnet. Bei der Störquelle wurde die Emission der elektromagnetischen Welle untersucht. Wichtig für Betriebsmittel am Ort der Störung ist die Immunität gegen diese äußeren Einflüsse.

Im Bereich der EMV wird die Immunität als Störfestigkeit bezeichnet. Ein Betriebsmittel muss am Betriebsort mit den jeweiligen Störfeldstärken betrieben werden können, ohne dass der Betrieb durch unzulässige Fehlfunktionen gestört wird. Die Auswirkung einer Störung auf die Senke ist meist subjektiv.

International wird der subjektive Störeindruck auf einer fünf stufigen Skala aufgeteilt. Zu finden sind diese Einteilungen zum Beispiel in der ITU-R BS.562-3 sowie in der ITU-R BT.500-11. Die folgende Tabelle zeigt die Einteilung in diese fünf Bereiche.

Tabelle 3.1: Einteilung des subjektiven Störeindrucks [ITU90, ITU02]

Grad	Qualität	Beeinträchtigung
5	exzellent	nicht wahrnehmbar
4	gut	wahrnehmbar, aber nicht störend
3	ausreichend	leicht störend
2	gering	störend
1	schlecht	sehr störend

3.1.5 Entstörung

Wie oben beschrieben, ist der Grund für das Auftreten einer elektromagnetischen Störung die Kopplung zwischen Quelle und Senke. Die Entstörung ist die Unterbrechung des Kopplungspfad und erfordert die genaue Kenntnis des Störtors und des Kopplungspfad.

So sind die Pfade bei den einzelnen Kopplungsmechanismen unterschiedlich. Eine Gegenmaßnahme einer Störung, hervorgerufen durch eine induktive Kopplung, kann die Vergrößerung des Abstandes zwischen zwei Leitern sein oder die Reduzierung des Stromes, der so zu einem geringeren magnetischen Feld führt. Die Unterbrechung des Kopplungsweges einer Strahlungskopplung kann durch Schirmung bzw. Absorption erreicht werden.

Die wirksamste Maßnahme gegen Störung ist jedoch der EMV gerechte Entwurf elektro-nischer Schaltungen und Elemente.

3.2 Elektromagnetische Felder

Grundlage aller drahtlosen Übertragungssysteme ist die Übermittlung mittels elektromagnetischer Wellen. Eine elektromagnetische Welle besteht aus zwei Komponenten. Zum einen der elektrischen, zum anderen der magnetischen Welle. Eine elektromagnetische Welle entsteht, wenn sich eine leitungsgeführte Welle über eine Antenne ablöst. Die Umwandlung einer leitungsgeführten Welle zu einer abgestrahlten Welle führt dazu, dass eine Antenne auch als Wellentypwandler bezeichnet wird.

Fließt ein Strom durch einen Leiter, wird ein magnetisches Feld erzeugt. Die zweite Maxwellsche Gleichung besagt, dass die zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte ein elektrisches Wirbelfeld hervorruft. Diese beiden Felder sind phasenverschoben und stehen orthogonal zu einander.

In einem bestimmten Bereich der Antenne ist die Orthogonalität nicht gewährleistet und die Verhältnisse zwischen den elektrischen und magnetischen Komponenten sind ungeordnet. Dieser Bereich wird als Nahfeld bezeichnet. Mit wachsender Entfernung zur Antenne nähern sich die Phasen der Felder an, bis das elektrische und magnetische Feld phasengleich sind. Da das Nahfeld und Fernfeld so unterschiedlich ist, werden diese im Folgenden genauer ausgeleuchtet. Sollen die Bereiche von Strahlungsfeldern in Quellennähe untersucht werden, ist folgende Raumaufteilung üblich:

- reaktives Nahfeld
- strahlendes Nahfeld
- Fernfeld (Fraunhofer Gebiet)

Es ist nicht möglich, diese drei Gebiete mittels Linie von einander zu trennen, viel mehr ist der Übergang zwischen diesen Bereichen fließend. Dennoch soll im Folgenden eine Hilfe zur Einteilung in die Gebiete gegeben werden.

3.2.1 Nahfeld

Das Nahfeld beginnt an der Oberfläche einer Strahlungsquelle. Die Ausdehnung des Nahfeldes ist abhängig von der Wellenlänge und somit ist die Ausdehnung direkt abhängig von der Frequenz. Ist der Abstand zur Strahlungsquelle kleiner als die vierfache Ausdehnung der Wellenlänge, so befindet man sich im Nahfeld. An dieser Stelle befindet sich folgende Besonderheit des Nahfeldes. Für elektrisch große Antennen, beziehungsweise Flächenantennen, wird das Nahfeld nach folgender Gleichung bestimmt.

$$r_{\text{fernfeld}} \geq \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} \quad (3.14)$$

wobei D die größte Aperaturweite der Antenne darstellt.

Bei elektrisch kleinen Antennen gilt folgende Beziehung für das Nahfeld

$$r \gg \frac{\lambda}{2 \cdot \pi} \quad (3.15)$$

Im Weiteren ist es sinnvoll, dass Nahfeld in die Bereiche des reaktiven und des strahlenden Nahfeldes zu unterteilen.

Reaktives Nahfeld

Im reaktiven Nahfeld befindet man sich bis zu einem Abstand von $< \frac{\lambda}{2 \cdot \pi}$ zur Strahlungsquelle. In diesem Bereich findet die Energieablösung der elektromagnetischen Welle von der Antenne statt. Des Weiteren kann es im reaktiven Nahfeld zu Überhöhungen der elektrischen sowie magnetischen Komponente kommen. Aus diesem Grund ist eine zuverlässige Berechnung der Feldstärke im reaktiven Nahfeld mittels Fernfeldberechnung nicht möglich.

Strahlendes Nahfeld

Das strahlende Nahfeld bildet einen Übergangsbereich zwischen dem reaktiven Nahfeld und dem Fernfeld. Bezogen auf die Wellenlänge bedeutet dies einen Abstand von $> \frac{\lambda}{2 \cdot \pi}$ bis $4 \cdot \lambda$ zur Antenne.

Im Gebiet des strahlenden Nahfeldes sind keine Rückkopplungen zwischen den Feldern und der Strahlungsquelle vorhanden. Die elektrische und magnetische Welle stehen bereits orthogonal zueinander, sind aber noch nicht in Phase. Somit ist der Feldwellenwiderstand $Z_0 = \frac{E}{H}$ stark ortsabhängig und nicht mit dem Feldwellenwiderstand des Fernfeldes ($Z_0 = 120 \cdot \pi$) gleich zu setzen.

Messung im Nahfeld

Die Messungen der Feldstärken im Nahfeld ist durch die Ortsabhängigkeit der elektromagnetischen Welle erschwert. Ist die Messung im Nahfeld nicht zu umgehen, müssen drei Achsen gemessen werden. Die Grundlage dieser Messung stellt ein dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem dar.

Die drei Vektoren werden im Weiteren als x-, y- sowie z-Vektor bezeichnet. Diese Vektoren stehen im kartesischen Koordinatensystem senkrecht aufeinander. Vorteil dieser Betrachtung ist die einfache Ermittlung der resultierenden Feldstärke mittels nachfolgender Gleichung.

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (3.16)$$

Diese Berechnung kann analog für die magnetische Feldstärke durchgeführt werden. Wird eine linear polarisierte Antenne, wie zum Beispiel ein Dipol, verwendet, müssen alle drei Achsen einzeln gemessen und nach Gleichung 3.16, die resultierende Feldstärke berechnet werden.

Eine weitere Möglichkeit, die Feldstärke im Nahfeld zu messen, bieten isotrope Messantennen. Diese werden auch Messsonden genannt und geben meist die resultierende Feldstärke aus. Die Verwendung einer Messsonde bietet den Vorteil, Feldstärken zu ermitteln selbst, wenn die Abmessungen der Messsonde klein gegenüber der Wellenlänge ist. Dies ermöglicht die Messung von lokalen Feldänderungen.

Eine Feldstärkemessung mittels Richtantenne führt zur Mittelung der Feldstärke über ein größeres Gebiet, was zu einer Verfälschung der Ergebnisse führt.

3.2.2 Fernfeld

Vom Fernfeld spricht man, sobald eine elektromagnetische Welle einen Abstand von $4 \cdot \lambda$ zur Strahlungsquelle zurück gelegt hat. Ist die Antenne eine Flächenantenne, muss Gleichung 3.14 herangezogen werden. Im Fernfeld vereinfacht sich die Handhabung zwischen dem elektrischen und dem magnetischen Feld. Diese sind phasengleich, transversal und stehen nun orthogonal zueinander.

Die Berechnung sowie die Beschreibung der Verhältnisse zwischen elektrischer und magnetischer Welle lässt sich am anschaulichsten über das Modell des Isotropen Kugelstrahler erläutern. Hierbei handelt es sich um einen idealen Kugelstrahler, der die Energie in alle Richtungen gleichermaßen abstrahlt. Dabei nimmt die Leistungsflussdichte umgekehrt proportional zur Entfernung dieser Quelle ab. Dies verdeutlicht nachfolgende Abbildung:

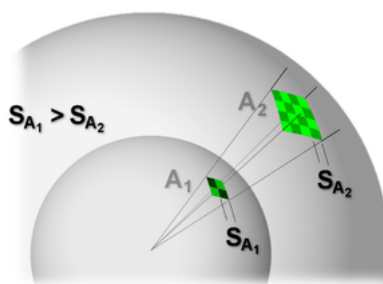


Abbildung 3.5: Leistungsichte S einer elektromagnetischen Strahlung [Wik15]

Befindet sich ein Kugelstrahler im Mittelpunkt einer Kugel so ist die Leistungsflussdichte an der Kugellinnenseite überall gleich. Die Leistungsflussdichte wird demnach mit der Einheit Watt pro Flächeninhalt ausgedrückt.

$$S = \frac{P}{A} \quad (3.17)$$

Die Kugeloberfläche wird mit $A = 4 \cdot \pi \cdot r^2$ bestimmt, somit ergibt sich für die Leistungsflussdichte eine Abhängigkeit zur Entfernung der Strahlungsquelle wie folgt

$$S = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (3.18)$$

Der Feldwellenwiderstand ergibt sich aus der magnetischen Feldkonstante μ_0 und der elektrischen Feldkonstante ε_0 .

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad (3.19)$$

Dabei ist:

$$\begin{aligned} \mu_0 &: 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \\ \varepsilon_0 &: 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \end{aligned}$$

Daraus folgt eine Konstante mit dem Wert von in etwa 377Ω oder $120 \cdot \pi$.

Die Beziehungen zwischen elektrischer Feldstärke E , magnetische Feldstärke H und Leistungsflussdichte S können mit dem Ohmschen Gesetz verglichen werden. Die Spannung U entspricht der elektrischen Feldstärke E , der Strom I der magnetischen Feldstärke H , der Widerstand R entspricht dem Feldwellenwiderstand Z_0 und die Leistung P entspricht der Leistungsflussdichte S .

Das Ohmsche Gesetz lautet zusammengefasst

$$U = I \cdot R \quad (3.20)$$

$$I = \frac{U}{R} \quad (3.21)$$

$$P = U \cdot I \quad (3.22)$$

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (3.23)$$

Dabei ist:

U: Spannung [V]

I: Strom [A]

R: Widerstand [Ω]

P: Leistung [W]

Die Feldstärken E und H , der Feldwellenwiderstand Z_0 und die Leistungsflussdichte S ergeben sich zu folgenden Beziehungen.

$$E = H \cdot Z_0 \quad (3.24)$$

$$H = \frac{E}{Z_0} \quad (3.25)$$

$$S = E \cdot H \quad (3.26)$$

$$S = \frac{E^2}{Z_0} \quad (3.27)$$

Dabei ist:

E: elektrische Feldstärke [$\frac{V}{m}$]

H: magnetische Feldstärke [$\frac{A}{m}$]

R: Feldwellenwiderstand [Ω]

S: Leistungsflussdichte [$\frac{W}{m^2}$]

Für spätere Untersuchungen wird die Berechnung der elektrischen Feldstärke benötigt und kann über die Leistungsflussdichte S ermittelt werden. Hierfür wird Gleichung 3.18 in 3.27 eingesetzt und nach E umgestellt. Daraus folgt

$$E = \sqrt{\frac{P \cdot Z_0}{4 \cdot \pi \cdot r^2}} \quad (3.28)$$

An den oben aufgeführten Gleichungen sind nun zwei elementare Eigenschaften zu erkennen. Zum einen sieht man, dass die Leistungsflussdichte S mit dem Abstand zur Antenne quadratisch abnimmt, zum anderen ist aus Gleichung 3.28 zu sehen, dass die elektrische Feldstärke sich linear zur Entfernung reduziert.

3.3 Detektoren

Die heutige Messtechnik ermöglicht es, große Frequenz- bzw. Zeitbereiche darzustellen. Diese Signale werden meist auf LC-Displays dargestellt und durch diese Technik auch in ihrer Auflösung begrenzt. Dies führt zu dem Problem, dass bei einer großen Darstellung ein Pixel einen großen Messbereich und mehrere Sampels repräsentiert. Die Bewertung des Pixels wird durch die Wahl des entsprechenden Detektors bestimmt. Aus diesem Grund ist eine Erläuterung der verschiedenen Detektoren unumgänglich. Im Folgenden werden die Detektoren erläutert, die bei einer bewerteten Messung Anwendung finden. In der nachfolgenden Abbildung sind die Unterschiede der Detektoren aufgeführt.

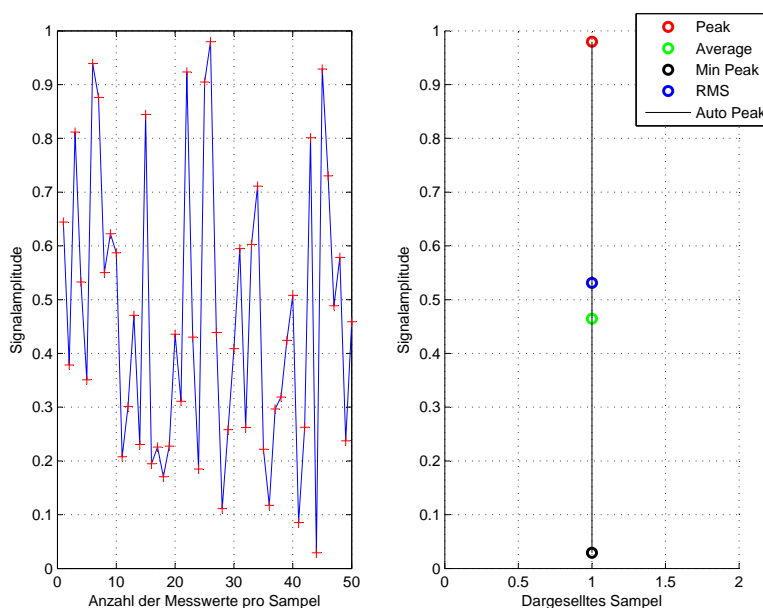


Abbildung 3.6: Gegenüberstellung verschiedener Detektoren

3.3.1 Max-Peak Detektor

Der Max-Peak Detektor ist der einfachste Detektor und für EMV-Messung von besonderer Bedeutung. Der Spitzenwertdetektor zeigt den höchsten Effektivwert der gemessenen Sinusspannung an bzw. stellt das Sampel mit der höchsten Amplitude dar. Somit wird bei einer Messung der "worse case" des Spektrums dargestellt. Wird bei der EMV-Untersuchung festgestellt, dass das EUT mit Max-Peak-Detektor alle Grenzwerte einhält, ist meist die Messung mit dem langsameren QPK-Detektor nicht notwendig.

3.3.2 Average Detektor

Der Mittelwert-Detektor gibt das arithmetische Mittel der Sampels des Signals aus. Dieser Mittelwert wird bestimmt durch nachfolgende Gleichung:

$$X_{AV} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.29)$$

Dabei ist:

X_{AV} : resultierender arithmetische Mittelwert

N : Anzahl der Sampels

x_i : Pegel der Sampels

3.3.3 Root-Mean-Squer Detektor

Der RMS-Detektor ist ähnlich dem Mittelwert-Detektor. Sie unterscheiden sich in der Gewichtung der Sampels. Dies lässt sich an der Gleichung für den RMS-Wert leicht verdeutlichen.

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (3.30)$$

Gleichung 3.30 zeigt, dass die Pegel aller Sampels quadriert, aufsummiert und durch die Anzahl geteilt werden. Weiterhin wird aus diesem Wert noch die Wurzel gezogen. Der konkrete Unterschied ist, dass Sampels mit größerem Pegel eine höhere Gewichtung am Gesamtergebnis erhalten. Somit können Nutzsignale mit breiten spektralen Anteilen, wie DAB, genauer gemessen werden, da Rauschanteile eines Signals weniger gewichtet werden.

3.3.4 Quasi-Peak-Detektor

Der Quasi-Peak-Detektor wird in der CISPR-Norm CISPR 16–1–1 beschrieben. Dieser Detektor besitzt eine Spitzenwertmessung, die durch genau festgelegte Lade- und Entladezeiten einer Kondensator-Hüllkurve bewertet wird. Die Lade- und Entladezeiten des Kondensators sind so gewählt, dass sich der Kondensator zwischen zwei aufeinanderfolgenden Impulsen teilweise entladen kann. Das Ergebnis ist, dass die Anzeige einen Mittelwert in Abhängigkeit der Impulsfolge ausgibt.

Tabelle 3.2: Zeitkonstanten des Quasi-Peak-Detektors nach [CR00]

Frequenzbereich	ZF-Bandbreite	Ladezeit	Entladezeit	Zeitkonstante
9 kHz... 150 kHz	200 Hz	45 ms	500 ms	160 ms
150 kHz... 30 MHz	9 kHz	1 ms	160 ms	160 ms
30 MHz... 300 MHz	120 kHz	1 ms	550 ms	160 ms
300 MHz... 1000 MHz	120 kHz	1 ms	550 ms	160 ms

Diese Bewertung von Pulsfolgefrequenzen hat zur Folge, dass mit steigender Pulsfolgefrequenzen die Ergebnisse der Detektoren AV, RMS sowie QP sich dem Wert des Peak Detektors annähern.

4 Absorberkabine

Die Prüfung eines Gerätes oder Einrichtung bezüglich ihrer elektromagnetischen Verträglichkeit muss in einer definierten Umgebung vorgenommen werden. Dieser Raum muss zwei Anforderungen genügen.

Zum einen muss dieser Raum den Prüfling und die Messeinrichtung vor Fremdstörungen bei Emissionsmessungen schützen, zum anderen muss dieser Raum bei der Überprüfung der Störfestigkeit das Störsignal nach außen dämpfen.

Räume, die diese Kriterien erfüllen, werden als Absorberhallen oder Absorberkabine bezeichnet. Im Englischen ist der Begriff "Anechoic Chamber" geläufig. Dies bedeutet Echo-freier Raum und verdeutlicht gut das Prinzip einer solchen Umgebung.

In diesen Räumen befinden sich Materialien und Körper, die die Stör- und Nutzaussendungen absorbieren, beziehungsweise die Reflexion oder das Echo einer Aussendung unterdrücken. So kann in einer Absorberkabine eine Aussendung auf dem direkten Pfad zwischen Antenne und Prüfling ohne Störungen wie Reflexionen oder Fremdemissionen gemessen werden.

Räume, die lediglich die Anforderung der Abschirmung gegen äußere Signale erfüllen, werden als Schirmkabine bezeichnet.

4.1 Semi - Anechoic - Chamber

Als Semi-Anechoic-Chamber werden Absorberkabinen bezeichnet, die eine reflektierende Bodenfläche, die sogenannte Groundplane besitzen. Die restlichen Oberflächen dieser Absorberkabine sind mit dämpfenden Materialien verkleidet.

Ziel dieser Kabine ist es, die Bedingungen des Freifeldes nachzubilden. Meist wird eine Semi-Anechoic-Chamber für Emissionsmessungen verwendet. Die reflektierende Bodenfläche führt zu destruktiven und konstruktiven Überlagerungen vom direkten und indirekten Pfad.

Das Superpositionsprinzip führt an der Empfangsantenne zur Überhöhung bzw. der Auslöschung des Signals. Hier ist für eine bewertete Messung der sogenannte Höhenscan notwendig. Bei einem Höhenscan werden die Messergebnisse über unterschiedliche Höhen der Empfangsantenne aufgezeichnet. Die unterschiedlichen Höhen verursachen eine Verschiebung des Phasenzentrums an der Empfangsantenne.

Im einfachsten Fall wird als Ergebnis des Höhenscans ein frequenzabhängiges Maximum (konstruktive Überlagerung) sowie ein Minimum (destruktive Überlagerung) zu erkennen sein.

Ein Aufbau einer SAC ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

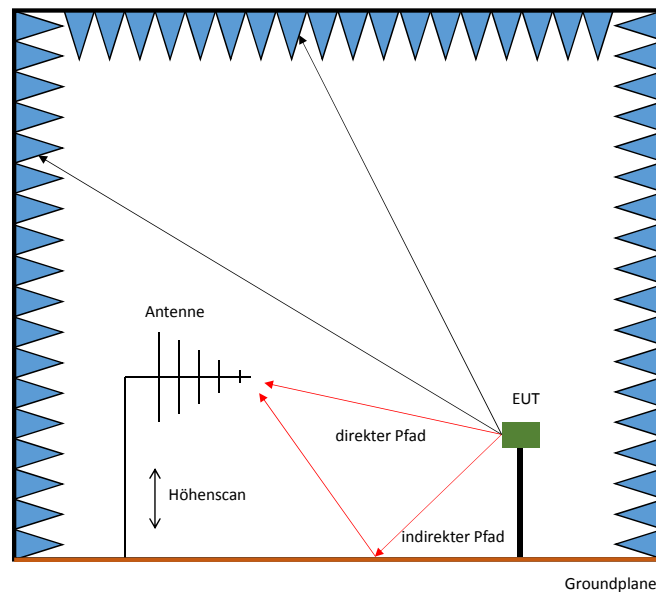


Abbildung 4.1: Schematischer Aufbau einer Semi - Anechoic - Chamber [nach GK15, S. 220]

Im Weiteren wird nicht auf Eigenschaften oder Besonderheiten einer SAC eingegangen, da die Absorberkabine der HAW die Eigenschaften einer FAC erfüllen soll.

4.2 Fully - Anechoic - Chamber

Die zweite Variante einer Absorberkabine ist die Vollabsorberkabine. In dieser Variante der Absorberkabine ist der Boden ebenfalls mit Absorbern ausgekleidet. Ziel solcher Kabinen ist die Simulation einer Freiraumumgebung. Die Freiraumverhältnisse sind sonst nur im Weltall zu finden.

Von Freiraumverhältnissen wird in diesem Fall gesprochen, da sich die elektromagnetische Welle ungehindert ausbreiten kann. Für die Messung in einer Vollabsorberkabine bedeutet dies, dass ausschließlich der direkte Pfad zwischen EUT und Empfangsantenne gemessen wird. Die Reflexionen, die von den Kabinenwänden bzw. der Decke oder des Bodens zur Empfangsantenne gelangen könnten, werden von den dort platzierten Absorbern unterdrückt.

Der größte Unterschied zwischen einer SAC und FAC liegt demzufolge im Ablauf der Messung. Der Betreiber einer FAC benötigt keinen Höhenscan für die bewertete Messung eines Prüflings.

Der Aufbau einer FAC wird in der nachfolgenden Abbildung schematisch dargestellt.

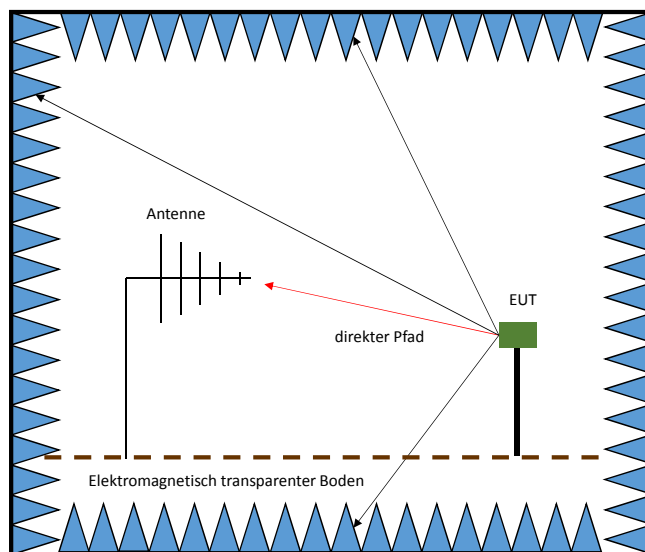


Abbildung 4.2: Schematischer Aufbau einer Full - Anechoic - Chamber [nach GK15, S. 220]

4.3 Absorbermaterialien

In diesem Abschnitt werden die zwei grundlegenden Materialien/ Absorbertypen besprochen, die für die Absorption der elektromagnetischen Welle in der Absorberkabine der HAW verantwortlich sind. Absorber werden an den innen liegenden Wänden einer Absorberhalle angebracht, um so Reflektionsfreiheit zu gewährleisten. Sie bestehen aus Materialien, die die elektrische Energie absorbieren und in Wärme umsetzen.

4.3.1 Ferritkacheln

Für die Absorption elektromagnetischer Wellen, besonders im niedrigen Frequenzbereich, werden sogenannte Ferritkacheln verwendet. Ferritkacheln bestehen aus einem Material mit einer sehr hohen Permeabilitätszahl.

Diese hohe Permeabilitätszahl ist notwendig, um die magnetische Komponente der elektromagnetischen Welle zu bedämpfen. Die Beschaffenheit des Materials sorgt zum einen für die guten Reflexionsdämpfungseigenschaften bereits im niedrigen Frequenzbereich, zum anderen sind diese Absorbertypen meist im hohen Frequenzbereich begrenzt und wirken dort als Reflektoren.

Ferritkacheln werden, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, direkt an die Metallwand der Absorberkabine angebracht.



Abbildung 4.3: Aufbau Ferritkacheln

In der Absorberkabine der HAW wurden an allen innen liegenden Flächen Ferritkacheln angebracht. Durch das hohe Gewicht dieser Absorber ist eine stabile Außenhaut notwendig.

Verbaut wurden Kacheln mit der Typenbezeichnung HSN-1 der Firma GLOBAL EMC UK. In der Tabelle 4.1 befinden sich ausgewählte Eigenschaften dieser Absorber.

Tabelle 4.1: Eigenschaften der Ferritkacheln HSN-1 [nach GLO]

Eigenschaft	Formelzeichen	Wert
Tihckness	-	5,5 mm
Initial Permeability	μ_{iac}	5,000±20 %
Relative loss faktor	$\tan \delta/\mu_{iac}$	$7 \cdot 10^{-6}$ (0,1 MHz)
Remanence	B_S	300 mT

In der nachfolgenden Abbildung ist der Dämpfungsverlauf der Ferritkacheln HSN-1 dargestellt. Die Werte dieser Abbildung wurden aus dem Datenblatt des Herstellers entnommen.

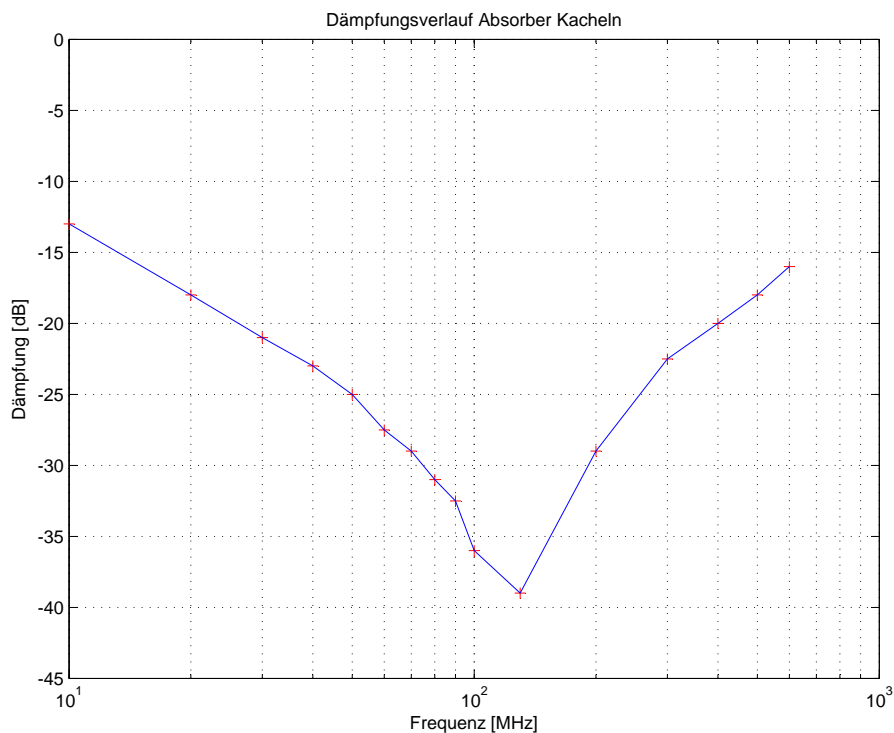


Abbildung 4.4: Dämpfungsverlauf Ferritkacheln [abgelesen aus GLO]

4.3.2 Absorberpyramiden

Zur weiteren Verminderung der Reflexionen innerhalb der Absorberkammer können Absorber in Form einer Pyramide verwendet werden. Dabei kann der Aufbau solcher Absorbertypen variieren. Zum einen kann ein solcher Absorber aus einem mit Graphit versetztem Polyurethanschaum hergestellt sein, zum anderen gibt es Pyramiden, die als Grundgerüst ein Styropor- oder Gipskarton-Trägermaterial aufweisen, diese Pyramiden sind mit Folie überzogen oder mit einer Kohlenstoff-Latexfarbe bestrichen. Absorberpyramiden dämpfen die elektromagnetische Welle auf zwei Wegen.

In erster Linie wird die Energie im Material durch Mehrfachreflexion der einlaufenden Welle aufgenommen. Wobei an jedem Reflexionspunkt die Intensität der elektromagnetische Welle abnimmt. Der zweite Aspekt der zur Reduzierung der Reflexion führt, ist die Verlängerung des zurückgelegten Weges der elektromagnetischen Welle. Die Form dieser Absorber bewirkt einen kontinuierlichen Impedanzübergang und somit eine breitbandige Anpassung an die elektromagnetische Welle.

Ein wichtiger Punkt, der bei der Beschaffung von Absorbern berücksichtigt werden muss, ist die Brennbarkeit. Da die Energie der elektromagnetische Welle sich innerhalb der Absorber in Wärme umsetzt, besteht grundsätzlich die Gefahr der Überhitzung.

In der nachfolgenden Abbildung wird der Dämpfungsverlauf der verwendeten Pyramidenabsorber EPP 32 dargestellt.

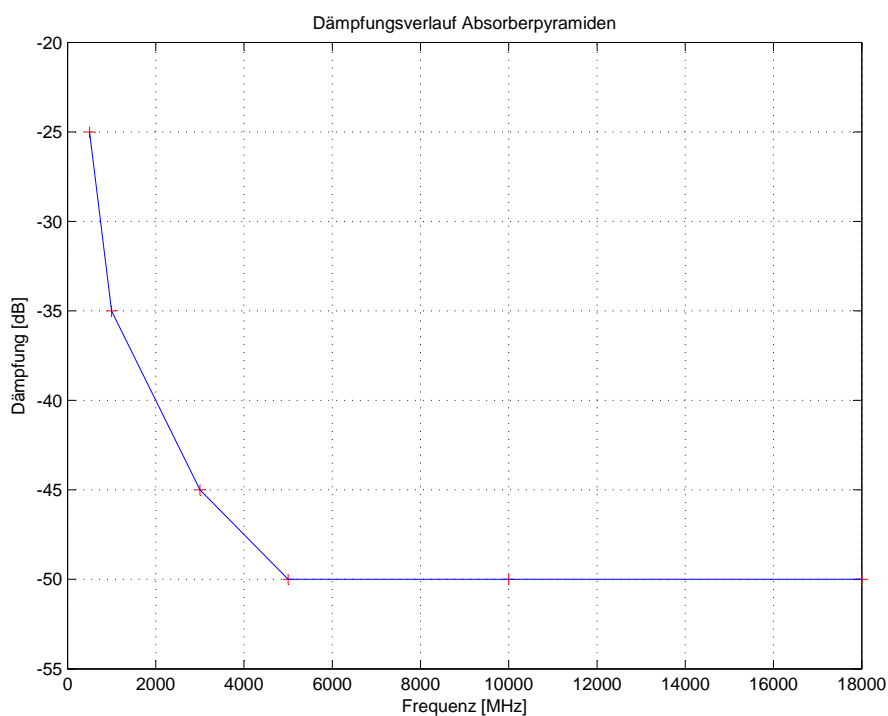


Abbildung 4.5: Dämpfungsverlauf Absorberpyramiden

Der übliche Aufbau von Pyramidenabsorbern ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

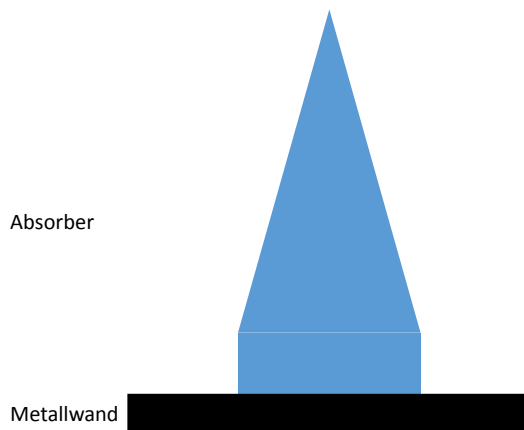


Abbildung 4.6: Montage von Pyramidenabsorbern

Die verwendeten Absorber besitzen eine Grundfläche von 50 cm x 50 cm und sind auf die Ferritkacheln HSN-1 vom Hersteller ausgemessen. Der kombinierte Aufbau von Ferritkachel und Pyramidenabsorber an der Wand der Absorberkabine wird in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

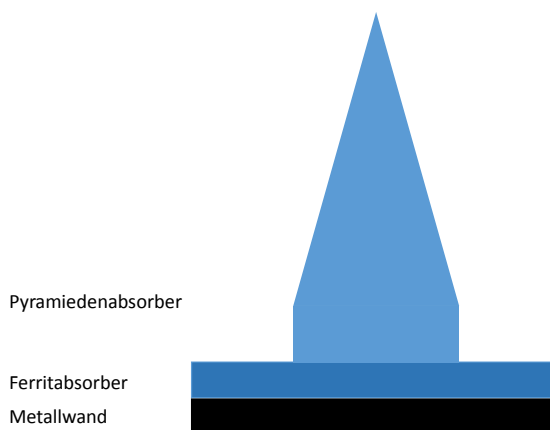


Abbildung 4.7: Aufbau Pyramiden und Ferritabsorber an Kabinenwand

4.4 Aufbau der Absorberkabine der HAW Hamburg

Im Folgenden wird der Aufbau der Absorberkabine der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg dargestellt. Dies ist eine Momentaufnahme, die während der Bearbeitung dieser Abschlussarbeit entstanden ist.

Die Absorberkabine beinhaltet die Charakteristiken einer Vollabsorberkabine. Es befinden sich an allen Kabinenwänden sowie an der Decke und auf dem Boden Ferritkacheln, die die elektromagnetischen Wellen bis 400 MHz absorbieren.

Zusätzlich befinden sich Pyramidenabsorber auf den Ferritkacheln. Wie oben beschrieben, hat der Hersteller der Ferritkacheln die Absorber EPP32 speziell für die Kacheln HSN-1 eingemessen und die Kombination der Absorber abgestimmt.

4.4.1 Platzierung des Absorbermaterials

Die Absorberkabine der HAW ist, wie oben beschrieben, komplett mit Ferritkacheln ausgekleidet. Partuell wurde die Absorberkabine mit zusätzlichen Pyramidenabsorber ausgestattet. Diese befinden sich an der Rückwand und Stirnseite der Absorberkabine.

In der Norm DIN EN 61000-4-3 wird darauf hingewiesen, dass bei Bedarf Absorberelemente auf dem Boden zwischen Prüfort und Antenne aufgestellt werden können. Diese Absorber dienen zur Verringerung der Bodenreflexion. Dem Vorschlag der Norm folgend wurde auf dem Boden Absorber des Typs EPP32 verlegt. Weiterhin wurde an den Wänden und der Decke Absorber ausgelegt, um Reflexionen an den Seitenwänden sowie der Decke zu reduzieren.

Eine schematische Darstellung der montierten Absorbern sowie der Anordnung von Kabeldurchführungen Antenne und Drehtisch ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

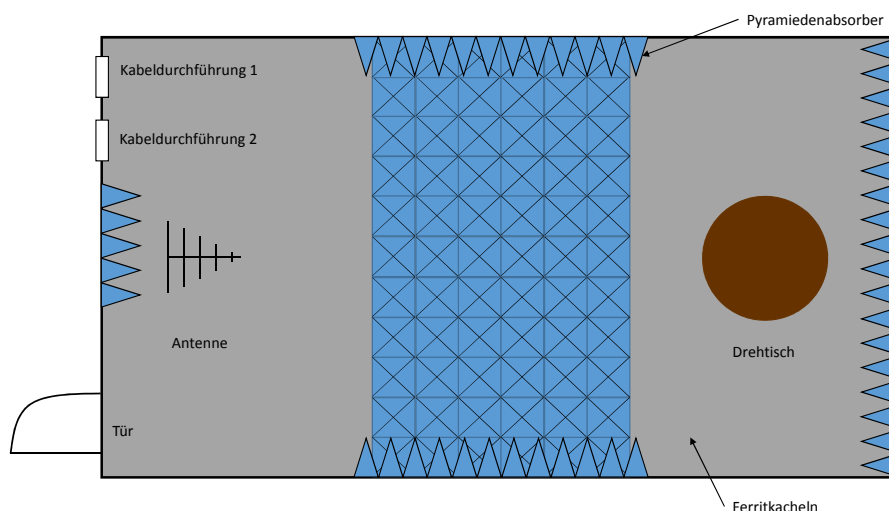


Abbildung 4.8: Schematische Platzierung des Absorbermaterials und Schirmöffnungen in der Absorberkabine der HAW

4.4.2 Öffnungen in der Schirmung

Wie in Abbildung 4.8 zu sehen, wird an drei Stellen die Schirmung der Kabine durch Öffnungen unterbrochen. Der Bau einer Absorberkabine ohne Öffnungen ist nicht möglich. Eine Öffnung zum Positionieren des Prüflings ist in jedem Fall notwendig. Weiterhin werden Unterbrechungen in der Schirmung für die Durchführung von Mess- bzw. Steuerungssignalen benötigt. Öffnungen der Schirmung sind so konzipiert, dass sie einen möglichst geringen Einfluss auf die Schirmungsdämpfung sowie die Ausbreitung des elektromagnetischen Feldes innerhalb der Absorberkabine ausüben.

Türöffnungen sind so konzipiert, dass sich beim Schließen der Tür Federkontakte mit der Schirmung der Kabine verbinden und so eine weitestgehende homogene Schirmung bilden. Bei der Durchführung von Mess- und Steuerungssignalen muss zwischen optischen und elektrischen Signalen unterschieden werden.

Für die Durchführung von optischen Signalen können sogenannte Wabenkamineinsätze verwendet werden. Wabenkamineinsätze sind gebündelte Hohlleiter, bei denen die Cut-Off-Frequenz von Hohlleitern die gewünschte Schirmung bewirkt.

Für die Durchführung elektrischer Signale sollten Filter verwendet werden, um auszuschließen, dass Störgrößen über die Leitung in die Absorberkabine eindringen können.

4.4.3 Messkette

In diesem Abschnitt wird der Signalweg einer Störemissionsmessung beschrieben.

Bei Messungen der Störstrahlung wird vom Prüfling ein Spektrum abgestrahlt, das über die Luftschnittstelle vom Messwandler, in diesem Fall die Antenne HL562e, aufgenommen wird. Das Signal liegt nun als Spannungswert vor und wird über Koaxialleitungen dem Messempfänger zugeführt. Der Messempfänger kann dieses Signal filtern, verstärken und bewerten. Über die Fernsteuerung des Empfängers wird das gemessene Signal an den Computer mit der Software EMC32 übergeben.

Um aus dieser gemessenen Spannung in eine Feldstärke umrechnen zu können, wird das Wandlungsmaß der Antenne benötigt. Dieses wird auch als Antennenfaktor bezeichnet und mit dB(1/m) angegeben. Die Umwandlung wird nun mit nachfolgender Gleichung nach [GK15, S.179] berechnet.

$$\frac{E}{dB(\mu V/m)} = \frac{U}{dB(\mu V)} + \frac{AF}{dB(1/m)} \quad (4.1)$$

Ist der Antennenfaktor nicht bekannt, so wird vom Empfänger bzw. dem Steuerprogramm nur die an der Antenne induzierte Spannung angezeigt. Sollten hier Unterschiede zwischen ESR und EMC32 auftreten ist darauf zu achten, ob ein Feldstärke- oder Spannungswert angezeigt wird.

Weiterhin müssen für die korrekte Feldstärke die frequenzabhängige Dämpfung der Koaxialleitungen und Übergänge bekannt sein. Für den Aufbau der HAW Absorberkabine wurden die Dämpfungskorrekturwerte in den verschiedenen Tabellen der Steuersoftware EMC32 hinterlegt. Ausgemessen sind die Korrekturwerte mit dem Vektor-Netzwerkanalysator ZNB20.

Die schematische Messkette der HAW Absorberkabine ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

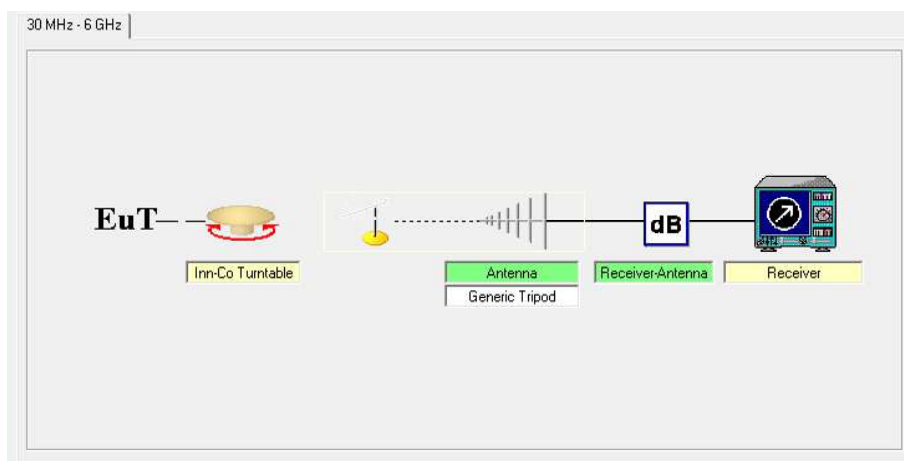


Abbildung 4.9: EMC32 Software: Messkette der Absorberkabine der HAW

4.4.4 Sendekette

Die Beschreibung der Sendekette ist um einiges umfangreicher, da hier die Signale erzeugt, verstärkt und überwacht werden müssen. In Abbildung 4.10 ist der Ablauf einer Störfestigkeitsbetrachtung dargestellt.

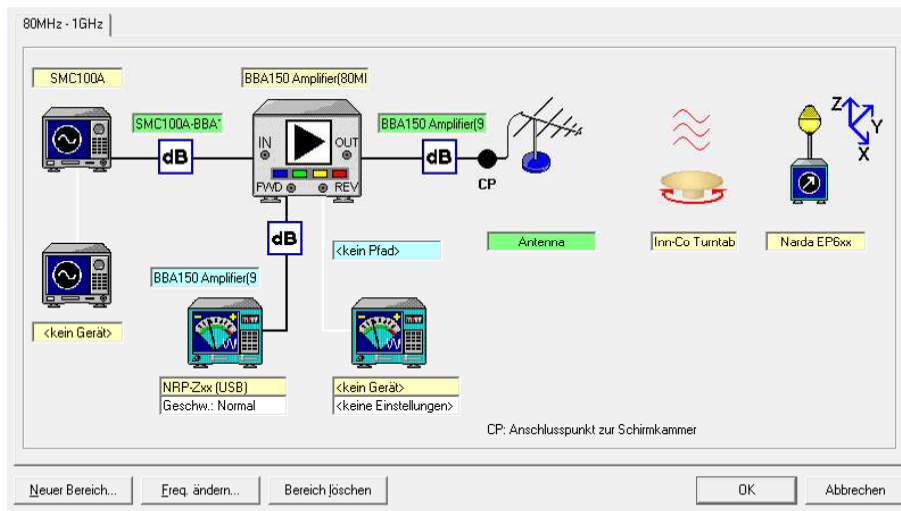


Abbildung 4.10: EMC32 Software: Sendekette der Absorberkabine der HAW

Herz der Sendekette ist der Signalgenerator SMC100A. Dieser erzeugt die gewünschten Prüfsignale mit einer maximalen Ausgangsleistung von 20 dBm, was einer Leistung von 100 mW entspricht. Für die Erzeugung der Feldstärken, wie sie in den Normen beschrieben werden, zum Beispiel 3 V/m, wird ein Verstärker benötigt. Dem Prüfer stehen zur Zeit zwei Verstärker zur Verfügung. Die Verstärker unterscheiden sich im Bereich der Betriebsfrequenz sowie der Verstärkerleistung. Details zu diesen Geräten sind der Tabelle A.2 im Anhang A.4 zu entnehmen.

Die Überwachung der Verstärkerausgangsleistung wird über den Tastkopf NRP-Z81 realisiert. Die maximale Eingangsleistung des Tastkopfes von 100 mW verhindert das Messen der Leistung direkt am Ausgang des Verstärkers. Im Verstärker ist ein Richtkoppler verbaut, der es ermöglicht, die Vorwärtsleistung sowie die reflektierte Leistung über die Anschlüsse FWD sowie RWD zu messen.

Für die Regelung sowie die Dokumentation ist die Vorwärtsleistung während der Messung von Bedeutung. Das verstärkte Prüfsignal wird an den Fußpunkt der Sendeanenne geführt. Über die Feldsonde PMM EP601 wird die erzeugte Feldstärke in der Absorberkabine eingestellt und überwacht.

Um für eine konstante Feldstärke am Ort des Prüflings zu sorgen, regelt das Messprogramm die Eigenschaften wie Frequenz, Leistung oder Verstärkung. Dem Prüfer ist es möglich ein Vertrauensintervall einzustellen, der die Abweichung der Sollfeldstärke definiert.

Die Steuerung der Geräte sowie das Auslesen von Messwerten wird über den Computer mit der Messsoftware realisiert.

4.4.5 Störaussendung in der Absorberkabine

Im Rahmen der ersten Inbetriebnahme der Absorberkabine wurden bei geschlossener Tür Störaussendungen im Bereich 30 MHz bis 80 MHz festgestellt. Abbildung 4.11 zeigt die aufgenommene Störaussendung.

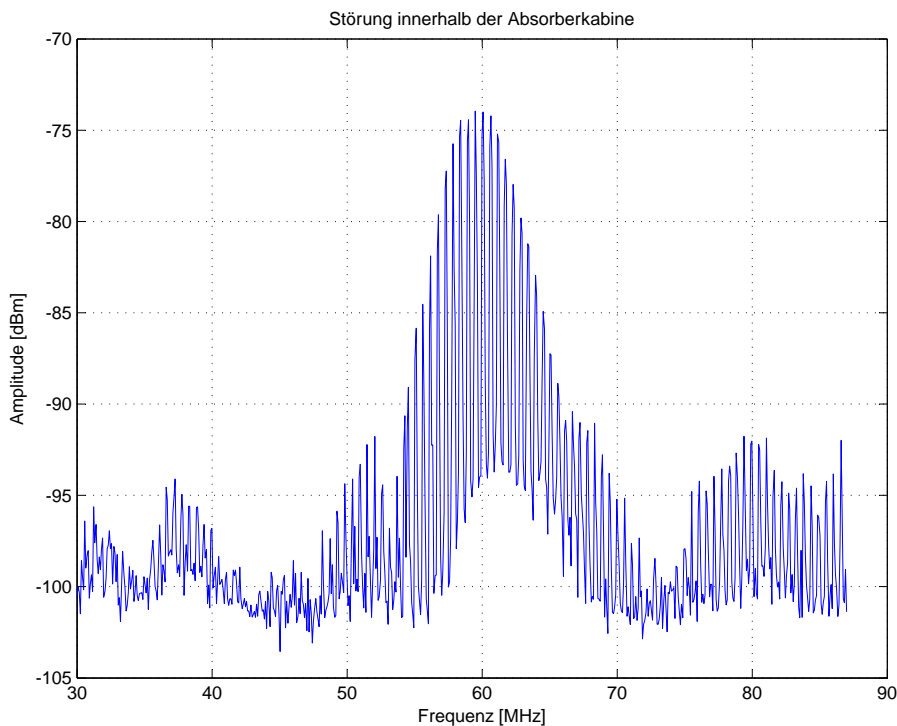


Abbildung 4.11: Störaussendung in der EMV-Kabine, Frequenzbereich

Aufgenommen wurde die Störung mit Antenne Nr. 4 aus Tabelle A.1 und dem Spektrumanalysator ESR. Für die genauere Lokalisierung der Störung wurde die Tür der EMV-Kabine geöffnet. Das Unterbrechen der Schirmung bewirkte keine Amplitudenänderung des Störspektrums. Demzufolge befindet sich die Quelle der Störung innerhalb der EMV-Kabine. Für eine genauere Bewertung der Störung wurde das Signal im Zeitbereich untersucht. Die folgenden Abbildung zeigt die Störung im Zeitbereich.

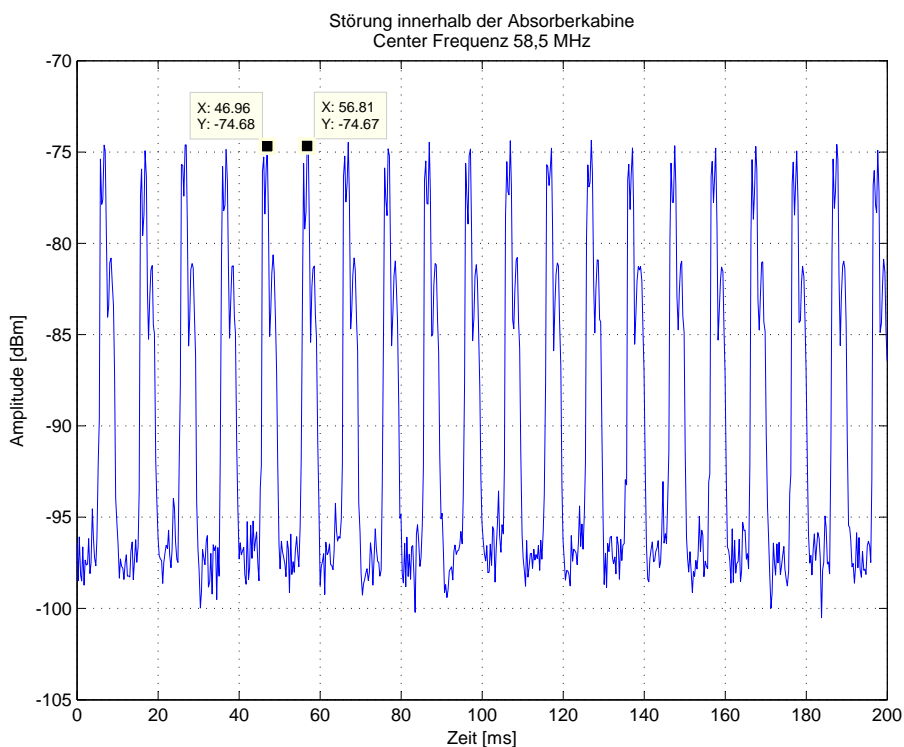


Abbildung 4.12: Störaussendung in der EMV-Kabine, Zeitbereich

In Abbildung 4.12 ist zu sehen, dass sich die Störung periodisch wiederholt. Mit folgender Gleichung wird der Zusammenhang zwischen Zeit und Frequenz gebildet.

$$f = \frac{1}{T} \quad (4.2)$$

Dabei ist

- f: Frequenz [Hz]
- T: Periodendauer [s]

Mit dieser Gleichung erhält man einen weiteren Ansatz für die Ursachensuche. Mit der Periodendauer 9,8 ms ergibt sich nach Gleichung 4.2 eine Frequenz von 101,5228 Hz. Dies entspricht der doppelten Netzfrequenz, die beim Gleichrichten der Netzfrequenz entsteht.

Abschaltversuche in der Absorberkabine zeigten, dass bei der Abschaltung der FI-Sicherung "Notbeleuchtung" die Störquelle beseitigt wird. Abbildung 4.13 zeigt die Messung mit HL562e in der Absorberkabine ohne Notbeleuchtung.

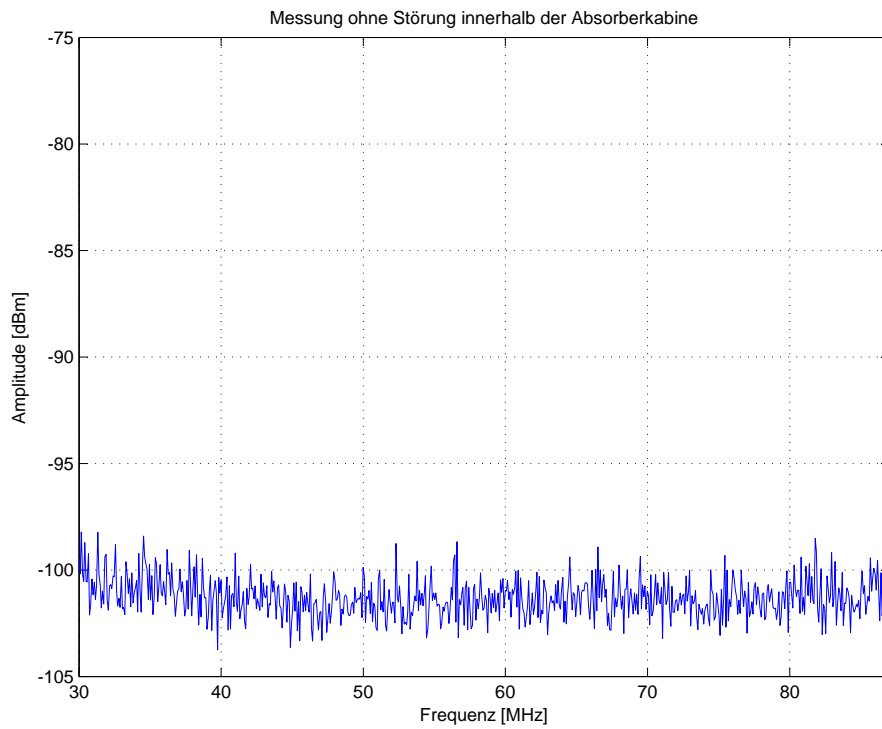


Abbildung 4.13: Abschaltung der Störquelle

Für weitere Messungen innerhalb der Absorberkabine ist darauf zu achten, dass die Notbeleuchtung vom Netz getrennt ist. Eine weitere Maßnahme zur Störungsbeseitigung ist das Instandsetzen der Notbeleuchtung.

5 Validierung EMV-Kabine

In diesem Abschnitt werden die gängigen Methoden und Normen beschrieben, die für die Inbetriebnahme einer Absorberkabine nötig sind. Es wird erläutert, wie die Messungen ausgeführt und bewertet wurden. Weiterhin werden die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse der Validierung der EMV-Vollabsorberkabine der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg dargelegt.

Die Validierung beinhaltet unter anderem die folgende Prüfkriterien. Zum Einen die Eigenschaft Signale von innen und nach Außen zu unterdrücken, zum anderen wird die Validierung der Messkette dargestellt. Im Weiteren wird beschrieben, ob die Sendekette in der Lage ist, einen gleichförmigen Feldbereich innerhalb der Absorberkabine zu erzeugen. Weiterhin werden die Messplatzdämpfung sowie die Messunsicherheit beschrieben.

5.1 Schirmdämpfungsmessung

Wie in Abschnitt 4 bereits erwähnt, ist eine wichtige Eigenschaft einer Absorberkabine, die in der Kabine erzeugten Signale nach außen abzuschirmen und äußere Einflüsse von der Messtechnik und den Prüflingen zu schützen. Ausgedrückt wird dies im Parameter des Schirmdämpfungsmaßes.

Die Schirmung besteht im Grunde aus zwei Bestandteilen: der äußeren Schirmung, die durch die metallische Außenseite der Kabine realisiert wird sowie den Absorbermaterialien, die sich im inneren der Absorberkabine befinden und erzeugte Signale dämpfen.

“Die äußere Schirmung wird erreicht durch eine metallisch leitfähige Hülle. Gefalzte Bleche werden mit dünnem Kupfergeflecht als (Hochfrequenz-)Dichtungsmaterial mit äquidistanten und mit gleicher Kraft angezogenen Schrauben verbunden, um den für die Schirmwirkung verantwortlichen Ausgleichsströmen ein gleichmäßigen Impedanzbelag über der gesamten Schirmoberfläche zu schaffen.”[GK15, Kapitel 6.5.1 Seite 217]

Wirkt ein äußeres Feld auf diese Flächen ein, so wird ein exakt entgegengesetztes Feld aufgebaut, welches so zur Neutralisation des Erregerfeldes führt. Die Wirkung der Schirmung ist somit frequenzabhängig. Im niederfrequenten Bereich sind die magnetischen Felder nur schwer zu schirmen, da magnetische Gleichfelder keine Wirbelströme induzieren.

Für die Schirmung dieser Felder müssen Materialien verwendet werden, die eine hohe Permeabilitätszahl aufweisen. Üblicherweise werden für die Schirmung im niederfrequenten Bereich Ferritkacheln verwendet, welche die Energie in Wärme umwandeln. Im hochfrequenten Bereich entsteht aus den Kapazitäts- und Induktivitätsbelag ein Schwingkreis, der bei Resonanz den Wandwiderstand reduziert und so die Schirmeigenschaften der Absorberhalle negativ beeinflusst.

Abbildung 5.1 zeigt die typischen, frequenzabhängigen Schirmwirkungen, aufgeteilt auf das elektrische und magnetische Feld.

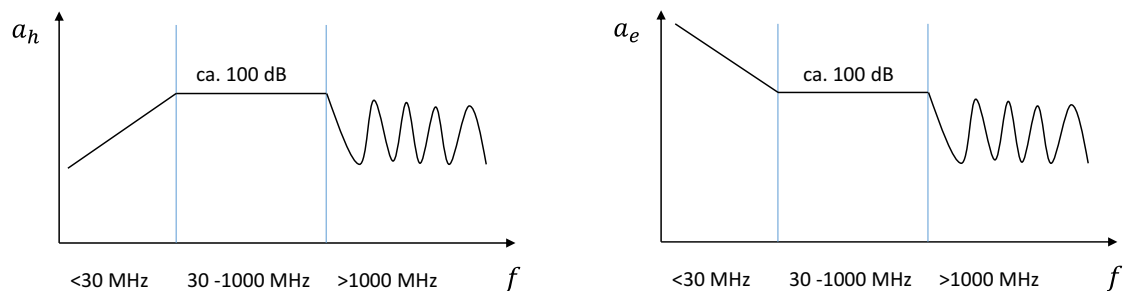


Abbildung 5.1: Darstellung der Schirmwirkung über den Frequenzbereich [GK15, Kapitel 6.5.1 Seite 218]

5.1.1 Normative Grundlage der Schirmdämpfung

Die Messung der Schirmdämpfung wurde auf Grundlage der Europäischen Norm 50147-1 vom März 1996 (EN 50147-1:1996) durchgeführt. Der Anwendungsbereich dieser Norm beginnt bei 9 kHz und endet bei 40 GHz. Der Parameter der Schirmdämpfung wird angegeben durch:

$$a_{S_E} = 20 \cdot \log(E_0/E_1) \quad (5.1)$$

$$a_{S_H} = 20 \cdot \log(H_0/H_1) \quad (5.2)$$

Dabei ist:

- a_{S_E}/a_{S_H} : Schirmdämpfung [dB]
- H_0/E_0 : Bezugsfeldstärken ohne Schirmung [V(1/m)]
- H_1/E_1 : Bezugsfeldstärken mit Schirmung [V(1/m)]

5.1.2 Messung der Schirmdämpfung

Die in 5.1 und 5.2 beschriebenen Gleichungen beziehen sich auf eine absolute Feldstärke. Die folgenden Messergebnisse beziehen sich auf eine relative Feldstärke mit dem Bezug auf $1 \mu\text{V}$. Weiterhin wurden die Antennenfaktoren der Sende- und Empfangsantenne nicht in die Betrachtung mit einbezogen. Somit ändern sich Gleichungen zur Bestimmung der Schirmdämpfung zu

$$a_{S_{EdB}} = E_{0dB} - E_{1dB} \quad (5.3)$$

$$a_{S_{HdB}} = H_{0dB} - H_{1dB} \quad (5.4)$$

Dabei ist:

- $a_{S_{EdB}}/a_{S_{HdB}}$: Schirmdämpfung [dB]
- H_{0dB}/E_{0dB} : Bezugsfeldstärken ohne Schirmung [dB μV]
- H_{1dB}/E_{1dB} : Bezugsfeldstärken mit Schirmung [dB μV]

Der Aufbau der Messung wurde wie in Abbildung 5.2 dargestellt durchgeführt.

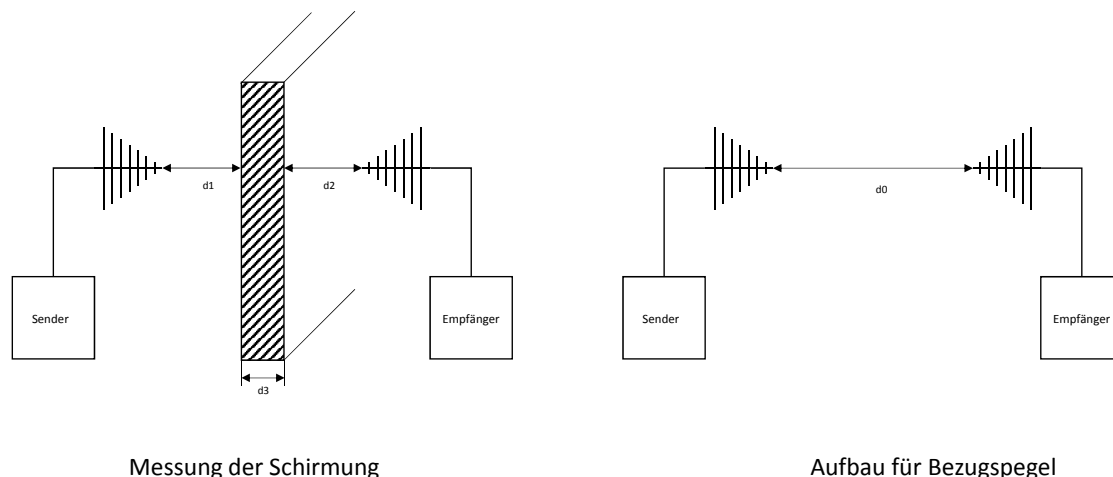


Abbildung 5.2: Messaufbau zur Validierung des Schirmungsmaßes

Im Inneren der Absorberkabine befinden sich die Sendeantenne sowie die Sendeeinrichtung, bestehend aus Signalgenerator und Verstärker. Außerhalb der Kabine befindet sich die Empfängereinrichtung mit Spektrumanalysator und Empfangsantenne. Die Ermittlung der Bezugsfeldstärken (E_0/H_0) wird ohne Hindernisse zwischen Sende- und Empfangsantenne durchgeführt. Die Distanz der Antennen zueinander muss so abgestimmt sein, dass die Abmessung der Kabinenschirmung berücksichtigt ist. Dies, bedeutet

$$d_0 = d_1 + d_2 + d_3 \quad (5.5)$$

Dabei ist:

- d_0 : Abstand zwischen Sende- und Empfangsantenne [m]
- d_1 : Abstand zwischen Sendeantenne und Kabinenwand [m]
- d_2 : Abstand zwischen Empfangsantenne und Kabinenwand [m]
- d_3 : Dicke der Kabinenwand [m]

Sobald die Bezugsfeldstärken ermittelt wurden, wird zwischen dem Übertragungsweg der Sende- und Empfangsantenne die Schirmung eingefügt. Anschließend werden auf allen zuvor festgehaltenen Frequenzen Feldstärkemessungen durchgeführt. Diese Ergebnisse werden in Gleichung 5.3 und 5.4 eingefügt. Das Ergebnis gibt die Schirmdämpfung der Messkabine wieder.

Bemerkung Das Aussenden von HF-Signalen ist in der Bundesrepublik Deutschland durch das Telekommunikationsgesetz geregelt. Es ist bei der Messung darauf zu achten, dass keine Funkanwendungen gestört und Grenzwerte verletzt werden.

5.1.3 Ergebnisse

In den nachfolgenden Tabelle ist das Ergebnis sowie die Auswertung der Schirmdämpfungsmessung hinterlegt. Die dort angegebenen Werte zeigen die Bezugfeldstärke mit und ohne Schirmung sowie die daraus resultierende Differenz.

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Schirmdämpfungsmessung mit Antenne 4 und 5 aus A.3 und Verstärker 2 aus Geräteliste A.4

Frequenz [MHz]	E_{0dB} [dB μ V]	E_{1dB} [dB μ V]	Differenz [dB]
230	119,81	14,67	105,14
310	123,53	14,06	109,47
350	119,02	12,77	106,25
407	121,38	6,26	115,12
505	118,70	8,77	109,93
555	116,82	12,14	104,72
602	116,68	16,35	100,33
658	117,02	15,86	101,16
700	112,78	9,45	103,33
722	114,79	15,16	99,63
788	112,94	9,53	103,41
875	112,03	13,33	98,70
977	113,29	11,47	101,82
1000	114,21	22,40	91,81

Die Antennen 4 und 5 sind bis zu einer Frequenz von 230 bis 1000 MHz kalibriert. Für die Messung der Schirmungsdämpfung für einen größeren Frequenzbereich sind somit weitere Antennen notwendig. Hierfür stehen dem Labor die Antennen 1 und 3 aus der Antennenliste A.3 zur Verfügung. Die Ergebnisse dieser Messung befinden sich in Tabelle 5.2 und vervollständigen den Frequenzbereich von 80 bis 1000 MHz.

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Schirmdämpfungsmessung mit Antenne 1 und 3 aus A.3 sowie Verstärker 2 aus Geräteliste A.4

Frequenz [MHz]	E_{0dB} [dB μ V]	E_{1dB} [dB μ V]	Differenz [dB]
80	128,04	21,22	106,82
165	138,36	29,50	108,86

Die Ergebnisse der Bestimmung der Schirmdämpfung werden in Abbildung 5.3 grafisch dargestellt.

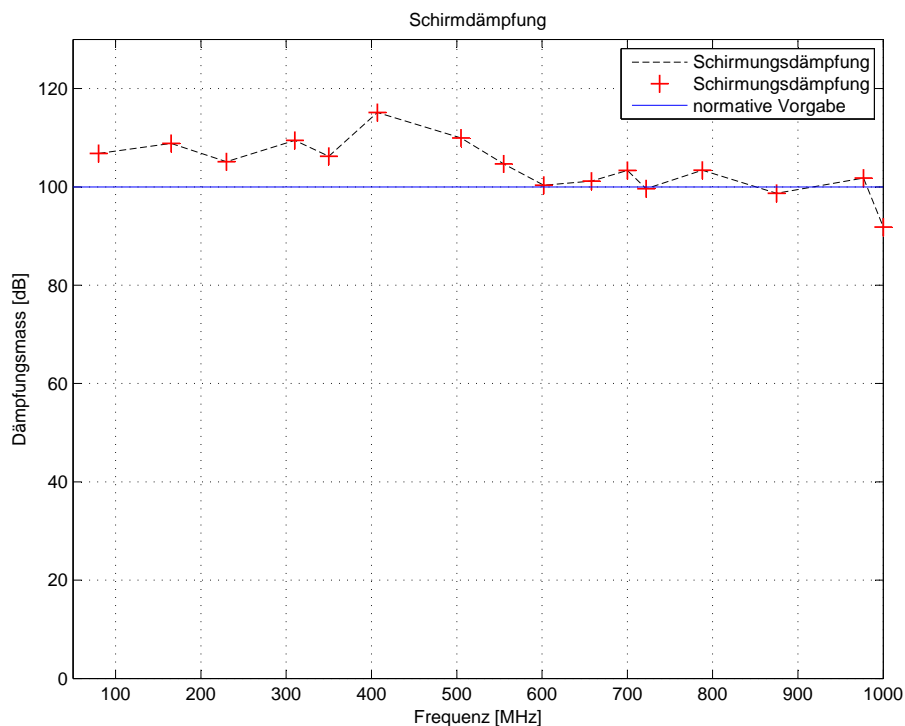


Abbildung 5.3: Zusammenfassung der Schirmdämpfungsmessung

5.1.4 Fazit

Die Messung wurde wie in der Norm DIN EN 50147 beschrieben durchgeführt. Im Inneren der Absorberkabine befanden sich die Sendeeinrichtung mit Signalgenerator, Verstärker sowie Sendeantenne. Außerhalb wurde die Feldstärke mit Empfangsantenne und Spektrumanalysator aufgenommen. Die für den Bezug notwendigen Feldstärkemessungen wurde bei gleichem Abstand ohne Hindernisse auf der Übertragungsstrecke durchgeführt.

Als Richtwert für den Frequenzbereich von 10 MHz bis ca. 2 GHz gibt die Norm DIN EN 50147 eine Schirmdämpfung von 100 dB an.

Die Zusammenfassung der Schirmdämpfungsmessung wurde in Abbildung 5.3 dargestellt. Aus Tabelle 5.1 geht hervor, dass drei Frequenzen den Richtwert von 100 dB nicht erreichen. Die Abweichungen in den genannten Frequenzen weichen von 0,37 dB bis 8,19 dB vom Grenzwert ab.

5.2 Validierung des Empfangswegs

In diesem Abschnitt wird die Eignung des Empfangsweges für die Messung von Störfeldstärken untersucht.

Eine normative Vorgabe des Empfangsweges ist nicht bekannt. An dieser Stelle wird über eine definierte Feldstärkeaussendung der Messwert der Empfangseinrichtung rechnerisch überprüft. Die Überprüfung des Empfangsweges ist notwendig, um Schwachstellen im Aufbau der Messkette zu erfassen. Schwachstellen können an jedem Übergang sowie jeder Leitung vorkommen. Aus diesem Grunde sollte im Zuge einer Qualitätssicherung eine Überprüfung der Messkette regelmäßig durchgeführt werden.

Der Empfangsweg wurde mittels zwei Verfahren verifiziert. Zunächst wurde innerhalb der Absorberkabine ein definiertes Signal erzeugt, welches von der Messkette erfasst wurde. Weiterhin wurde mit dem Messlabor der Bundesnetzagentur, in Kolberg ein Vergleich der Empfangsfeldstärken vorgenommen.

5.2.1 Überprüfung mittels Einzelträger

Die rechnerische Validierung des Empfangsweges wurde mittels einzelner Frequenzmessungen innerhalb der Absorberkabine durchgeführt. Hierfür wurde im Inneren der Kabine eine Sendeanlage mit dem Signalgenerator SMC100A, Verstärker BBA150 und der Antenne HL223 aufgebaut. Mit dieser Einrichtung ist es möglich, ein definiertes Ausgangssignal zu erzeugen. Die von einer logarithmisch-periodischen Dipolantenne abgestrahlte Feldstärke wird von der Messantenne HL562e aufgenommen und wie in Abbildung 4.9 dem Spektrumanalysator ESR zugeführt.

Die Berechnung der zu erwartenden Feldstärke kann mittels Fernfeldformel erfolgen. Im ersten Schritt muss die von der Sendeanlage abgestrahlte, äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP) berechnet werden. Die äquivalente isotrope Strahlungsleistung wird verwendet, um die weiteren Berechnungen zu vereinfachen.

Besitzen Antennen eine Richtwirkung, kann die abgestrahlte Leistung nicht ohne weiteres auf die Fläche einer Kugel projiziert werden. Die äquivalente isotrope Strahlungsleistung gibt nun an, mit welcher Sendeleistung eine isotrope Antenne gespeist werden muss, um die selbe Leistungsflussdichte auf der Kugeloberfläche zu erreichen.

Im Allgemeinen wird die EIRP einer Sendeanlage wie folgt berechnet:

$$EIRP_{dBm} = G_i + P_s \quad (5.6)$$

Dabei ist:

G_i : Gewinn Sendeantenne [dBi]

P_s Sendeleistung [dBm]

Im Abschnitt 3.2.2 wurde bereits mittels der Gleichung 3.26 und 3.28 auf die Wegabhängigkeit der Feldstärke sowie Leistungsflussdichte eingegangen. In diesen drei Gleichungen befinden sich alle Informationen, um die Feldstärke am Empfangsort zu berechnen. Eine Abschätzung der empfangenen Feldstärke ist jedoch nur gültig, wenn sich die Empfangseinrichtung innerhalb der Hauptstrahlrichtung der Sendeantenne befindet.

Weiterhin könnte Fading eine Auslöschung bzw. Überhöhung der Feldstärke verursachen. Da die Messung in der Absorberkabine durchgeführt wurde, wird im Weiteren von einer Umgebung ausgegangen, die frei von Reflexionen ist.

Im folgenden Beispiel soll die Validierung des Empfangsweges dargestellt werden. Die Ausgangsdaten der Beispielrechnung sind in folgender Tabelle aufgelistet.

Tabelle 5.3: Ausgangsdaten für die Validierung des Empfangsweges

Eigenschaft	Wert	Einheit
Frequenz	650	MHz
Distanz	3	m
Ausgangsleistung	0	dBm
Gewinn Sendeantenne	6,8	dBi

Zunächst wird die Strahlungsleistung, wie in Gleichung 5.6 beschrieben berechnet.

$$EIRP_{dBm} = G_i + P_s = 6,8 \text{ dBi} + 0 \text{ dBm} = 6,8 \text{ dBm}$$

Die Feldstärkeberechnung erfolgt anschließend analog zu dem im [Bun] beschriebenen Verfahren. Dies bedeutet im Einzelnen, dass Gleichsetzen der Gleichungen 3.18 mit 3.27. Daraus folgt:

$$\frac{E^2}{Z_0} = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \tag{5.7}$$

Gleichung 5.7 Umgestellt zur Berechnung der Feldstärke ergibt:

$$E = \sqrt{\frac{EIRP \cdot Z_0}{4 \cdot \pi \cdot r^2}} = \sqrt{\frac{EIRP \cdot 120 \cdot \pi}{4 \cdot \pi \cdot r^2}} = \frac{\sqrt{30} \cdot \sqrt{EIRP}}{r} \tag{5.8}$$

Die nun ermittelte Feldstärke besitzt die Einheit V/m. Die Umwandlung in die üblichere Einheit dBµV(1/m) wird wie folgt durchgeführt.

$$E_{dB} = 20 \cdot \log \left(\frac{E}{1 \text{ mV}} \right) + 120 \tag{5.9}$$

Angewendet auf das obige Beispiel ergibt:

$$E_{dB} = 20 \cdot \log \left(\frac{\frac{\sqrt{30} \cdot \sqrt{0,00479 \text{ W}}}{3 \text{ m}}}{1 \text{ mV}} \right) + 120 = 102,03 \text{ dB}\mu\text{V} (1/\text{m}) \tag{5.10}$$

Bei dieser Frequenz wurde eine Feldstärke von 101,18 dBµV(1/m) gemessen. Die Differenz zwischen errechnetem und gemessenem Wert beträgt in diesem Beispiel weniger als 1 dB. Eine Übersicht sowie die Gegenüberstellung der Messwerte zu rechnerischen Werten sind in folgender Tabelle aufgeführt. Die Feldstärken wurden jeweils mit einer Signalgeneratorausgangsleistung von 0 dBm sowie einem Abstand zur Empfangsantenne von 3 m erzeugt.

Ein weiterer Weg zur Ermittlung der Feldstärke am Messort ist die Berücksichtigung der Freiraumdämpfung. Die Berücksichtigung der Freiraumdämpfung hat den Nachteil, dass die Dämpfung auf dem Übertragungsweg von der Wellenlänge abhängig ist.

Wie oben beschrieben, wurde in dem verwendeten Verfahren die Leistungsflussdichte

auf eine Kugeloberfläche abgebildet. Die Berechnung der Feldstärke am Empfangsort erfolgt somit über die Leistung, deren Bezug der isotrope Kugelstrahler darstellt.

Tabelle 5.4: Validierungsergebnisse des Empfangsweges

Frequenz [MHz]	Feldstärke [dB μ V(1/m)]		Differenz [dB]
	gemessen	errechnet	
200	101,1	101,73	0,63
250	98,3	102,13	3,83
266	97,69	102,13	4,44
300	99,1	102,23	3,13
350	102	102,13	0,13
400	100,4	101,93	1,53
450	98,64	102,03	3,39
500	98,8	102,03	3,23
550	99,28	102,23	2,95
600	101,4	102,03	0,63
650	101,18	102,03	0,85
700	100,76	101,53	0,77
750	100,93	102,23	1,30
800	100,36	102,33	1,97
850	100,15	101,93	1,78
900	100,25	102,03	1,78
950	100,26	102,83	2,57
1000	100,64	102,43	1,79

Tabelle 5.4 zeigt, dass im Bereich um 200 bis 300 MHz die größten Abweichungen zwischen gemessener und errechneter Feldstärke liegen. Die größte Abweichung mit 4,44 dB wurde bei einer Frequenz von 266 MHz ermittelt. Die Frequenz mit der geringsten Abweichung zwischen Theorie und Praxis liegt bei 350 MHz mit 0,13 dB.

5.2.2 Vergleichsmessung mit dem Messlabor der Bundesnetzagentur in Kolberg

In der Zusammenarbeit mit dem akkreditierten Messlabor der Bundesnetzagentur wurde ein Vergleichsmessung durchgeführt. Dies bedeutet, dass eine identische Sendequelle in beiden Laboren vermessen wird. Im Anschluss können die Messergebnisse verglichen werden. Dies dient der Kontrolle der Messkette sowie der Qualitätssicherung der teilnehmenden Labore.

Als Signalquelle wurde die isotrope Strahlungsquelle KSQ1000 der Firma MEB verwendet. Diese Strahlungsquelle kann über einen Frequenzbereich von 30 MHz bis 1 GHz ein äquidistantes Spektrum in den Schrittweiten 1 MHz, 5 MHz sowie 10 MHz erzeugen. Dieser Kammgenerator wurde in 3 m Messentfernung auf dem Tisch oberhalb der Drehscheibe positioniert. Während dieser Messung befand sich die Empfangsantenne auf gleicher Höhe zur Strahlungsquelle. In der folgenden Abbildung ist das Ergebnis der Messung in der Absorberkabine der Hochschule dargestellt.

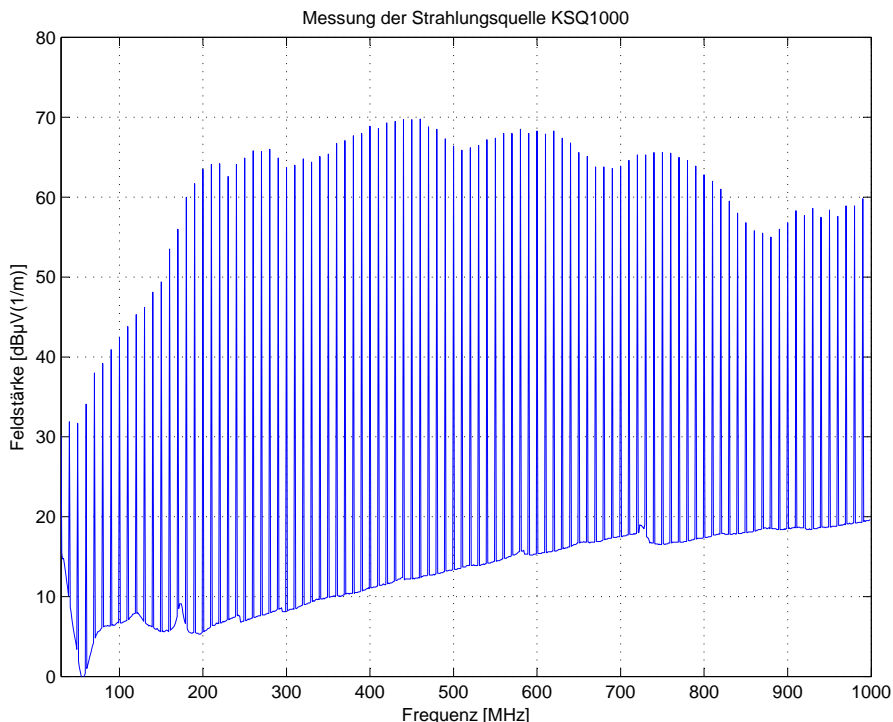


Abbildung 5.4: Validierung der Messkette mittels KSQ1000, Schrittweite 10 MHz

Die Abbildung 5.4 für sich kann keine Aussage über die Validierung der Messkette geben, da Informationen wie Sendeleistung und Gewinn der Sendequelle unbekannt sind. Erst der Vergleich zur Messung des Messlabors Kolberg gibt hier einen Anhaltspunkt über die Qualität der Messkammer.

In der nachfolgenden Abbildung sind die Messungen der Absorberkabine sowie der Messung des Messlabors der Bundesnetzagentur dargestellt.

Die Messung des Messlabor Kolberg erfolgt in einer Entfernung von 10 m. Dieser Unterschied muss bei den Messergebnissen berücksichtigt werden. Die Umrechnung der Messergebnisse auf eine Entfernung von 3 m erfolgt über folgende Gleichung.

$$E_{dB\mu V(1/m)}(d_{neu}) = 20 \cdot \log\left(\frac{d_{alt}}{d_{neu}}\right) dB + E_{dB\mu V(1/m)}(d_{alt}) \quad (5.11)$$

Dabei ist:

- $E_{dB\mu V(1/m)}(d_{neu})$: approximierte Feldstärke [dBµV(1/m)]
- $E_{dB\mu V(1/m)}(d_{alt})$: approximierte Feldstärke [dBµV(1/m)]
- d_{neu} = neue Entfernung [m]
- d_{alt} = alte Entfernung [m]

Wird für die Ausgangsentfernung eine Strecke von 10 m angenommen und für die neue Entfernung ein Abstand von 3 m so erhöht sich die Feldstärke um einen Faktor von 10.4576 dB. Die Herleitung dieser Gleichung ist aus [Wen12, S.16] zu entnehmen.

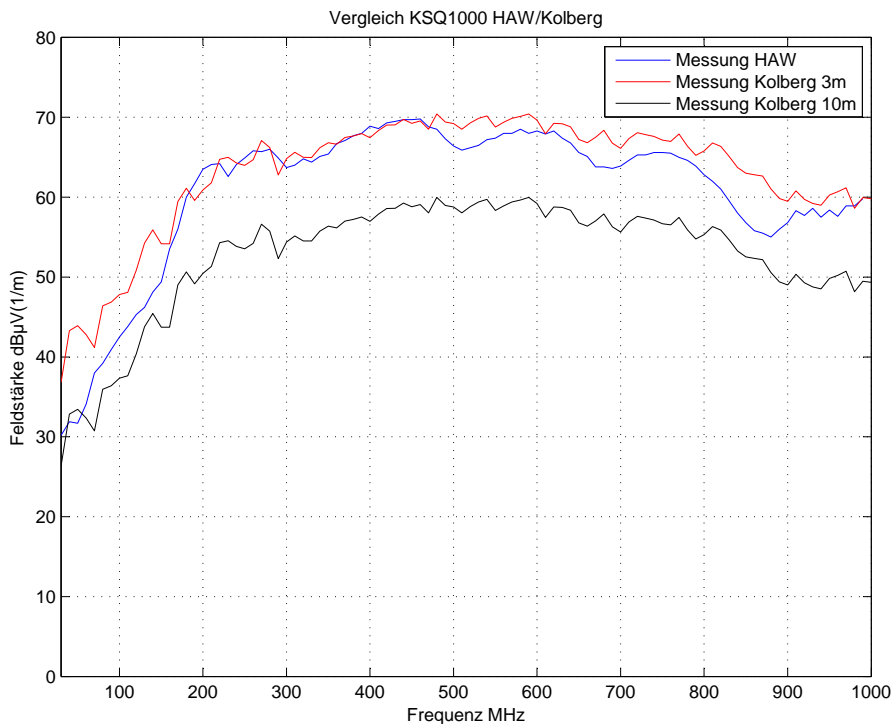


Abbildung 5.5: Differenz zwischen Messlabor Kolberg und Absorberkabine HAW

Abbildung 5.5 stellt die Messung in der Absorberkabine der HAW und des Messlabors der Bundesnetzagentur sowohl in 3 m als auch in 10 m gegenüber. Die Gegenüberstellung zeigt, dass die Messungen dieser beiden Labore nicht weit voneinander abweicht. Dies bedeutet, dass die Einrichtung der Messsoftware EMC32 ohne gravierende Fehler vollzogen wurde. Die Unterschiede zwischen diesen Messungen befinden sich innerhalb der Messunsicherheit. Auf die Messunsicherheit wird im Abschnitt 6 genauer eingegangen.

5.2.3 Zusammenfassung

Die Validierung des Empfangswegs wurde über zwei Wege durchgeführt.

Zum einen wurde ein definiertes Signal in der Absorberkabine ausgestrahlt und anschließend von der, wie in Abschnitt 4.4.3 beschriebenen Messkette aufgenommen. Das definierte Signal ermöglicht die theoretische Vorhersage der empfangenen Feldstärke. Diese theoretischen Vorbetrachtungen wurden anschließend mit den Ergebnissen der Messung verglichen. Die Zusammenfassung dieser Ergebnisse wurde in Tabelle 5.4 hinterlegt. Aus dieser Tabelle geht hervor, dass die Abweichungen zwischen Theorie und Messung innerhalb der Messunsicherheit der Absorberkabine liegen.

Zum anderen wurde in Zusammenarbeit mit dem akkreditiertem Messlabor der Bundesnetzagentur in Kolberg ein Vergleichsmessung durchgeführt. Bei diesem Versuch wurde in beiden Messlaboren eine identische Signalquelle vermessen.

Der Vergleich dieser Messungen soll Aufschluss über die Qualität geben und dient zusätzlich der Qualitätssicherung beider Messlabore. Der Vergleich des Messlabor Kolberg und der Absorberkabine der HAW wird in Abbildung 5.5 dargestellt. Sie zeigt, dass die Messungen weitestgehend übereinstimmen. Zusammengefasst kann man sagen, dass die Messkette ein zuverlässiges Ergebnis einer Störfeldstärkemessung liefert.

5.3 Validierung der Homogenität in der EMV-Kabine

Für den Betrieb einer Absorberkabine sind zwei Messungen von entscheidender Bedeutung. Zum einen ist die Messung der Emission eines Prüflings von Interesse, zum anderen müssen die Prüflinge einer, in den Normen hinterlegten und für den Betrieb sort bestimmten Störfeldstärke standhalten, ohne ein fehlerhaftes Verhalten aufzuweisen. Dieser Abschnitt befasst sich mit Letzterem, der Überprüfung des Equipment, für die Erzeugung eines hochfrequenten, elektromagnetischen Feldes. In der Norm DIN EN 61000-4-3:2006 + A1:2008 + A2:2010 ist ein Verfahren beschrieben, wie reproduzierbar geprüft werden soll, ob das verwendete Equipment in der Lage ist, ein Prüfling mit einer gleichmäßigen Feldstärke zu bestrahlen.

Die Norm sieht hierfür einen Aufbau wie in Abbildung 5.6 dargestellt vor.

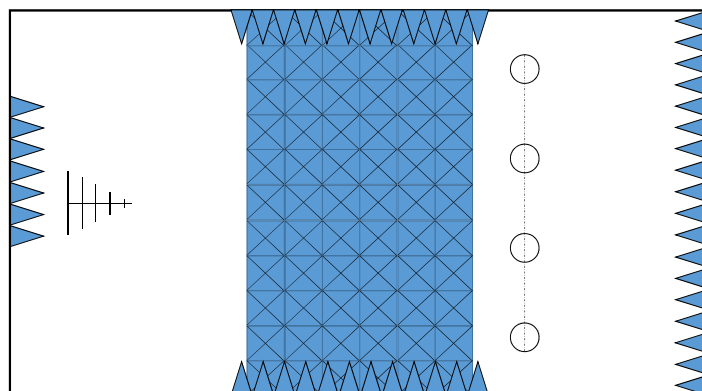


Abbildung 5.6: Aufbau der Messpunkte nach DIN EN 61000-4-3, Ansicht von Oben

In dieser Abbildung ist die Draufsicht der Absorberkabine dargestellt, der exakte Aufbau der Sendekette ist im Abschnitt 4.4 dargestellt. Zu sehen ist auf der linken Seite die Sendeanenne. In einem Abstand von 3 m zu dieser Antenne befindet sich eine Ebene mit Messpunkten. An den Positionen dieser Ebene wird die Feldsonde positioniert. Die in der Norm beschriebene Verteilung der Sondenpositionen ist in Abbildung 5.7 zu sehen.

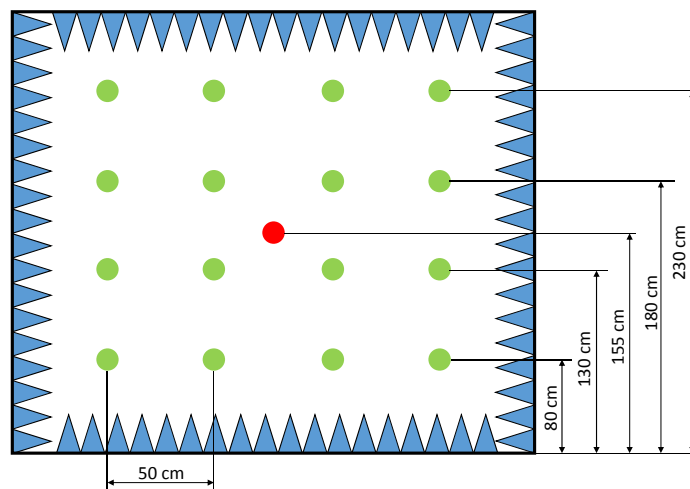


Abbildung 5.7: Aufbau der Messpunkte nach DIN EN 61000-4-3, Frontansicht

Die Norm schreibt vor, dass das Gitternetz mit einem Gitterabstand von 0,5 m aufgebaut werden soll. Die Idee dieser Messanordnung ist die Bestimmung einer vertikalen Fläche, an der die erzeugten Feldstärken gemessen werden. Das verwendete Equipment, wie Verstärker, Signalgenerator sowie Antenne, müssen nun in der Lage sein, eine gleichförmige Feldverteilung auf dieser vertikalen Fläche zu erzeugen.

In der oben genannten Norm werden Kriterien beschrieben, die eine EMV-Vollabsorberkabine erfüllen muss. Eine Übersicht dieser Kriterien ist im Abschnitt 5.3.1 dargestellt.

5.3.1 Kriterien für die Beurteilung der Homogenität

1. Die Norm gibt an, dass das Equipment in der Lage ist eine gleichförmige Feldverteilung zu erzeugen, wenn nicht weniger als 75 % der Gitterpunkte eine Abweichung von 0 dB vom Referenzpunkt aufweisen.
 -6 dB
2. In einem Frequenzbereich bis 1 GHz ist eine Grenzabweichung von maximal 3 % der Prüffrequenzen zulässig. Hierbei befindet sich die Grenzabweichung in einem Bereich von +6 dB und maximal +10 dB.
3. Bei einem Gitternetz, bestehend aus vier Punkten und einem Abstand von 0,5 m x 0,5 m müssen 100 % der Gitterpunkte innerhalb der 0 dB Toleranz liegen.
 -6 dB

Für die Messung des GFB gibt es zwei Varianten, die im Anschluss erläutert werden.

Variante 1: konstante Leistung: Bei dem Kalibrierverfahren der konstanten Leistung wird eine, im Vorfeld definierte Leistung am Signalgenerator eingestellt und der Antenne zugeführt. Anschließend wird an jeder Position des Gitters für jede Frequenz die Feldstärke aufgezeichnet. Die Auswertung wird nach den oben beschriebenen Kriterien durchgeführt.

Variante 2: konstante Feldstärke: In der zweiten Variante wird für jeden Gitterpunkt sowie für jede Frequenz eine Feldstärke festgeschrieben. In der Auswertung werden nun die Parameter für die Erzeugung dieser Feldstärke untersucht. Dieser Ablauf erfordert ein System, welches die verwendeten Geräte einer Sendekette dynamisch nachregelt und die einzelnen Parameter aufzeichnet.

In den folgenden Abschnitten wurden beide Varianten eingesetzt. Dies ist der zeitlichen Abfolge der Beschaffung geschuldet. Zu Beginn der Messung der Feldhomogenität stand die Sonde EMR-200 zur Verfügung. Diese konnte nicht in die Messsoftware EMC32 eingebunden werden. Aus diesem Grunde wurde mit MatLab ein Programm zur Aufzeichnung und Auswertung der Feldhomogenität geschrieben. Dieses Programm wertet die RS232 Schnittstelle der Feldsonde EMR-200 nach Variante 1 aus.

Im weiteren Verlauf stand ab Abschnitt 5.3.6 die Sonde PMM EP601 zur Verfügung. Diese Feldsonde kann in vollem Umfang von der Software EMC32 verwendet werden. Ab diesem Abschnitt wurde für die Auswertung die Homogenitätsfunktion der Rode & Schwarz Software verwendet. Diese Funktion benötigt die Messung nach Variante 2, der konstanten Feldstärke.

Der Aufbau und Messablauf ist im Einzelnen im Abschnitt A.5 erläutert.

In den Abschnitten 5.3.2 bis Abschnitt 5.3.9 wird die Erzeugung und Auswertung eines gleichförmigen Feldbereiches im Frequenzbereich von 80 bis 1000 MHz dargestellt. Dies ist der Bereich, der vom Verstärker BBA150 (Nr. 2 aus Abschnitt A.4) abgedeckt wird. Die Validierung der Sendekette für den Frequenzbereich 50 bis 200 MHz wird im Abschnitt 5.3.10 separat untersucht.

5.3.2 Messung normenkonform ohne Bodenabsorber

Im ersten Schritt wurde die Homogenität mit den aktuellen Bedingungen innerhalb der Absorberkabine untersucht. Wie in Abbildung 5.8 zu sehen ist, befinden sich keine Absorber auf dem Boden zwischen Gitterstruktur und Antenne. Der Messablauf nach DIN EN 61000-4-3 (VDE 0847-4-3):2011-04 ist im Anhang A.5 genauer erläutert.

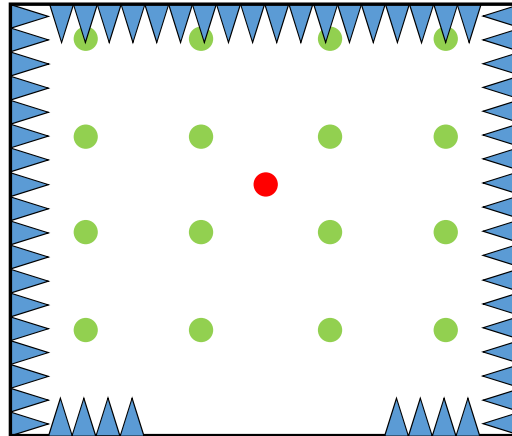


Abbildung 5.8: Aufbau zur Messung der Homogenität ohne Absorber auf der Bodenfläche

Die Sendeanenne HL562e wurde so positioniert, dass eine Gitterstruktur an der Stirnseite des Tisches abgebildet wird. Dieser Aufbau ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Die Auswertung dieser Messung ist in Abbildung 5.9 zu sehen.

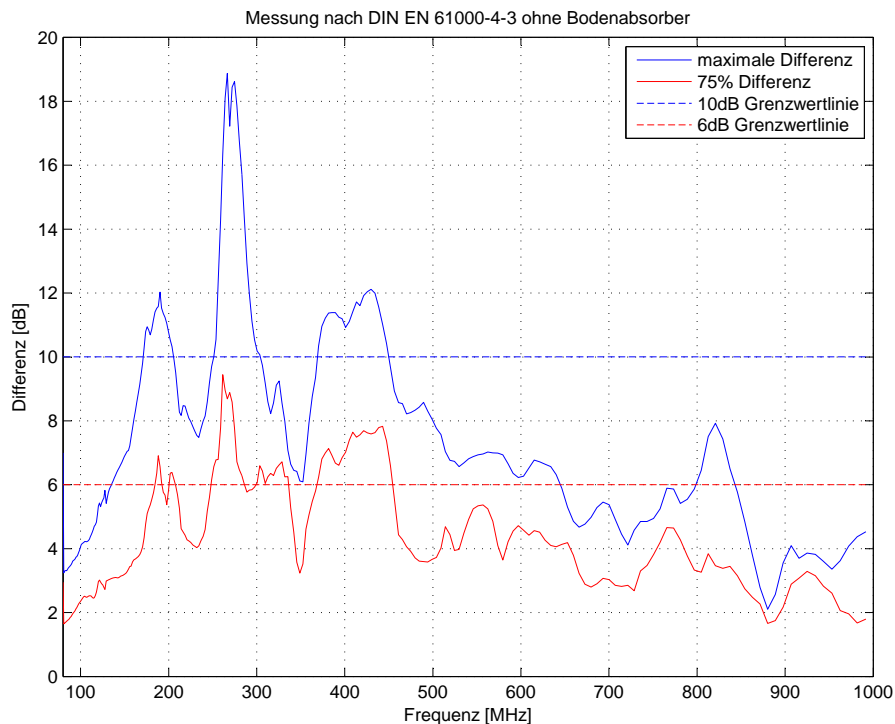


Abbildung 5.9: Auswertung zur Messung der Homogenität ohne Absorber auf der Bodenfläche

In dieser Abbildung sind vier Linien dargestellt. Zum einen sind die Grenzwertlinien nach den oben aufgeführten Kriterien zu erkennen, zum anderen sind die Abweichungen für jede gemessene Frequenz dargestellt. Die blaue Linie stellt dabei die maximale Abweichung innerhalb des Gitternetzwerks dar. Die rote Linie zeigt die Abweichung bei dem Kriterium der besten 75 %.

Die Auswertung zeigt nun Auffälligkeiten im Frequenzbereich von 200 MHz bis ca. 450 MHz. Die größten Abweichungen innerhalb der Gitterstruktur sind jedoch bei 266,7 MHz zu verzeichnen. Hier weichen einzelne Gitterpunkte mit bis zu 19 dB vom Bezugspunkt ab.

Wichtig für die Bewertung der Homogenität ist zunächst die Abweichung nach Kriterium 1 aus Abschnitt 5.3.1. Dies bedeutet, dass ein homogenes Feld erzeugt werden kann, wenn von den jeweils gemessenen Feldstärken mindestens 75 % aller Gitterpunkte innerhalb des Nennwerts von 0 dB -6 dB liegen. Jedoch dürfen 3 % der Frequenzen außerhalb des Kriteriums liegen.

Bei dieser Messung liegt die Abweichung bei 12.99 %, was 33 der 254 gemessenen Frequenzen darstellt. Die Verteilung der Feldstärken auf die einzelnen Gitterpunkte lässt sich für die Frequenz 266,7 MHz in folgender Abbildung genauer darstellen:

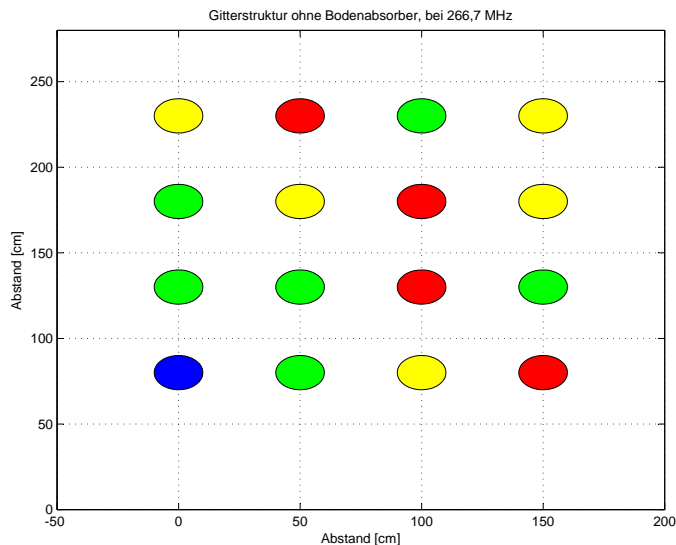


Abbildung 5.10: Feldstärkenverteilung der Gitterpunkte bei 266,7 MHz, ohne Pyramidenabsorber auf dem Boden

Die in Abbildung 5.10 dargestellten Kreise symbolisieren die einzelnen Gitterpunkte mit den jeweiligen Differenzen. Hierbei ist der blaue Kreis der Bezugspunkt mit der höchsten gemessenen Feldstärke. Die grünen Kreise bedeuten eine Abweichung von maximal 6 dB. Mit den gelben Kreisen wird der Bereich verdeutlicht, der sich zwischen der 6 dB Grenzwertlinie und der 10 dB Grenzwertlinie befindet. Mit den roten Kreisen werden die Gitterpunkte dargestellt, bei denen die Abweichung größer als 10 dB zum Bezugspunkt sind.

An den Abbildungen 5.9 sowie 5.10 ist zuerkennen, dass mit dieser Konstellation, dem Aufbau und der Position des Gitternetzes in der Absorberkabine kein homogenes Feld nach DIN EN 61000-4-3 (VDE 0847-4-3):2011-04 erzeugt werden kann.

Weitere Schritte zur Verbesserung werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

Tabelle 5.5: Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für 16 Punkte, ohne Bodenabsorber

Polarisation	0 - 6 dB [%]	6 - 10 dB [%]	>10 dB [%]	hält die Grenzwerte ein
vertikal	87,0	13,0	0	Nein
horizontal	nicht ermittelt			

5.3.3 Messung normenkonform mit Bodenabsorbern

Als Konsequenz zu den Ergebnissen aus Abschnitt 5.3.2, wurde der Ring aus Absorberpyramiden zwischen Antenne und Drehtisch geschlossen. Weiterhin wurde aus Zeitgründen auf die Messung aller 16 Gitterpunkte verzichtet. In diesem Abschnitt beschränkt sich die Messung auf vier Gitterpunkte im Zentrum, wie in folgender Abbildung dargestellt:

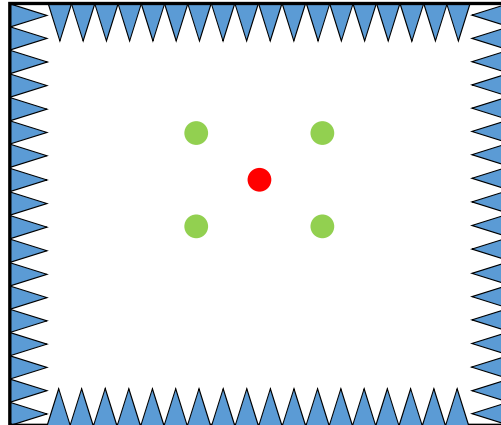


Abbildung 5.11: Aufbau zur Messung der Homogenität mit Absorber auf der Bodenfläche

In Abbildung 4.5 ist der vom Hersteller angegebene Dämpfungsverlauf dargestellt. Aus diesem Diagramm ist zu erkennen, dass die Dämpfungseigenschaften erst bei einer Frequenz von 500 MHz beginnt. Dies schließt eine wirksamem Verbesserung der Homogenitätseigenschaften im kritischen Frequenzbereich von 200 MHz bis 450 MHz aus. Das Ergebnis dieser Messung ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

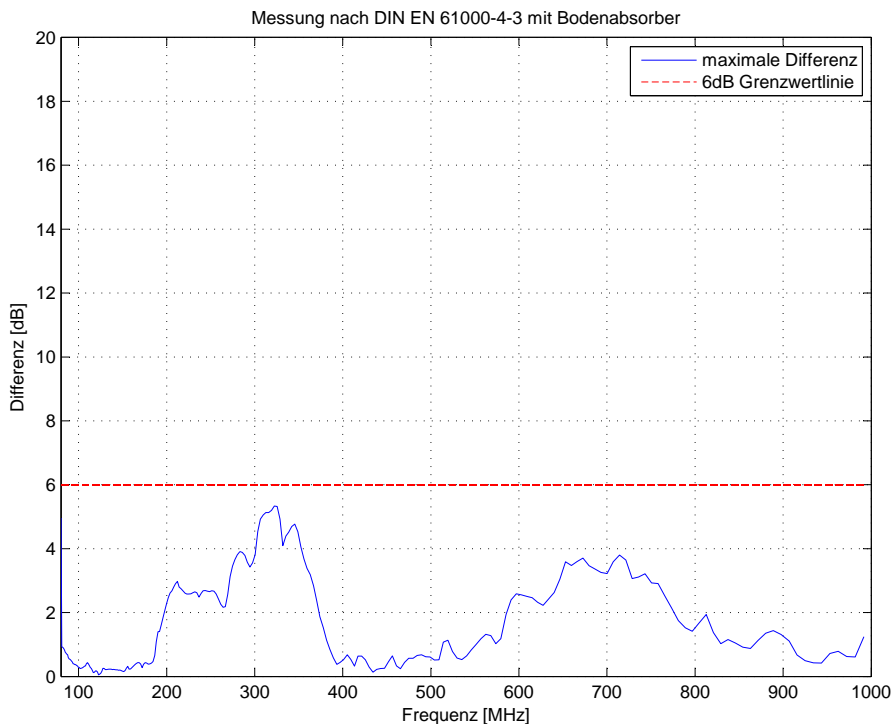


Abbildung 5.12: Auswertung zur Messung der Homogenität mit Absorber auf der Bodenfläche

Bei der Messung von nur vier Gitterpunkten müssen, wie in Abschnitt 5.3.1 beschrieben, 100 % der Gitterpunkte die Homogenitätskriterien erfüllen. In der Messung konnte bestätigt werden, dass das Kriterium 3 erfüllt wird. Jedoch ist darauf zu achten, dass bei einer Messung mit vier Gitterpunkten ein anderer Bezugspunkt verwendet wird. Die Messung aus Abschnitt 5.3.2 setzte ihren Bezugspunkt in die untere linke Ecke. Gitterpunkt eins kann in einer Messung mit vier Gitterpunkten nicht berücksichtigt werden, was eine Verschiebung der Bezugfeldstärke zur Folge hat. Ob nun das Schließen des Ringes die nötige Verbesserung für 16 Gitterpunkte herbeiführt, ist nur in einer weiteren Messung zu beantworten.

Folgende Tabelle fasst die Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für die Messung mit vier Gitterpunkten zusammen.

Tabelle 5.6: Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für 4 Punkte, mit Bodenabsorbern

Polarisation	0 - 6 dB [%]	>6 dB [%]	hält die Grenzwerte ein
vertikal	100	0	Ja
horizontal	nicht ermittelt		

5.3.4 Messung normenkonform mit 16 Messpunkten

In dieser Messung werden, wie in Abschnitt 5.3.2, alle 16 Gitterpunkte untersucht. Der Unterschied zur vorherigen Messung ist der nun geschlossene Ring aus Absorberpyramiden. In der nachfolgenden Abbildung ist das Ergebnis der Messung dargestellt.

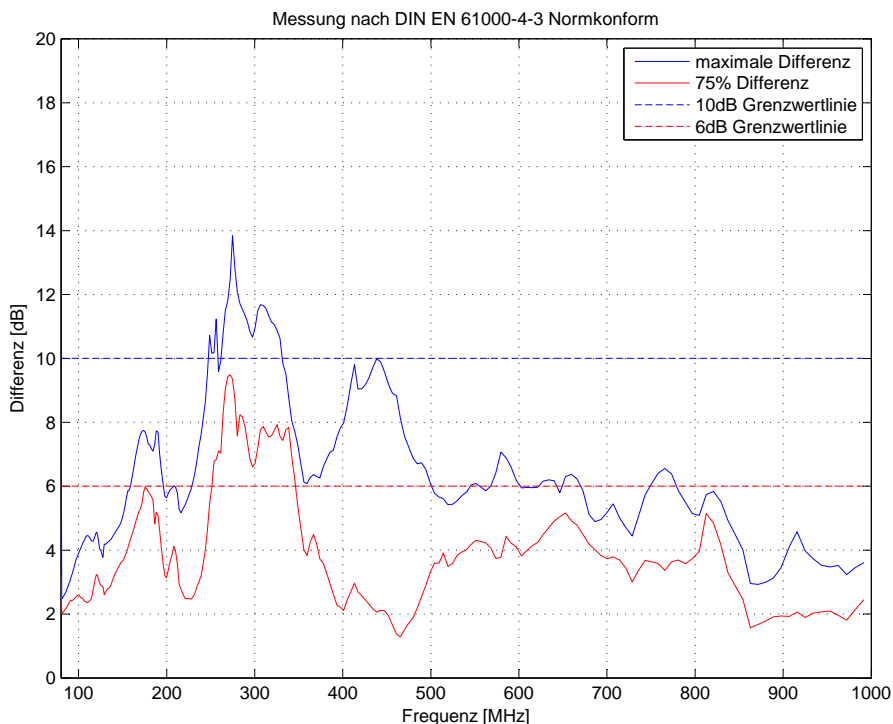


Abbildung 5.13: Auswertung zur Messung der Homogenität mit Absorber auf der Bodenfläche und 16 Messpunkten

In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass sich die Differenzen der 16 Gitterpunkte vermindert haben. Insbesondere hat sich die Differenz unter den 16 Gitterpunkten im Frequenzbereich von 266,7 MHz reduziert.

Dennoch ist im Bereich von ca. 250 MHz bis 350 MHz eine Überschreitung des 6 dB Nennwertes zu erkennen. Die Überschreitungen der 6 dB Grenzwertlinie beträgt insgesamt 9.84 %, dies entspricht 25 der 254 Frequenzen.

Für weitere Auswertungen wurde wieder die Verteilung der Feldstärken auf die einzelnen Gitterpunkte untersucht. Die Verteilung der Gitterpunkte ist in Abbildung 5.14 dargestellt.

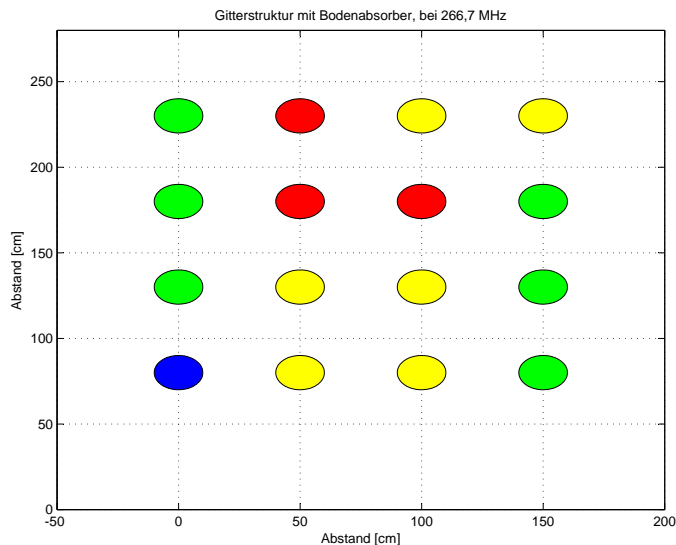


Abbildung 5.14: Feldstärkenverteilung der Gitterpunkte bei 266,7 MHz, mit Pyramidenabsorber auf dem Boden

Abbildung 5.14 zeigt, dass der Bezugspunkt mit der höchsten Feldstärke wieder in der unteren linken Ecke positioniert wurde. Abweichungen zum Bezugspunkt sind insbesondere in der Mitte sowie in der oberen Reihe zu erkennen.

An diesen Punkten wurde von der Sonde eine geringere Feldstärke gemessen. Wird der normgerechte Aufbau in der Absorberkabine betrachtet, so fällt auf, dass die Gitterpunkte der obersten Reihe von den Absorberpyramiden des Ringes verdeckt werden.

Eine Verbesserung der Homogenität wird mit dem Aufbau nicht erreicht. Im folgenden Abschnitt wird der Aufbau der Gitterstruktur an die Abmessungen der Absorberkabine angepasst und die Ergebnisse erläutert.

Tabelle 5.7: Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für 16 Punkte, Normkonform

Polarisation	0 - 6 dB [%]	6 - 10 dB [%]	>10 dB [%]	hält die Grenzwerte ein
vertikal	90,16	9,84	0	Ja
horizontal	nicht ermittelt			

5.3.5 Messung der Feldhomogenität nicht normkonform

Die normgerechte Messung mit 16 Gitterpunkten verlangt nach einer Absorberkabine mit den Abmessungen von mindestens einer Breite sowie Höhe von ca. 2,8 m. Die Absorberkabine der HAW kann die Breite der Gitterstruktur erfüllen. Jedoch wird die oberste Reihe der Gitterstruktur bei einer Starthöhe von 80 cm von den Absorberpyramiden verdeckt. Aus diesem Grund wurde folgende Anpassung an die Norm vorgenommen.

Die untersten Gitterpunkte beginnen bei einer Höhe von 55 cm. Der Abstand der Gitterpunkte untereinander wurde nicht verändert, dieser Abstand beträgt weiterhin 50 cm. Durch das Herabsetzen der Gitterstruktur muss der Mittelpunkt der Antenne ebenfalls angepasst werden. Der Mittelpunkt der Antenne besitzt nun eine Höhe von 1,3 m. Die neuen Positionen und Abstände sind schematisch in folgender Abbildung dargestellt.

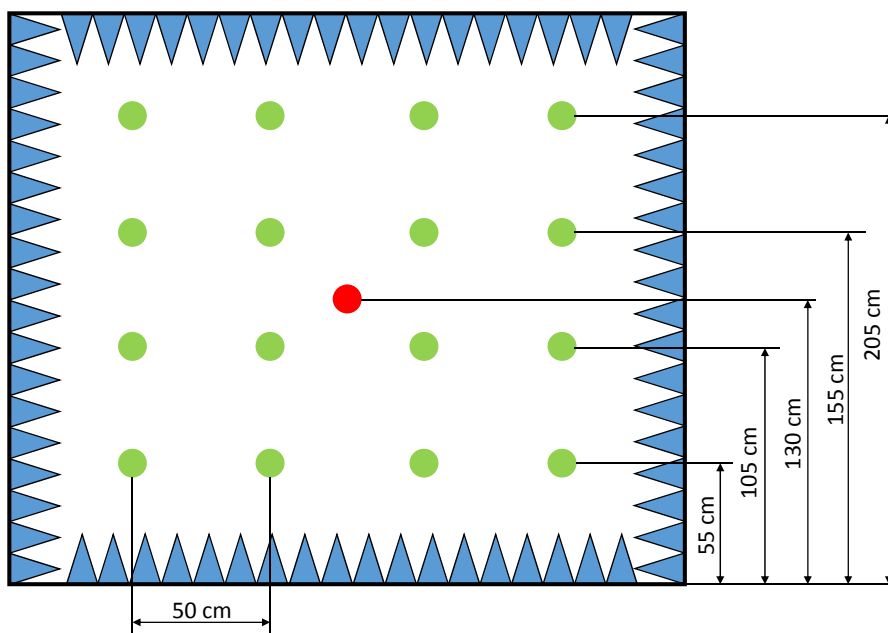


Abbildung 5.15: Aufbau zur Messung der Homogenität abweichend von der Norm DIN EN 61000-4-3

Die mit der neu aufgebauten Gitterstruktur erbrachten Ergebnisse sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

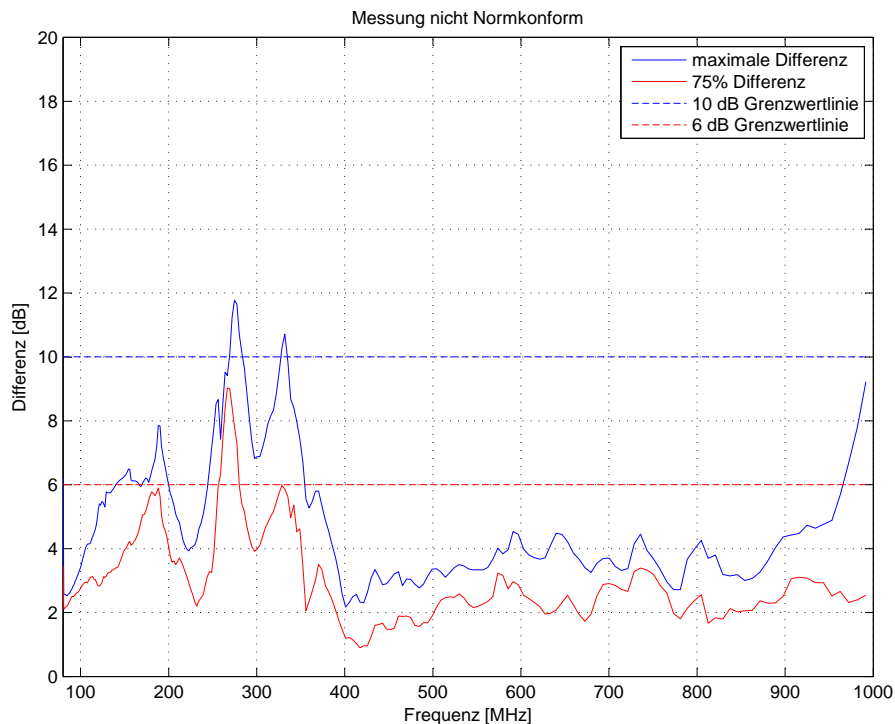


Abbildung 5.16: Auswertung zur Messung der Homogenität abweichend von der Norm DIN EN 61000-4-3

Abbildung 5.16 zeigt, dass die Abweichungen über die gesamten Frequenzen geringer geworden sind. Lediglich im Bereich um 260 MHz ist eine Überschreitung der 6 dB Grenzwertlinie zu erkennen.

Es verletzen lediglich 2,7559 % der gemessenen Frequenzen die 6 dB Grenzwertlinie. In Abschnitt 5.3.1 wurde beschrieben, dass maximal 3 % aller Prüffrequenzen eine Abweichung größer 6 dB aufweisen dürfen. Somit ist für diesen Aufbau und der vertikalen Position der Antenne die Bedingung der Homogenität erfüllt.

Tabelle 5.8: Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für 16 Punkte, nicht Normkonform

Polarisation	0 - 6 dB [%]	6 - 10 dB [%]	>10 dB [%]	hält die Grenzwerte ein
vertikal	97,15	2,75	0	Ja
horizontal	nicht ermittelt			

5.3.6 Messung der Feldhomogenität für 9 Punkte

Vom Hersteller der Absorberkabine wurde eine homogene Fläche von 1 qm zugesagt. Um die Zusicherung überprüfen zu können, wurde der Aufbau ein weiteres Mal verändert. Für die Validierung eines gleichförmigen Feldbereichs mit dem Flächeninhalt von 1 qm müssen die Gitterpunkte wie folgt angeordnet werden. Drei Gitterpunkte befinden sich in einem Abstand von 50 cm auf einer horizontalen Ebene in 80 cm Höhe. Eine weitere Reihe der Gitterpunkte befindet sich auf einer Höhe von 1,3 m. Die letzte Reihe befindet sich auf einer Höhe von 1,8 m. Zu sehen ist dieser Aufbau in Abbildung 5.17.

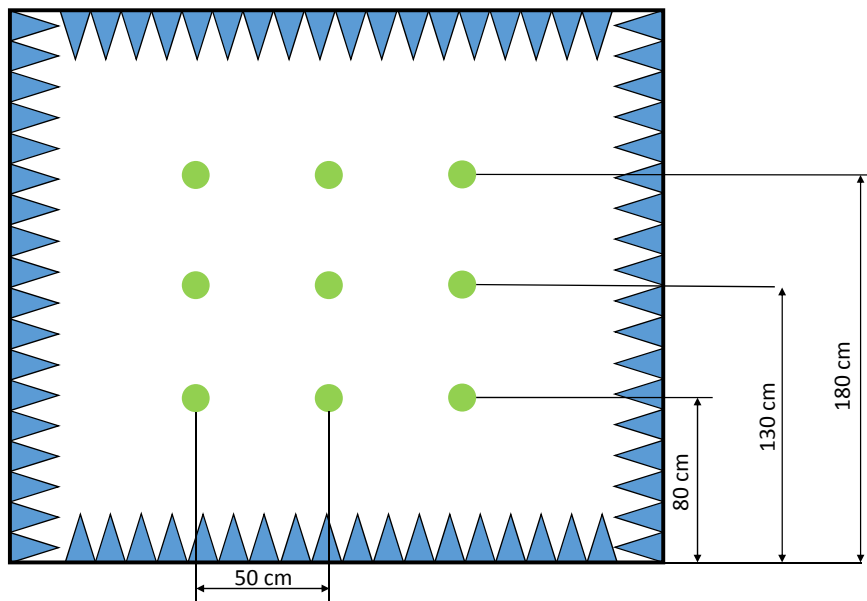


Abbildung 5.17: Aufbau zur Messung der Homogenität mit einer Fläche von 1 qm

Die Sendeantenne befindet sich weiterhin auf einer Höhe von 1,3 m und somit im übertragenem Zentrum der Gitterstruktur. Dies ergibt eine grundlegende Änderung des Versuchsaufbaus. Im ersten Teil wurde das Zentrum der Sendeantenne von vier Gitterpunkten symmetrisch eingeschlossen. Für die weiteren Versuche wird der Aufbau nach Abbildung 5.17 verwendet. Das Zentrum der Gitterstruktur befindet sich in der Hauptstrahlrichtung der Sendeantenne, was zu einer asymmetrischen Verteilung der Gitterpunkte im Bezug auf die Sendeantenne führt. Die äußeren Gitterpunkte besitzen einen Abstand zum Zentrum von mindestens 50 cm und maximal 70,7 cm.

Mit dem Umorganisieren der Gitterstruktur wurde im Versuchsaufbau weitere Änderungen eingeführt. Im folgenden werden die Messungen nach der im Abschnitt 5.3.1 beschriebene Variante 2, konstante Feldstärke, durchgeführt. Dies bedeutet, an den Gitterpunkten wird eine konstante Feldstärke vorgegeben, die von der Sendekette dynamisch eingestellt wird. Für diese Änderung ist der Einsatz der Feldsonde PMM EP601 der Firma NARDA notwendig. Diese ersetzt die bisher genutzte Feldsonde EMR 200.

Die Steuerung des Signalgenerators, des Verstärkers sowie die Aufzeichnung der Parameter wird durch die Messsoftware EMC 32 durchgeführt. Die Sendeantenne ist weiterhin vor den Absorberpyramiden an der Stirnseite der Absorberkabine positioniert.

Die Auswertung der Messung wird in folgender Abbildung dargestellt.

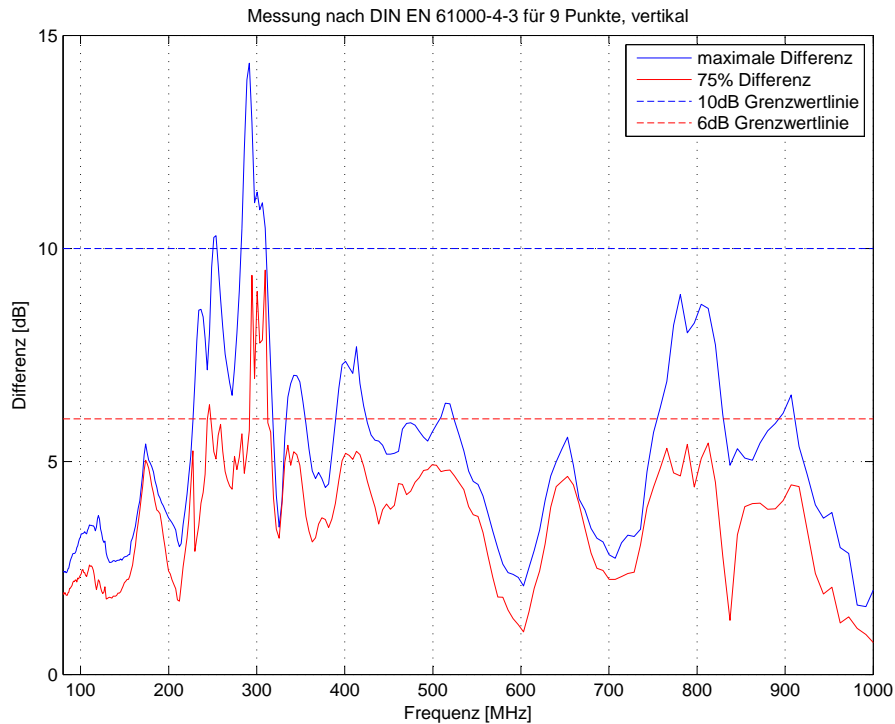


Abbildung 5.18: Auswertung zur Messung der Homogenität 1 qm Zentrum

Abbildung 5.18 zeigt, dass die Umstrukturierung der Gitterstruktur die Probleme im Bereich um 300 MHz weder mindert, noch aufheben konnte. Die höchste Differenz der Feldstärken befindet sich bei dieser Messung bei der Frequenz 309,59 MHz. Hier wurde eine Differenz der reduzierten Leistung von 9,49 dB erreicht. Als Referenzpunkt wurde Punkt 8 gewählt, dieser befindet sich in der Mitte der obersten Reihe. Die Verteilung der einzelnen Gitterpunkte wird in Abbildung 5.19 dargestellt.

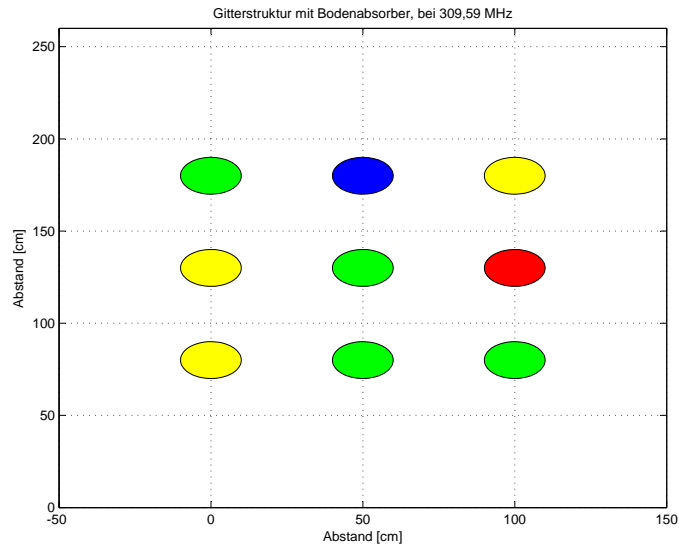


Abbildung 5.19: Feldstärkenverteilung für neun Gitterpunkte bei 309,59 MHz

Die Auswertung der Feldhomogenität ergab, dass 2,7 % der Frequenzpunkte innerhalb des Toleranzbereiches zwischen 6-10 dB liegen. Somit werden die von der Norm DIN EN 61000-4-3 geforderten Kriterien erfüllt.

Tabelle 5.9: Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für 9 Punkte, Antennenposition 1

Polarisation	0 - 6 dB [%]	6 - 10 dB [%]	>10 dB [%]	hält die Grenzwerte ein
vertikal	97,3	2,7	0	Ja
horizontal	94,9	5,1	0	Nein

5.3.7 Messung der Feldhomogenität für 9 Punkte, Antennenposition 2

Dieser, sowie die folgenden Abschnitte, befassen sich mit der Beseitigung beziehungsweise der Reduzierung der Abweichung im Bereich um 300 MHz.

Die erste Idee für die Reduzierung der Inhomogenität besteht in der Verschiebung der Sendeantenne. Betrachtet man den Versuchsaufbau, so erkennt man Symmetrien zwischen den Abmessungen der Absorberkabine und der Wellenlänge. Folgende Tabelle stellt die Beziehungen, zwischen Sendeantenne und Umgebung dar.

Tabelle 5.10: Symmetrien zwischen Sendeantenne und Abmessungen der Absorberkabine

Abstände	Distanz [m]
Sendeantenne - GFB	3
Sendeantenne - Boden	1,3
Sendeantenne - Wände	1,5
Sendeantenne - Decke	2
Sendeantenne - EUT	3

Die Berechnung der Wellenlängen der Frequenzen von 250 MHz bis 300 MHz ergibt:

$$\lambda_{250 \text{ MHz}} = \frac{c}{f_{250 \text{ MHz}}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{250 \cdot 10^6 \text{ 1/s}} = 1,2 \text{ m} \quad (5.12)$$

$$\lambda_{300 \text{ MHz}} = \frac{c}{f_{300 \text{ MHz}}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{300 \cdot 10^6 \text{ 1/s}} = 1 \text{ m} \quad (5.13)$$

Dabei ist:

c : Lichtgeschwindigkeit [m/s]

λ : Wellenlänge [m]

Der Vergleich der Tabelle 5.10 mit den Ergebnissen aus Gleichungen 5.12 und 5.13 zeigt, dass die Abstände zwischen Sendeantenne und den Flächen der Absorberkabine eine Wellenlänge beziehungsweise ein vielfaches dieser Wellenlänge beträgt.

Die Absorber, insbesondere die Ferritkacheln, sollen in diesem Frequenzbereich eine absorbierende Wirkung auf die elektromagnetische Welle ausüben. Der nachfolgende Test zeigt die Auswirkung beziehungsweise das Unterbrechen der Symmetrien innerhalb der Absorberkabine. Dies wird durch die Verschiebung der Sendeantenne wie in Abbildung 5.20 bewirkt. Eine Berechnung der Feldstärken ist schwierig, da hier die Bedingungen des Nahfeldes gelten.

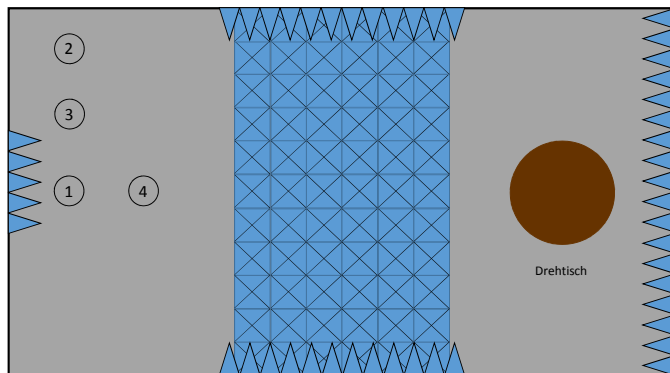


Abbildung 5.20: Schematische Darstellung der Antennenposition für die Messung der Feldhomogenität

Im ersten Versuch wurde die Position der Sendeantenne in die linke Ecke der Absorberkabine verlegt. Als Referenz oder Ausgangspunkt dient, die mit Eins gekennzeichnete Antennenposition. Die Höhe sowie der Abstand zu den Gitterpunkten bleibt dabei unverändert. Für die Auswertung wurde nur der Frequenzbereich von 200 MHz bis 350 MHz und das Zentrum der Gitterstruktur untersucht. Die Auswertung der verschobenen Antenne ist in folgender Abbildung der Ausgangsmessung gegenübergestellt.

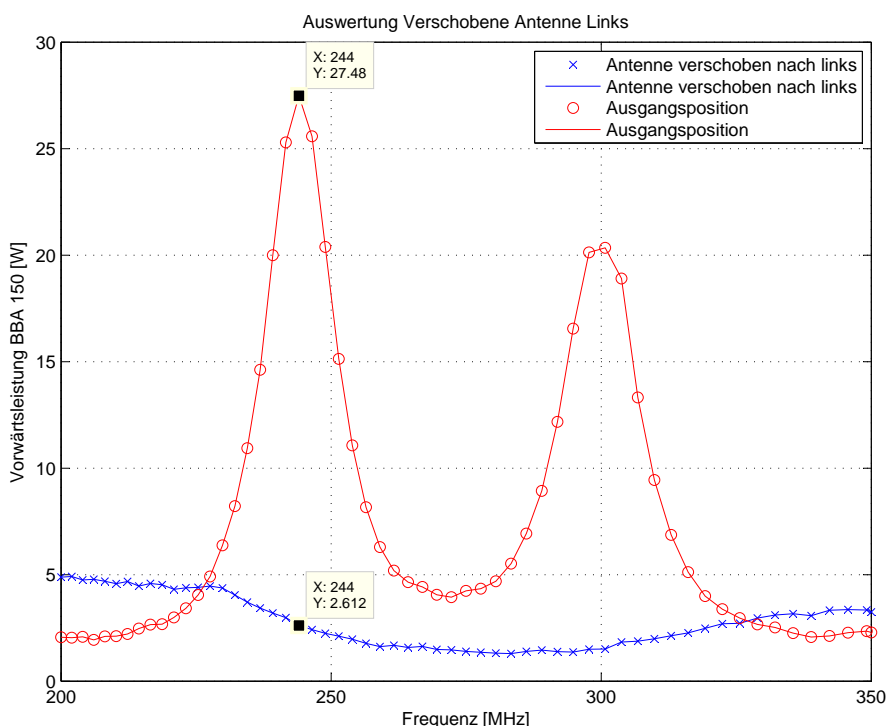


Abbildung 5.21: Vergleich Ausgangsmessung zur verschobenen Antenne, Links

Die Auswertung zeigt die Messung der Ausgangsposition im Vergleich zur Verschiebung der Antenne. Ausgewertet wird die zugeführten Leistung für die Erzeugung einer Feldstärke von 10 V/m am Gitterpunkt.

Zu sehen ist, dass die Verschiebung eine Reduzierung der notwendigen Senderaus-

gangsleistung von 24,87 W zur Folge hat. Für den Bereich um 300 MHz wurde ebenfalls eine reduzierte Leistung erreicht.

Für die Verifizierung der Feldhomogenitätsmessung wurde ebenfalls der Versuchsaufbau auf der rechten Seite der Absorberkabine durchgeführt. Die Messung konnte die zuvor aufgenommenen Messergebnisse bestätigen. An dieser Stelle wird auf die Auflistung der Ergebnisse verzichtet, da von der Messung kein weiterer Erkenntnisgewinn ausgeht.

Die Messung des kompletten gleichförmigen Feldbereiches ergab für die vertikale Polarisation eine Abweichung von 7,5 % für den Toleranzbereich von 6-10 dB. Weiterhin wurde für 0,8 % der Frequenzen der Toleranzbereich von 10 dB überschritten. An dieser Stelle wird von der Norm keinerlei Abweichungen toleriert. Hier darf die maximale Abweichung 0 % betragen. Die Auswertung wird in nachfolgender Abbildung grafisch dargestellt.

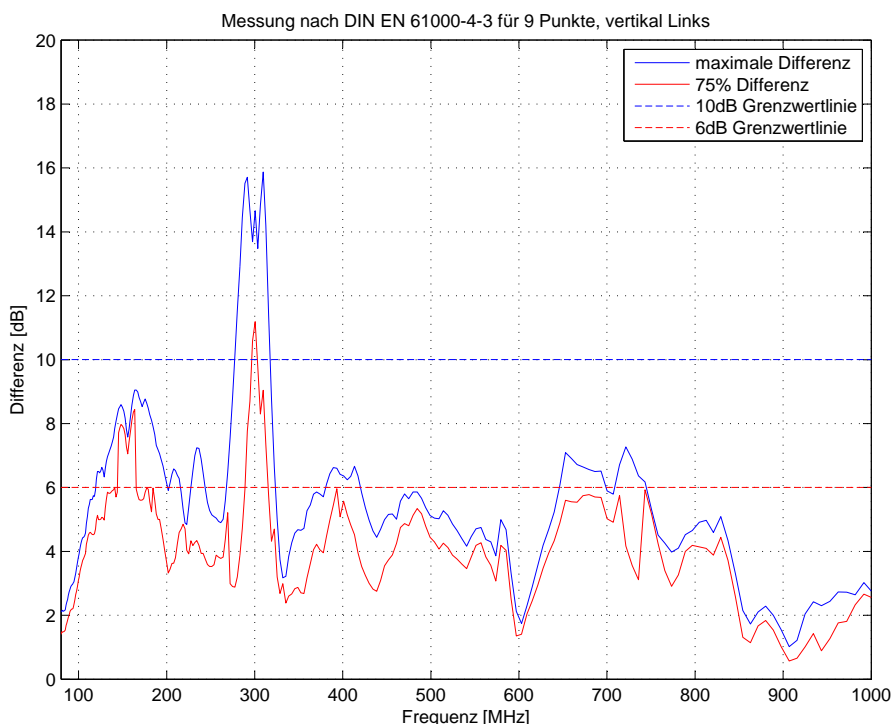


Abbildung 5.22: Auswertung zur Messung der Homogenität 1 qm, links

Die Abweichungen der Feldhomogenität für die horizontale Polarisation sind indes größer, als bei vertikaler Polarisation. Diese Abweichungen liegen im Bereich von 11,0 % für den Toleranzbereich 6 - 10 dB und 0,0 % für den Bereich oberhalb 10 dB. Hier findet eine Kopplung zwischen Sendeantenne und Kabinenwand statt. Der Abstand zur Kabinenwand ist bei dieser Anordnung so gering, dass die elektromagnetische Welle sich nicht ablösen kann.

Tabelle 5.11: Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für 9 Punkte, Antennenposition 2

Polarisation	0 - 6 dB [%]	6 - 10 dB [%]	>10 dB [%]	hält die Grenzwerte ein
vertikal	91,8	7,5	0,8	Nein
horizontal	89,0	11,0	0	Nein

5.3.8 Messung der Feldhomogenität für 9 Punkte, Antennenposition 3

Im Abschnitt 5.3.7 wurde beschrieben, wie die Unterschiede zwischen zentralem Aufbau und der Verschiebung nach links ausfallen. Dabei wurde beobachtet, dass auf Grund des geringen Abstandes zwischen Kabinenwand und Antenne eine Kopplung bei horizontaler Polarisation eintritt.

Zur Vermeidung dieses unerwünschten Nebeneffektes wurde die Antenne in einer Position zwischen zentralem und linkem Aufbau aufgebaut. Die Ergebnisse dieser Konstellation ist in folgender Abbildung dargestellt.

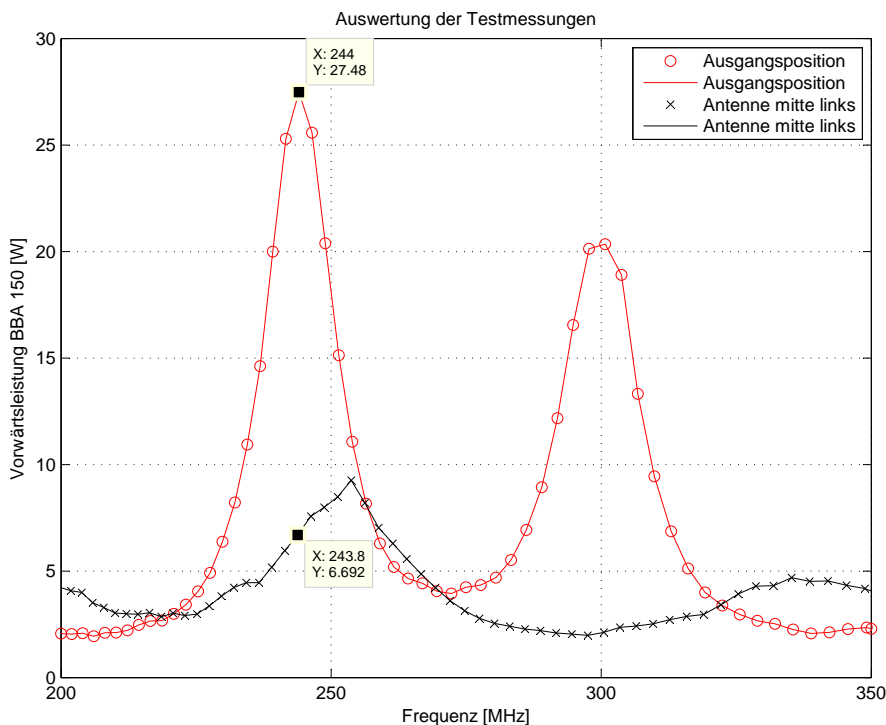


Abbildung 5.23: Vergleich Ausgangsmessung zur verschobenen Antenne, Mitte Links

Abbildung 5.23 zeigt, dass bei dieser Anordnung die notwendige Senderausgangsleistung einen Wert von 10 Watt nicht überschreitet. Somit wurde die Annahme aus dem obigen Kapitel untermauert, dass die Inhomogenität des Feldbereiches durch den physikalischen Aufbau und Positionierung abzuleiten ist.

Die Auswertung der Homogenitätsuntersuchung wird in folgender Abbildung dargestellt.

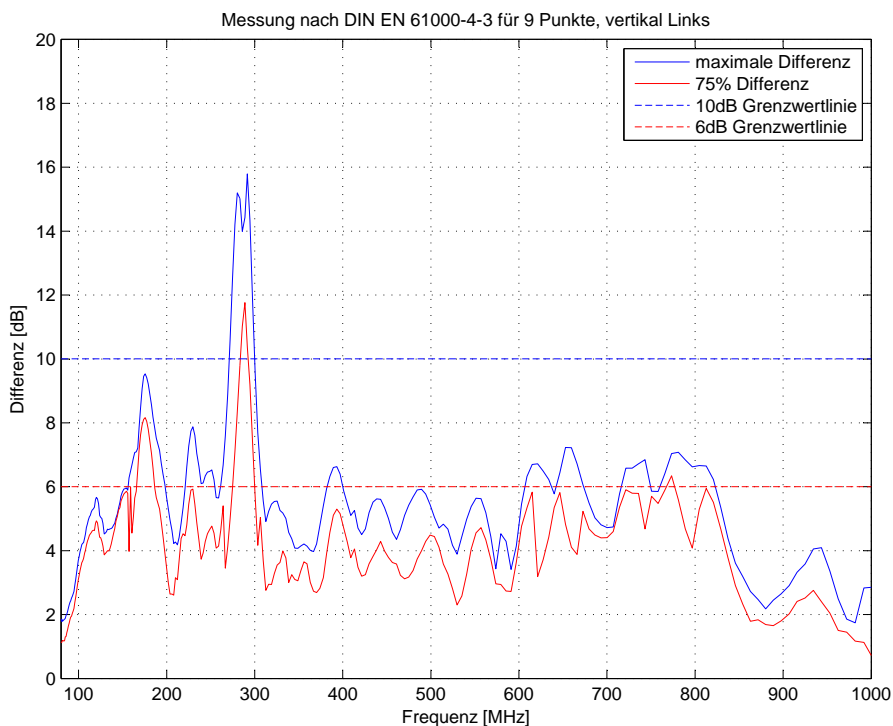


Abbildung 5.24: Auswertung zur Messung der Homogenität 1 qm, mitte links

Das Ergebnis der Messung des gleichförmigen Feldbereiches zeigt für die vertikale Polarisation eine Abweichung 6,7 %, für den Toleranzbereich 6-10 dB und 1,2 % für den Toleranzbereich oberhalb 10 dB. Die horizontale Polarisation ergab eine Abweichung von 4,3 % für den Toleranzbereich von 6 - 10 dB. Oberhalb von 10 dB wurde eine Abweichung von 0,0 % festgestellt.

Die Auswertung ergab, dass die Position drei nicht die Anforderungen der Norm DIN EN 61000-4-3 entspricht.

Tabelle 5.12: Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für 9 Punkte, Antennenposition 3

Polarisation	0 - 6 dB [%]	6 - 10 dB [%]	>10 dB [%]	hält die Grenzwerte ein
vertikal	92,2	6,7	1,2	Nein
horizontal	95,7	4,3	0	Nein

5.3.9 Messung der Feldhomogenität für 9 Punkte, Antennenposition 4

Die zuvor dargestellten Versuche zeigten, dass die Unterbrechung der Symmetrie Auswirkung auf die problematischen Frequenzbereiche ausübt. Die Messung des gleichförmigen Feldbereiches zeigt im Anschluss, dass die Gesamtsituation der Messung keine Verbesserung bewirkte.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde die Sendeantenne wieder im Zentrum positioniert. Weitere Untersuchungen zeigten, dass eine Ortsabhängigkeit über die Gitterstruktur besteht. Die Ortsabhängigkeit lässt sich am Anschaulichsten verdeutlichen, wenn man die zugeführten Leistungen aller Gitterpunkte über die Frequenz beobachtet. Die Auswertung der Messung ist in folgender Abbildung dargestellt.

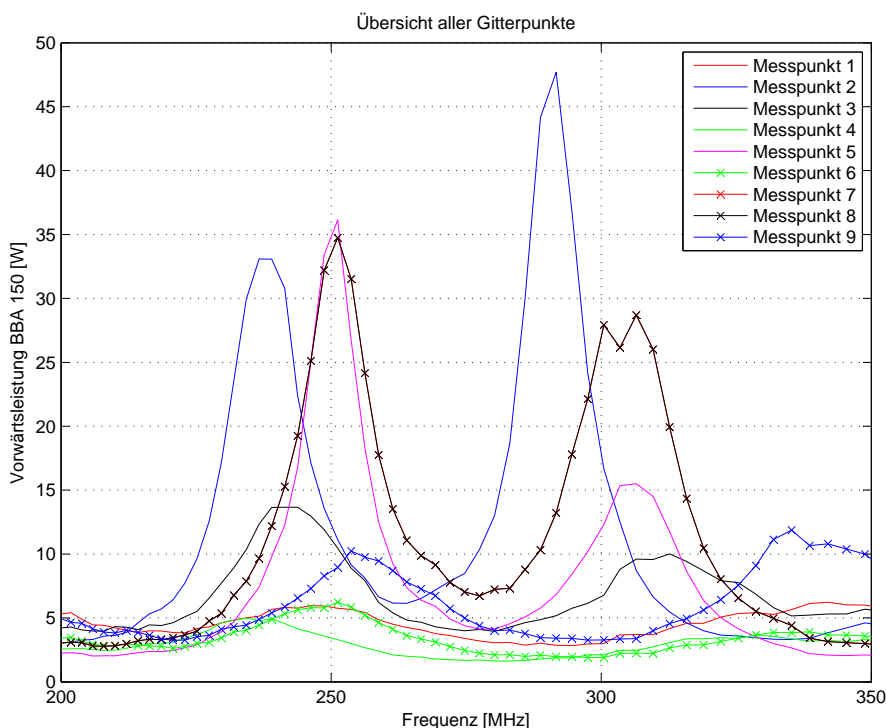


Abbildung 5.25: Darstellung der zugeführten Leistung aller Gitterpunkte

Hier ist zu sehen, dass die Punkte zwei sowie fünf und acht im dargestellten Frequenzbereich eine erhöhte Senderausgangsleistung benötigen für die Erzeugung der gewünschten Feldstärke von 6 V/m. Die notwendige Leistung der übrigen Gitterpunkt liegt im Frequenzbereich von 200 MHz bis 350 MHz unterhalb von 15 W. Diese Unterschiede bewirken die, in der Auswertung der Feldhomogenität auffälligen Unterschiede.

Die Auswertung der Feldhomogenität für die Messanordnung mit der vorgeschobenen Antenne wird in Abbildung 5.26 dargestellt.

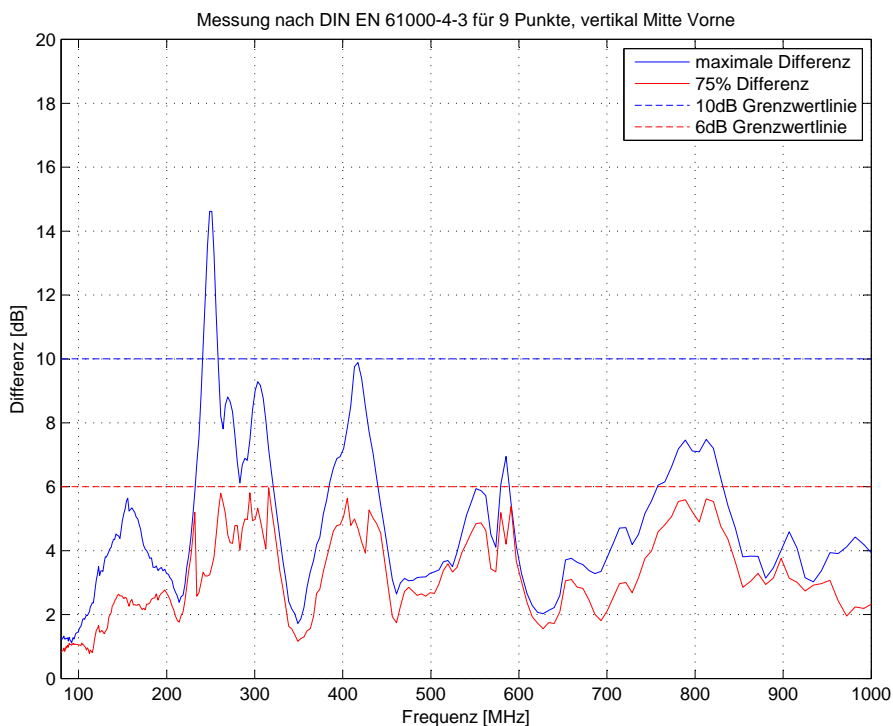


Abbildung 5.26: Auswertung zur Messung der Homogenität 1 qm, mitte vorne

Das Auswertungsergebnis zeigt, dass die Feldhomogenität für die vertikale Polarisation zu 100 % erreicht wird. Demzufolge befindet sich kein Frequenzpunkt oberhalb der Toleranz von 6 dB beziehungsweise ist größer als 10 dB. Für die horizontale Polarisation zeigt die Auswertung eine Feldhomogenität von 96,5 %. Dies bedeutet, dass die Grenzwerte für die weiteren Bereiche überschritten werden. Alle Frequenzpunkte, die den Toleranzbereich von 0 - 6 dB nicht erreichen, finden sich im Bereich von 6 - 10 dB wieder. Eine Übersicht der Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung nach EN 61000-4-3 ist in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 5.13: Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für 9 Punkte, Antennenposition 4

Polarisation	0 - 6 dB [%]	6 - 10 dB [%]	>10 dB [%]	hält die Grenzwerte ein
vertikal	100	0	0	Ja
horizontal	96,5	3,5	0	Nein

5.3.10 Messung der Feldhomogenität für 9 Punkte, 50 MHz bis 250 MHz

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Messung der Feldhomogenität für den Frequenzbereich von 50 bis 250 MHz beschrieben.

Die zuvor behandelten Untersuchungen zeigten jeweils den Aufbau von Absorbern sowie der Gitterstruktur im Frequenzbereich von 80 MHz bis 1000 MHz. Grund für die Aufteilung auf zwei Frequenzbereiche ist die Verwendung von zwei Verstärkern des Typs BBA150. In Tabelle A.4 sind die zwei Verstärker mit Nummer eins und zwei aufgelistet.

Sie unterscheiden sich in Leistung sowie Frequenzbereich. Im Folgenden wird der Breitbandverstärker mit der Nummer eins verwendet und kann im Frequenzbereich von 9 kHz bis 250 MHz eingesetzt werden. Es ist darauf zu achten, dass der Einsatzbereich von der Sendeantenne beschränkt wird. Die Kalibrierung der Sendeantenne HL 562e ist für den Frequenzbereich von 30 MHz bis 6000 MHz gültig und ausschließlich für diesem Bereich zu verwenden.

Der Aufbau innerhalb der Absorberkabine hat sich indes nicht verändert. Die Auswertung der Feldhomogenität wird wie zuvor über neun Punkte gefertigt. Die neun Punkte überdecken dabei eine Fläche von einem Quadratmeter. Die Entfernung zwischen Sendeantenne und gleichförmigem Feldbereich befindet sich weiterhin auf drei Meter. Die Auswertung dieser Messung ist in folgender Abbildung dargestellt:

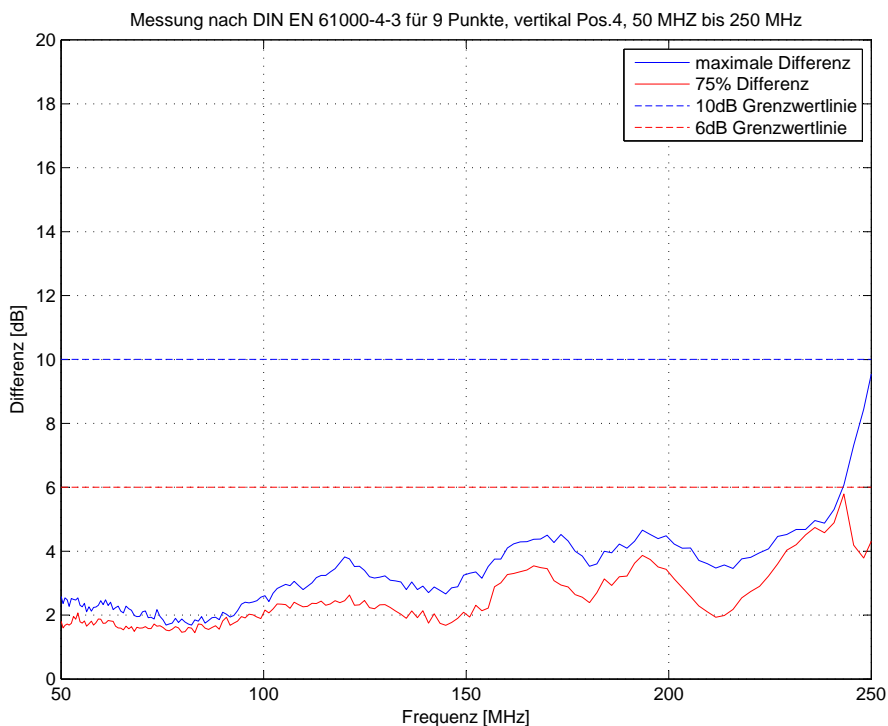


Abbildung 5.27: Auswertung zur Messung der Homogenität 1 qm, Position 4 50 MHz bis 250 MHz

Aus Abbildung 5.27 ist zuerkennen, dass sich die reduzierte Leistung zu keinem Zeitpunkt oberhalb der 6 dB Grenzwertlinie befindet. Die Schlussfolgerung aus dieser Erkenntnis ist, dass 100 % der Frequenzpunkte innerhalb des Toleranzbereiches von 0 - 6 dB liegen. Somit werden die Kriterien der Norm DIN EN 61000-4-3 erfüllt.

Die Ergebnisse aus der Homogenitätsbetrachtung werden zusammen mit dem Ergebnis der horizontalen Polarisation in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 5.14: Ergebnisse der Feldhomogenitätsauswertung für 9 Punkte, Antennenposition 4, 50 MHz bis 250 MHz

Polarisation	0 - 6 dB [%]	6 - 10 dB [%]	>10 dB [%]	hält die Grenzwerte ein
vertikal	100	0	0	Ja
horizontal	97,5	2,5	0	Ja

5.3.11 Zusammenfassung

Im Abschnitt 5.3 wurde die verwendete Laboreinrichtung auf das Kriterium der Homogenität untersucht. Als Grundlage für den Ablauf und Auswertung der Messung dient die DIN EN 61000-4-3 (VDE 0847-4-3):2011-04.

Zunächst wurde der in der Norm vorgeschriebene Aufbau mit der momentanen Ausstattung untersucht. In diesem Fall befanden sich keine Absorber auf dem Boden zwischen Antenne und GFB. Die Auswertung ergab, dass die Kriterien aus der Norm nicht eingehalten werden. Zur Verbesserung der Homogenität wurden weitere Absorber auf dem Boden platziert. Nun befand sich ein geschlossener Ring aus Absorberpyramiden zwischen Sendeannten und GFB.

Eine Messung über vier Gitterpunkte ergab, dass 100 % der Frequenzpunkte eine Abweichung im Bereich von 0 - 6 dB aufweisen und somit alle Grenzwerte erfüllen. Im Anschluss wurde abermals eine Messung über 16 Gitterpunkte vorgenommen. Die Auswertung zeigte, dass sich eine Verbesserung zum Aufbau ohne geschlossenen Ring eingestellt hat. Dennoch konnte dieser Aufbau die Kriterien der geltenden Normen nicht einhalten. Im Weiteren wurde der Aufbau der Absorberkabine angepasst. Dies bedeutet zugleich, dass der normenkonforme Aufbau nicht umgesetzt wurde. Als Ergebnis der Maßnahme wurde gezeigt, dass so die Kriterien für die vertikale Polarisation eingehalten werden.

Im Folgenden Abschnitt wurde die größte Veränderung vorgenommen, ab Abschnitt 5.3.6 werden die Messwerte von der Rode & Schwarz Software aufgenommen und ausgewertet. Weiterhin wurde das Gitternetz auf neun Punkte reduziert. Die Veränderung entspricht den vom Hersteller der Absorberkabine zugesagtem GFB mit einer Fläche von einem Quadratmeter.

Die Auswertung ergab, dass die vertikale Polarisation die Normkriterien einhält. Dies wurde von der horizontalen Polarisation nicht erreicht. Bei der Auswertung der Versuche hat sich ein Frequenzbereich herauskristallisiert, in dem die Sendekette die Normkriterien nicht einhält. Für die Ursachensuche der Inhomogenität wurde die Sendeanenne auf vier Positionen verändert. Der Abstand zum GFB blieb dabei unverändert. Die Positionen der Sendeanenne befanden sich im Zentrum, als Referenz, links (Position 2), Mitte links (Position 3) sowie im Zentrum vorne (Position 4).

Die Idee hinter diesen Umbauten ist die Unterbrechung von Symmetrien innerhalb der Absorberkabine. Für die einzelnen Frequenzbereiche konnte dies erfolgreich durchgeführt werden. Die Verbesserung in einem Frequenzbereich ging jedoch zu Lasten anderer Frequenzbereichen, so dass weder bei Position links noch bei Position mitte links eine deutliche Verbesserung über alle Frequenzpunkten zuerkennen ist.

Die Auswertung des GFB bei Position vier zeigte das beste Ergebnis. Für diese Position befinden sich alle Frequenzpunkte bei vertikaler Polarisation im schärfsten Grenzbereich. Die Auswertung der horizontalen Polarisation weist eine Überschreitung des Grenzwertes an, was dazu führt, dass die Kriterien aus der geltenden Norm nicht eingehalten werden.

Weiterhin wurde zeigte, dass die Messung der Homogenität innerhalb der Absorberkabine im Frequenzbereich von 250 bis 300 MHz ortsabhängig ist.

5.4 Validierung der Messplatzdämpfung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des erforderlichen Prüfverfahrens für die Nutzung von Vollabsorberräumen nach DIN EN 61000-4-22: 2011-11 dargestellt. Diese Norm gilt dabei als Grundlage für den Messaufbau sowie die darauf folgende Auswertung. Mit der Validierung der Messplatzdämpfung werden die Funktionsanforderungen einer Absorberkabine hinsichtlich der Messung gestrahlter Störaussendungen sowie der Prüfung der Störfestigkeit beurteilt.

Die Messung der Messplatzdämpfung geht auf die Idee eines Vierpol-Systems zurück. Hier wird anstelle des Prüflings eine weitere Antenne positioniert. Zwischen diesen zwei Antennen beziehungsweise den zwei Toren, kann die Dämpfung bestimmt werden. Die Antennenfaktoren der Sende- sowie Empfangsantenne werden vernachlässigt und führt zur normalisierten Messplatzdämpfung, siehe [CIS08, S. 33].

Die Dämpfung wird als Messplatzdämpfung bezeichnet und ist somit ein Gütekriterium eines Messplatzes, unabhängig ob FAR oder SAC.

Kernpunkt dieser Validierung ist das Wandlungsmaß des Systems, C_{dB} welches in dB(1/m) angegeben wird. Das Wandlungsmaß des Systems kann auch als erweiterter Antennenfaktor beschrieben werden, da es Komponenten, wie zum Beispiel die Dämpfung der Zuleitung der Absorberkabine beinhaltet.

Im Allgemeinen wird das Wandlungsmaß wie folgt beschrieben

$$C_{dB} = 20 \cdot \log(f_{MHz}) - 15 - 10 \cdot \log\left(\frac{d_x^2}{P_{fn,x}}\right) \quad (5.14)$$

Dabei ist

- x : einzelne Position
- f_{MHz} : Frequenz [MHz]
- d_x : Abstand zwischen Sende- und Messantenne
- $P_{fn,x}$: Normalisierte Vorwärtsleistung

$$P_{fn,x} = \frac{P_{f,x}}{E_x^2} \quad (5.15)$$

Dabei ist

- $P_{f,x}$: Vorwärtsleistung am Wandlungsmaß-Bezugspunkt P_{TR} [W]
- E_x : elektrische Feldstärke [V/m]

Weiteres zum Wandlungsmaß sowie die Auswertung findet sich im Abschnitt 5.4.3.

5.4.1 Prüfaufbau sowie Messorte

In der Norm DIN EN 61000-4-22 werden vier verschiedene Aufbauten beschrieben. Je nach Ausstattung kann so zwischen den einzelnen Bautypen gewählt werden. In dieser Arbeit wird ausschließlich der, in der Norm als Typ 1 bezeichnete Aufbau verwendet. Dieser Aufbau sieht die Verwendung eines Signalgenerators, eines Verstärkers sowie einer Feldsonde vor. Für die Überprüfung der Senderausgangsleistung steht dem Prüfer die Nutzung eines Spektrumanalysators bzw. die Verwendung eines Leistungsmessgerätes frei.

Abbildung 5.28 zeigt den umgesetzten Aufbau der Messeinrichtung nach Typ 1 der Norm DIN EN 61000-4-22.

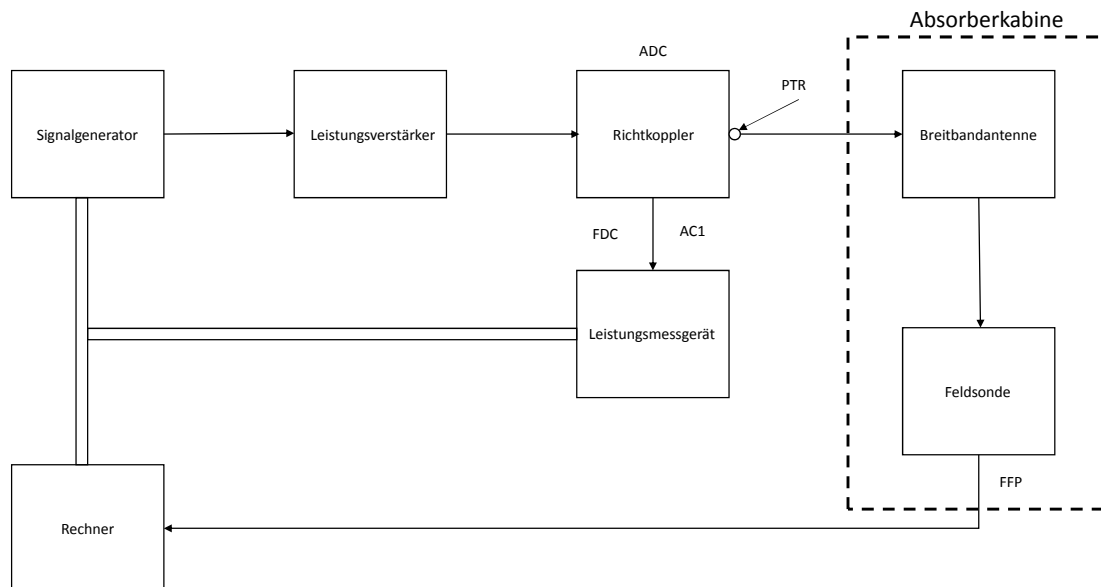


Abbildung 5.28: Aufbau der Messeinrichtung nach Typ 1 der Norm DIN EN 61000-4-22 [DIN11c, S. 11]

Dabei ist

- AC1: Kabeldämpfung zwischen Richtkoppler und Leistungsmessgerät [dB]
- FFP: Kalibrierfaktor der Feldsonde
- ADC: Dämpfung zwischen Ein- und Ausgang des Richtkopplers [dB]
- FDC: Kopplungsverluste zwischen Ein- und Ausgang des Richtkoppler [dB]
- PTR: Wandlungsmaß-Bezugspunkt

Folgende Tabelle listet die verwendeten Geräte auf. Wird der Aufbau verändert muss die Validierung erneut durchgeführt werden.

Tabelle 5.15: Geräte für den Validierungsaufbau der Messplatzdämpfung

Nr.	Hersteller	Typ	Bezeichnung
1	Rode & Schwarz	BBA150	Breitbandverstärker 80 MHz-1 GHz
2	Rode & Schwarz	SMC100A	Signalgenerator
3	Rode & Schwarz	HL562e	Log.-Periodische Diploantenne
4	NARDA	PMM EP601	Elektrische Feldsonde
5	Rode & Schwarz	NRP-Z81	Breitband-Leistungsmesskopf

Für die Auswertung der Messplatzdämpfung werden 15 Messpunkte benötigt. Diese sind über drei Ebenen verteilt. Auf jeder Ebene befinden sich je fünf Messpunkte. Die Platzierung der Messpunkte befinden sich vorne, rechts, hinten, links und in der Mitte. Zusammen mit den zwei weiteren Ebenen bilden diese Punkte einen Zylinder. Im Weiteren wird dieser Zylinder als Prüfvolumen bezeichnet. Dieses Prüfvolumen beinhaltet die größten Abmessungen eines Prüflings. Die Beschreibung für die Abmessungen des Prüfvolumens der Absorberkabine der HAW ist in Tabelle 5.16 festgelegt. Diese Angaben beziehen sich, mit Ausnahme des Durchmessers, auf die Höhe über Grund.

Tabelle 5.16: Abmessungen des Prüfvolumen der Absorberkabine

Abmessung	Einheit [m]
Durchmesser	1,20
unterste Ebene	0,40
Zentrum des Prüfvolumens	1,30
oberste Ebene	2,15

Die daraus resultierenden Positionen der Feldsonde sind in Abbildung 5.29 dargestellt.

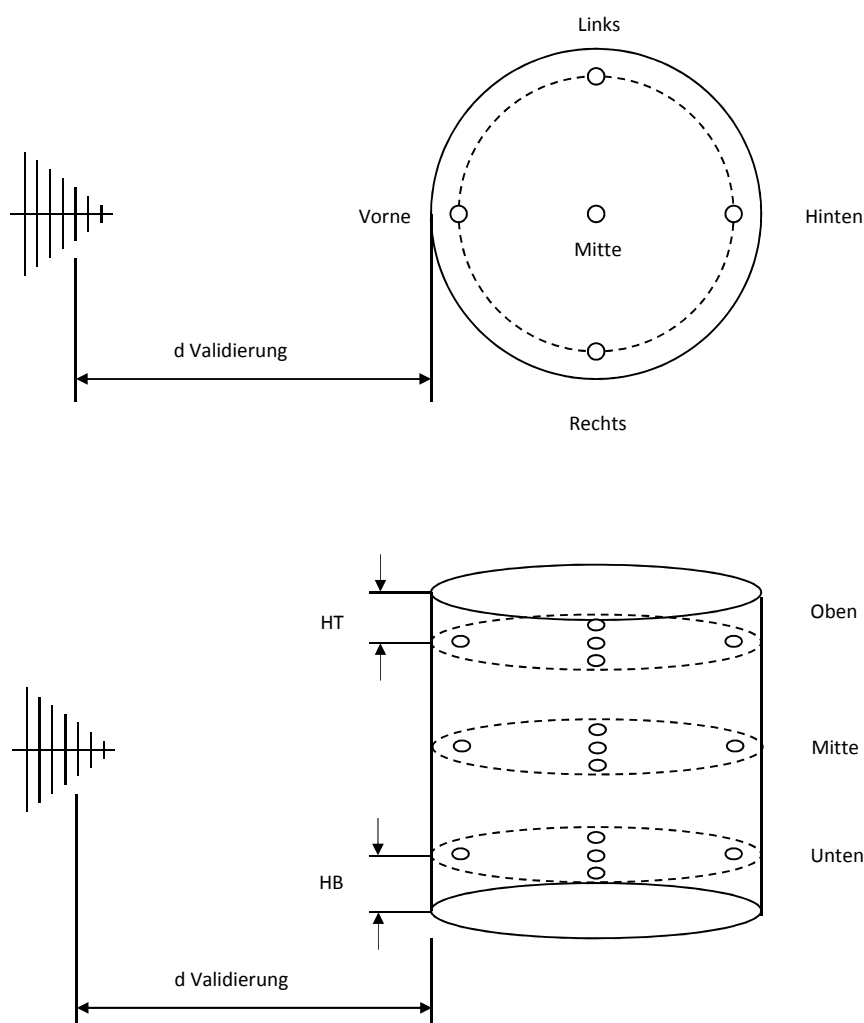


Abbildung 5.29: Aufbau des Prüfvolumens in der Absorberkabine [DIN11c, S. 19]

Diese Werte ergeben sich aus den Vorgaben der Norm. In der Norm DIN EN 61000-4-22 wird beschrieben, dass die unterste Ebene 25 % der Höhe des Prüfvolumens betragen muss. Weiterhin muss die mittlere Höhe 50 % des Prüfvolumens betragen. Der Abstand zwischen Decke und Prüfvolumen muss ebenfalls 25 % der Höhe des Prüfvolumens betragen.

5.4.2 Messung

Die Messung erfolgt wie in Norm DIN EN 61000-4-22 beschrieben. Der Ablauf ist im Detail in dieser Norm nachzulesen. Im Folgenden wird ein vereinfachter Ablauf dargestellt. Zunächst wird am Signalgenerator die erste Frequenz eingestellt. Während der gesamten Messung wird ohne Modulation gearbeitet, was bedeutet, dass ein Dauerstrichpegel eingestellt ist. Zudem muss die gesamte Sendekette so eingestellt sein, dass der Verstärker nicht in Sättigung gerät. Sind die Bedienungen gegeben, müssen folgende Werte festgehalten werden.

- Leistung am Leistungsmessgerät [dBm]
- die von der Feldsonde gemessene Feldstärke [dB μ V(1/m)]
- Frequenz [MHz]
- Abstand zwischen Sendeantenne und Feldsonde

Sobald die Werte aufgezeichnet sind, wird die Frequenz am Signalgenerator erhöht. Die Erhöhung der Frequenz darf 1 % der aktuellen Frequenz nicht überschreiten.

Die Schritte werden solange durchgeführt, bis die letzte interessierende Frequenz erreicht ist. Im Anschluss wird die Polarisation der Sendeantenne geändert und alle Frequenzen werden erneut untersucht. Die Messungen müssen für beide Polarisation und alle Messpunkt durchgeführt werden.

In der Norm wird beschrieben, dass zunächst alle Messpunkte mit einer festen Polarisation gemessen werden. Hier weicht der verwendete Messablauf von der Norm ab. Die Veränderung der Polarisation der Antenne erfolgt automatisch und führt hier zu einer Zeitersparnis, wenn vor dem Umbau beide Polarisationen gemessen werden.

5.4.3 Auswertung

In diesem Abschnitt wird die Auswertung der Messplatzdämpfung nach DIN EN 61000-4-22 beschrieben. Wie eingangs erwähnt, ist Kern der Messplatzdämpfung das Wandlungsmaß des Systems, welches als C_{dB} beschrieben wird. Die allgemeine Form dieses Maßes ist in Gleichung 5.14 dargestellt. Die Norm gibt für die Auswertung des Validierungsaufbaus ein erweitertes Wandlungsmaß an. Die nun vorgegebene Gleichung zur Berechnung des Wandlungsmaßes lautet:

$$C_{dB,x} = 20 \cdot \log(f_{MHz}) - 15 - 20 \cdot \log(d_x) + P_{f,ind,x} - 30 + AC1 + FDC - ADC - 20 \cdot \log(FFP \cdot E_{ind,x}) \quad (5.16)$$

Diese Gleichung berücksichtigt nun die Faktoren, die zur Fehleinschätzung der Bezugsspannung am Antennenfußpunkt führen würden. Die Faktoren wie Dämpfungsverlauf der Verkabelung sind bekannt, deshalb wird auf diese nicht weiter eingegangen. Die Faktoren des Richtkopplers wurden ausgemessen und in der Messung berücksichtigt.

Mit Gleichung 5.16 entsteht für jeden Messpunkt sowie für jede Frequenz ein Wandlungsmaß. Aus diesen einzelnen Wandlungsmaßen kann der Mittelwert wie folgt gebildet werden

$$\bar{C}_{dB} = \sum_{x=1}^n \frac{C_{dB,x}}{n} \quad (5.17)$$

Dabei ist

n: die Anzahl der Messpunkte

Auf die Berechnung des Mittelwertes des Wandlungsmaßes folgt die Bestimmung der Standardabweichung.

$$S_{dB,C} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{x=1}^n (C_{dB,x} - \bar{C}_{dB})^2} \quad (5.18)$$

Aus der Standardabweichung kann mit Gleichung 5.19 die Standardabweichung des mittleren Wandlungsmaßes bestimmt werden.

$$S_{dB,\bar{C}} = \frac{S_{dB,C}}{\sqrt{n}} \quad (5.19)$$

Die Standardabweichung des mittleren Wandlungsmaßes findet Verwendung in der Abschätzung der Messunsicherheit. Dieser Faktor wird für jede Polarisation separat berechnet. Die Norm gibt als Validierungskriterium folgende Werte vor:

Tabelle 5.17: Anforderung zur Validierung [DIN11c, S. 22]

Frequenzbereich	Validierungskriterium
30 MHz bis 1 GHz	$S_{dB,C} \leq 1,8$ dB für sämtliche 15 Messpunkte
1 GHz bis 18 GHz	$S_{dB,C} \leq 1,8$ dB für sämtliche 15 Messpunkte ODER die beiden nachfolgenden Kriterien müssen erfüllt werden: $S_{dB,C} \leq 3$ dB für sämtliche 15 Messpunkte und $S_{dB,C} \leq 1,8$ dB für die 10 Messpunkte in der oberen und in der mittleren Ebene des Prüfvolumens

Dargestellt werden die Ergebnisse der Standardabweichung sowie der Standardabweichung des mittleren Wandlungsmaßes in den folgenden Abbildungen.

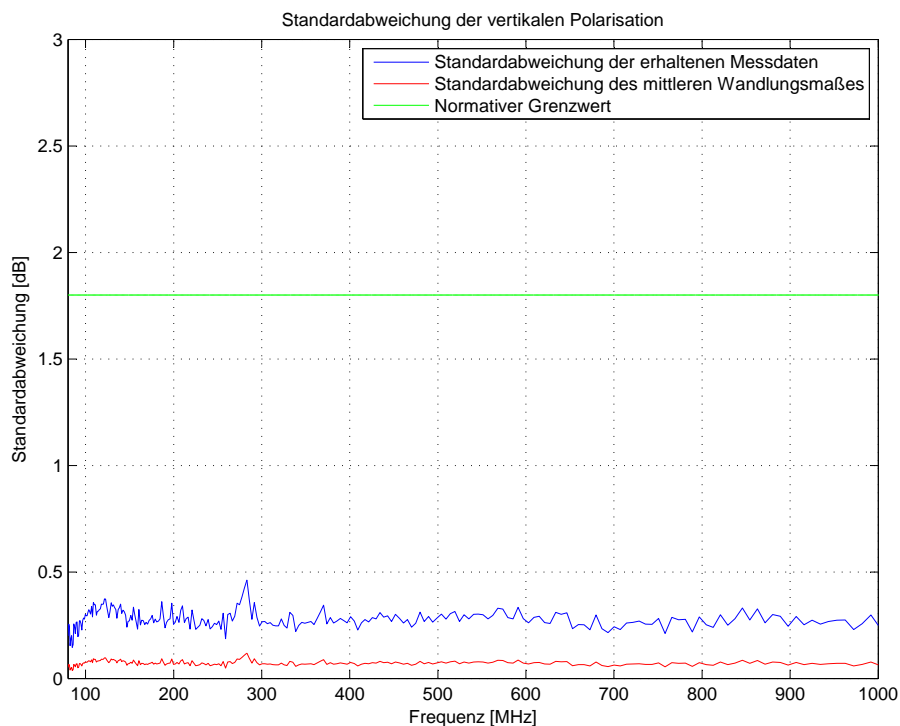


Abbildung 5.30: Auswertung der Messplatzdämpfung nach DIN EN 61000-4-22, vertikale Polarisation

In Abbildung 5.30 ist zu sehen, dass die Standardabweichung über alle Frequenzbereiche unterhalb des Validierkriteriums der Norm liegt. Weiterhin zeigt die Auswertung im Frequenzbereich um 260 MHz eine Erhöhung der Standardabweichung. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen, die im Abschnitt 5.3.1 erworben wurden. In jenem Abschnitt wurde festgestellt, dass die Absorberkabine Schwächen der Homogenität im Bereich um 260 MHz aufweist.

Die nachfolgenden Abbildung zeigt die Auswertung der Messplatzdämpfung für horizontale Polarisationen. Dort ist zusehen, dass die horizontale Polarisation eine Erhöhung der Standardabweichung im Frequenzbereich um 400 MHz aufweist. Auch bei horizontaler Polarisation werden die die Kriterien der geltenden Norm erfüllt.

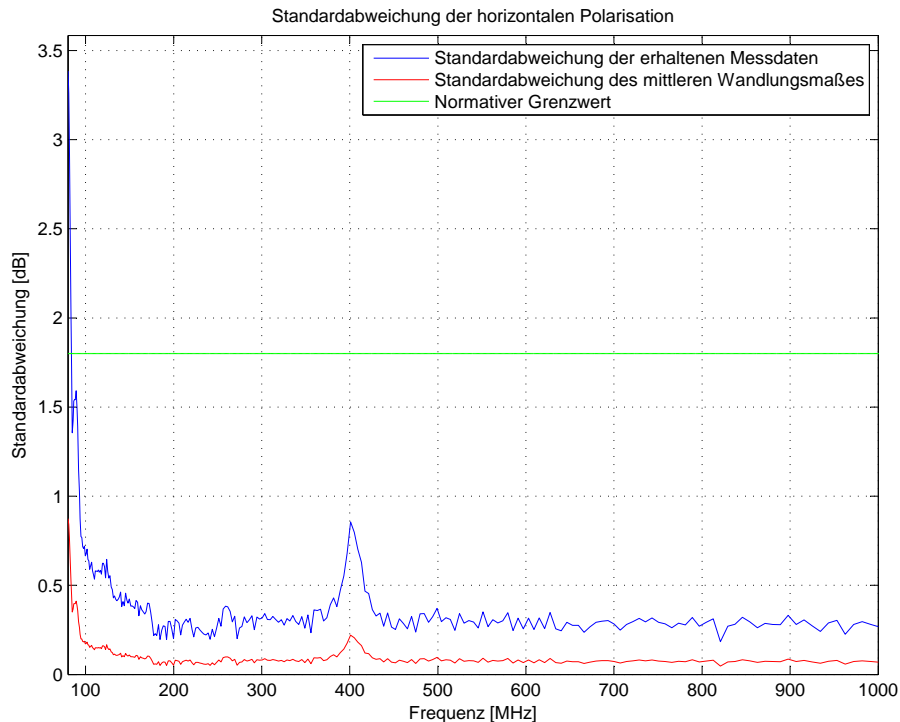


Abbildung 5.31: Auswertung der Messplatzdämpfung nach DIN EN 61000-4-22, horizontale Polarisation

5.4.4 Verfahren zum Nachweis der Sättigungsfreiheit

Werden beim Prüfablauf die spezifischen Eigenschaften der Geräte nicht berücksichtigt, so kann dies zur Verfälschung des Messergebnisses führen. Wird ein Verstärker in Sättigung betrieben, sind die Messergebnisse nicht von weiterer Bedeutung.

Im Folgenden wird ein Verfahren beschrieben, welches nachweist, dass der verwendete Leistungsverstärker nicht in Sättigung betrieben wurde.

Das Verfahren wird jeweils für den höchsten Prüfpegel durchgeführt. Zunächst wird der Prüfaufbau, wie in Abbildung 5.28 dargestellt. Für die Feldsonde PMM EP601 wird die Sonde EMR-200 verwendet.

Die Prüfung beginnt mit der Einstellung der ersten Frequenz, in diesem Fall mit 80 MHz. Anschließend muss die notwendige Vorwärtsleistung berechnet werden. Die Leistung $P_{f,t,dBm}$ kann, wie in Gleichung 5.20 beschrieben, aus dem mittleren Wandlungsmaß \bar{C}_{dB} bestimmt werden.

$$P_{f,t,dBm} = 45 + 20 \cdot \log(E_{Prüf}) + 20 \cdot \log(d_{Mess}) - 20 \cdot \log(f_{MHz}) + \bar{C}_{dB} \quad (5.20)$$

Dabei ist

- $E_{Prüf}$: die als Prüfpegel für die Störfestigkeitsprüfung vorgesehene Feldstärke [V/m]
- d_{Mess} : der Abstand zwischen dem Bezugspunkt der Breitbandantenne und der am nächsten gelegenen Oberfläche des Prüflings [m]
- f_{MHz} : die Frequenz [MHz]
- \bar{C}_{dB} : das mittlere Wandlungsmaß des Systems [dB/m]

Der Signalgenerator wird anschließend so eingestellt, dass die berechnete Vorwärtsleistung am Wandlungsmaß-Bezugspunkt (siehe Abbildung 5.28) eingestellt ist. Die eingestellte Senderausgangsleistung wird aus dem Verstärker ausgelesen und aufgezeichnet. Nun wird die Leistung um 5,1 dB erhöht. Die Erhöhung entspricht der Spitzenleistung eines 80 % AM modulierten Signals. Die neue Leistung wird ebenfalls aufgezeichnet. Die Messungen müssen für alle genutzten Frequenzen und Polarisierungen durchgeführt werden.

In der Auswertung wird die Differenz der aufgezeichneten Vorwärtsleistungen gebildet. Laut Norm dürfen die Differenzen im Bereich von 3,1 dB bis 7,1 dB schwanken. Folgende Abbildung zeigt den Verlauf der Leistungsunterschiede über alle Frequenzen.

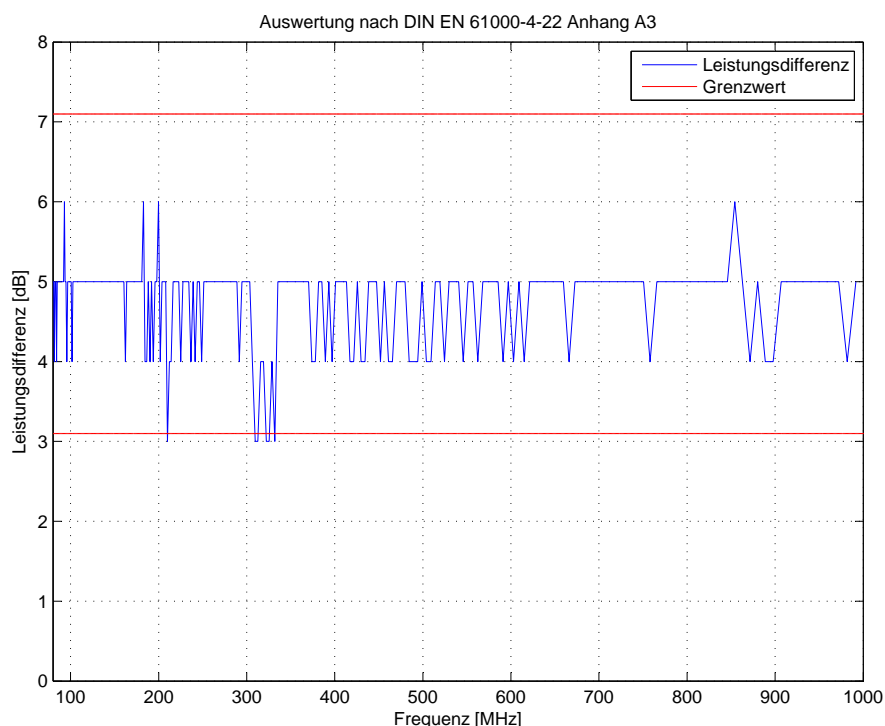


Abbildung 5.32: Auswertung zur Prüfung auf Sättigung

Abbildung 5.32 zeigt, dass die Differenzen zwischen ganzen Zahlen schwanken. Die Schwankung liegt an der Leistungsausgabe des Verstärkers, da die Leistungsausgabe nur ganze dB-Werte ausgibt.

Weiterhin ist zu sehen, dass die Differenz an einigen Stellen unterhalb des Grenzwertes von 3,1 dB bei 3 dB liegt. Dennoch zeigt die Auswertung, dass der verwendete Verstärker während der Messung nicht in Sättigung geraten ist. Das der Verstärker nicht in Sättigung geraten ist lässt sich an den abgespeicherten Vorwärtsleistung verdeutlichen. Hier liegt die maximale Vorwärtsleistung bei ca. 140 W. Der Verstärker BBA150, Geräteliste A.4 Nr.2, ist mit einer Verstärkerleistung von 300 W spezifiziert.

5.4.5 Zusammenfassung

Abschnitt 5.4 zeigte die Validierung der Absorberkabine nach dem Kriterium der Messplatzdämpfung. Die Messungen, Messaufbauten sowie die daraus folgenden Auswertungen beruhen auf der Norm DIN EN 61000-4-22:2011.

Der Aufbau sowie die Anordnung von Messpunkten ist in der Norm festgelegt. Die Anordnung der Sondenpositionen ergeben einen Zylinder, bestehend aus 15 Messpunkten. Dieser Zylinder beinhaltet die größten Abmessungen späterer Prüfobjekte. Für die Absorberkabine der HAW beträgt der Durchmesser des Volumens 1,2 m.

Für die Messung wurde die in der Norm als Typ 1 bezeichnete Messkette verwendet. Diese Messkette besteht aus Signalgenerator, Leistungsverstärker, Leistungsmessgerät und Sendeantenne. Die Messung der elektrischen Feldstärke an den verschiedenen Messpunkten wurde durch eine elektrische Feldsonde realisiert.

Im Kern der Auswertung steht das Wandlungsmaß, welches auch als erweiterter Antennenfaktor bezeichnet werden kann. Das Wandlungsmaß beinhaltet alle Faktoren, wie Kabeldämpfungen vom Ausgang des Leistungsverstärkers bis zum Fußpunkt der Antenne. Als Bezugspunkt des Wandlungsmaßes wird die Vorwärtsleistung nach dem Richtkoppler genommen.

Auf Basis der einzelnen Wandlungsmaße wird das mittlere Wandlungsmaß bestimmt. Zusammen mit dem Wandlungsmaß wird aus daraus die Standardabweichung bestimmt. Für die Standardabweichung wird in der Norm ein Grenzwert definiert und befindet sich bei 1,8 dB für den Frequenzbereich von 30 MHz bis 1000 MHz. Als Letztes wird aus der Standardabweichung die Standardabweichung des mittleren Wandlungsmaßes festgelegt. Dieser Wert wird für weitere Messunsicherheitsbetrachtungen benötigt.

Die Auswertung der Standardabweichung des mittleren Wandlungsmaßes zeigte, dass die von der Norm geforderten Grenzwerte eingehalten werden.

In diesem Abschnitt wurde ein weiterer Punkt behandelt, der sich mit dem Nachweis befasst, dass der Verstärker während der Messung nicht in Sättigung geraten ist.

Für diesen Nachweis ist das mittlere Wandlungsmaß aus der vorherigen Validierung nötig. Es wird die Vorwärtsleistung am Bezugspunkt des Wandlungsmaßes berechnet. Anschließend wird die Messkette so eingestellt, dass diese Leistung am Bezugspunkt anliegt. Nun wird die Leistung um einen definierten Wert erhöht. Aus der Differenz dieser Leistungen kann die Schlussfolgerung gezogen werden, ob sich der Leistungsverstärker während der Messung in Sättigung befunden hat.

Die Auswertung an diesem Punkt ist nicht zufriedenstellend, da nur ganzzahlige Vorwärtsleistungen aufgenommen werden konnten. Es befanden sich sechs der 254 Messwerte um 0,1 dB außerhalb des Grenzwertes. Es ist dennoch davon auszugehen, dass der Verstärker nicht in Sättigung geraten ist, da die maximal verzeichnete Vorwärtsleistung bei der Hälfte der maximalen Vorwärtsleistung des Verstärkers lag.

6 Messunsicherheit

Ein wichtiger Punkt für eine Beanstandung eines Prüflings, bzw. die Aussage ob ein Prüfling die geltenden Richtlinien und Grenzwerte einhält, ist die Berücksichtigung der Messunsicherheit. Ohne Messunsicherheit beschreibt die Messung lediglich einen Wert ohne jeden weiteren Bezug. Im folgenden wird die Messunsicherheit zwischen Störstrahlung und Störfestigkeit separat untersucht.

6.1 Messunsicherheit Störstrahlung

Das Verfahren sowie die Anforderungen an die Geräte einer Störstrahlung werden in der Norm DIN EN 55016-4-2:2011 + A1:2014 beschrieben. Die Norm DIN EN 55016-4-2 dient im folgenden als Grundlage für die Messunsicherheitsbetrachtungen der Absorberkabine der HAW bei Störstrahlungsmessungen.

Die Messunsicherheit berücksichtigt die Standardmessunsicherheit sowie die Empfindlichkeitskoeffizienten für jeden Schätzwert. Die dadurch ermittelte kombinierte Standardmessunsicherheit wird wie Folgt ermittelt

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_i c_i^2 u^2(x_i)} \quad (6.1)$$

Dabei ist

- $u(x_i)$: Standardunsicherheit [dB]
- c_i : Empfindlichkeitskoeffizient
- x_i : Schätzwert jeder Größe
- $u_c(y)$: kombinierte Standardunsicherheit [dB]
- y : Schätzwert der Messgrößen

Die erweiterte Messunsicherheit U_{lab} der Messeinrichtung eines Prüflabors muss für jede Art der Messung berechnet werden. Im Folgendem weicht die nachfolgende Gleichung von der Norm ab, da eine Standardunsicherheit von 95 % angenommen wird. Für die erweiterte Messunsicherheit entspricht dies folgender Gleichung:

$$U_{lab} = U(y) = 1,96 \cdot u_c(y) \quad (6.2)$$

Laut Norm wird die erweiterte Messunsicherheit mittels Multiplikation mit dem Faktor zwei gebildet. Die Multiplikation führt zu einer Standardabweichung von 95,45 %, weshalb von diesem Faktor Abstand genommen und auf den, in der Praxis üblichere Wert von 95 % zurück gegriffen wird.

In der nachfolgenden Tabelle werden die entsprechenden Parameter für die Ermittlung der kombinierte Standardunsicherheit aufgelistet. Die Parameter werden für zwei Frequenzbereich aufgeführt. Zum einen für den Frequenzbereich von 200 MHz bis 1000 MHz für logarithmisch periodische Dipolantennen. Zum anderen von 30 MHz bis 200 MHz für bikonische Antennen. Die von der HAW verwendete Antenne HL562e ist eine logarithmisch periodische Antenne die jedoch für den Frequenzbereich von 30 MHz bis 6000 MHz spezifiziert ist. Die folgenden Tabelle ist für die Anwendung des gesamten Frequenzbereich ausgelegt.

Tabelle 6.1: Parameter für die Messunsicherheitsberechnung [DIN14d, Tabelle D6]

Eingangsgröße	Unsicherheit		$c_{iu}(x_i)$ 30 - 200 MHz [dB]	$c_{iu}(x_i)$ 200 - 1000 MHz [dB]	Art der Antenne
	Schätzwert [dB]	Wahrschein- lichkeits- funktion			
Messempfänger- anzeige	$\pm 0,1$	k = 1	0,10	0,10	
Dämpfung: Antenne – Empfänger	$\pm 0,2$	k = 2	0,10	0,10	
Antennenfaktor der LPDA	$\pm 2,0$	k = 2	1,00	1,00	
Messempfänger- korrekturen:					
Sinusspannung	$\pm 1,0$	k = 2	0,50	0,50	
Pulsamplituden- genauigkeit	$\pm 1,5$	Rechteck	0,87	0,87	
Pulsbewertung	$\pm 1,5$	Rechteck	0,87	0,87	
Rauschen	+0,5/0,0 +0,7/0,0	Rechteck	0,29	0,40	bikonisch Log- Per
Fehlanpassung: Antenne – Empfänger	+0,9/ – 1,0	U-Förmig	0,67	0,67	
Korrekturen der LPDA:					
Antennenfaktor - Frequenzinterpolation	$\pm 0,3$	Rechteck	0,17	0,17	
Variation des Antennefaktors aufgrund des Einflusses des FAR	$\pm 0,5$ $\pm 0,0$	Rechteck	0,29	0,00	bikonisch Log- Per
Richtwirkung- Unterschied	$\pm 0,5$ $\pm 1,0$	Rechteck	0,29	0,58	bikonisch Log- Per
Lage des Phasenzentrums	$\pm 0,0$ $\pm 1,0$	Rechteck	0,00	0,58	bikonisch Log- Per
Kreuzpolarisation	$\pm 0,0$ $\pm 0,9$	Rechteck	0,00	0,52	bikonisch Log- Per
Symmetrie	$\pm 0,5$ $\pm 0,0$	Rechteck	0,29	0,00	bikonisch Log- Per
Korrektur des Messplatzes:					
Unzulänglichkeiten des Messplatzes	$\pm 4,0$	Dreieck	0,87	0,87	
Einfluss des Materials des Prüflingstisches	$\pm 0,0$ $\pm 0,5$	Rechteck	0,00	0,29	bikonisch Log- Per
Messentfernung	$\pm 0,3$	Rechteck	0,17	0,17	
Höhe des Prüflingstisches	$\pm 0,0$ $\pm 0,1$	k = 2	0,00	0,05	bikonisch Log- Per

Wichtig bei der Untersuchung der Messunsicherheit ist die Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung bzw. Wahrscheinlichkeitsfunktion. Die Wahrscheinlichkeitsfunktion bestimmt die Gewichtung eines Wertes. Es werden für die Bestimmung der Messunsicherheit vier Wahrscheinlichkeitsfunktionen verwendet. Im Einzelnen werden die Normal-, Rechteck-, U- sowie Dreiecksverteilung verwendet.

Eine glockenförmige Verteilungsform ist bei der Normalverteilung zu finden. Die glockenförmige Verteilungsform wird auch als Gauß'sche Glockenkurve bezeichnet. Der Erweiterungsfaktor bei der Verteilungsform beträgt zwei. Wie oben beschrieben, besteht eine 95,45 %ige Wahrscheinlichkeit, dass sich der Messwerte in jener Verteilungsform befinden.

Ein anderer Ansatz wird bei der Rechteckverteilung verfolgt. Die Rechteckverteilung beschreibt obere sowie untere Grenzen, in denen sich die Messwerte gleichmäßig verteilen. Die Dreiecksverteilung wird charakterisiert durch die Bestimmung der Parameter der minimalste, maximale sowie der wahrscheinlichste Wert. Die direkte Verbindung jener Punkte zeichnet ein Dreieck ab. Bei der Dreiecksverteilung muss sich der wahrscheinlichste Wert nicht in der Mitte befinden.

Die U-förmige Verteilung zeigt jeweils zu Beginn und am Ende der Verteilungen ansteige. Im Gegensatz zur Dreiecksverteilung kann der Mittelwert keine Aussage treffen, da sich hier meist nicht ausreichend Messwerte befinden.

Die kombinierte Standardmessunsicherheit wird aus den Parametern der Tabelle 6.1 nach Gleichung 6.1 ermittelt. Das Ergebnisse der kombinierten Standardmessunsicherheit sowie die daraus resultierende, erweiterte Messunsicherheit ist für die unterschiedlichen Bereiche in Tabelle 6.2 hinterlegt.

Tabelle 6.2: Ergebnisse der Messunsicherheitsbetrachtung für Störstrahlung

	30 - 200 MHz	200 - 1000 MHz
kombinierte Standardmessunsicherheit [dB]	2,29	2,09
erweiterte Messunsicherheit [dB]	4,49	4,10

Um einen worst-case für Feldstärkemessungen abzubilden wird der höchste Wert der erweiterten Messunsicherheit gewählt. Nach Tabelle 6.2 wird somit eine erweiterte Messunsicherheit von 5,34 dB angenommen. Diese Unsicherheit muss für alle folgenden Störstrahlungsmessungen in der Absorberkabine berücksichtigt werden.

Aus [DIN14d, S.14] ergeben sich folgende Situationen, die die Einhaltung bzw. das Nichteinhalten eines Grenzwertes bestimmen. Demnach

- gilt der Grenzwert als eingehalten, wenn keiner der gemessenen Störaussendungspegel den Grenzwert überschreitet;
- gilt der Grenzwert als nicht eingehalten, wenn irgendeiner der gemessenen Störaussendungspegel den Grenzwert überschreitet.

6.2 Messunsicherheit Störfestigkeit

Im folgendem werden die Einflüsse zur Messunsicherheit bei Störfestigkeitsmessungen betrachtet.

Die Untersuchung der Messunsicherheit bei Störfestigkeitsmessungen unterscheidet sich

zur Messunsicherheit bei Störstrahlung, da die Auswertung der Störfestigkeit keinen numerischen Wert liefert. Die Prüfung der Störfestigkeit schließt mit dem Ergebnis "Bestanden" oder "Nicht Bestanden" ab. Die Unsicherheit bei Störfestigkeitsuntersuchungen ist abhängig von den jeweiligen Überwachungssystemen, die, je nach Prüfling, variieren. Im Folgenden wird ein Beispiel für die Einschätzung der Messunsicherheit gegeben.

Tabelle 6.3: Parameter für die Messunsicherheitsberechnung [DIN11c, Tabelle D1]

Eingangsgröße	Unsicherheit		$c_i u(x_i)$ 30 - 200 MHz [dB]
	Schätzwert [dB]	Wahrschein- lichkeits- funktion	
Messempfänger - korrekturen:			
Messempfänger- anzeige	0,10	k = 1	0,01
Sinusspannung	1,00	k = 2	0,25
Pulsamplituden- genauigkeit	1,50	Rechteck	0,75
Pulsbewertung	1,50	Rechteck	0,75
Rauschen	0,50	k = 2	0,06
Kabel			
Kabeldämpfung	0,30	k = 2	0,02
Fehlanpassung TRP- Empfänger	0,9/-1	U-verteilt	0,45
Wandlungsmaß des Systems			
Mittleres Wandlungsmaß des Systems	0,46	k = 1	0,87
Kalibrierung der Feldsonde	1,05	k = 2	0,50
Frequenzinterpolation	0,30	Rechteck	0,03
Richtkoppler, Kopplungsfaktor	0,80	k = 2	0,16
Richtkoppler, Einfügungsdämpfung	0,60	k = 2	0,09
Fehlanpassung: Richtkoppler - Leistungsmessgerät	0,9/-1	U-verteilt	0,45
Leistungsmessgerät	0,80	Rechteck	0,21
Prüfumgebung			
Abstand der Antenne	0,03	Rechteck	0,03

Die Messunsicherheit berechnet sich nun wie in Gleichung 6.1 und 6.2 beschrieben. Daraus folgt eine Messunsicherheit zu:

Tabelle 6.4: Ergebnisse der Messunsicherheitsbetrachtung für Störfestigkeit

	30 - 1000 MHz
kombinierte Standardmessunsicherheit [dB]	1,64
erweiterte Messunsicherheit [dB]	3,21

7 Fazit

7.1 Zusammenfassung

2015 begann die Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg mit dem Aufbau einer Vollabsorberkammer. Ziel dieser Arbeit war es diese Absorberkabine mit den notwendigen Messgeräten und Hilfsmitteln auszustatten, um den Betrieb dieser Einrichtung zu ermöglichen.

Während der Inbetriebnahme wurden die einzelnen Geräte, die Antennen, Übertragungswege und Kopplungen installiert und initialisiert.

Die Hauptaufgabe bestand jedoch darin, die Eigenschaften der Kabine herauszuarbeiten. Bei der Beurteilung der Messungen innerhalb der Absorberkabine halfen einzelne Validierungskriterien.

Ein wichtiges Kriterium einer Absorberkabine ist die Eigenschaft Signale von und nach außen abzuschirmen. Ausgedrückt wird diese Eigenschaft im Maß der Schirmdämpfung. Die Norm DIN EN 50147 galt bei der Bestimmung und Auswertung der Schirmdämpfung als normative Grundlage. Das Ergebnis der Auswertung zeigt, dass die Kriterien der Norm erfüllt werden.

Anhand von zwei Versuchen wurde die Qualität des Empfangsweges bestimmt. Im ersten Versuch wurde innerhalb der Absorberkabine ein definiertes Signal abgestrahlt und von der Messvorrichtung aufgenommen und ausgewertet. Gleichzeitig wurde anhand der Leistungsflussdichte bestimmt mit welcher Feldstärke das definierte Signal am Empfangsort gemessen wird.

Der Vergleich zeigte, dass die Abweichungen sich innerhalb der Messunsicherheit befinden. Im zweiten Versuch wurde in Zusammenarbeit mit dem Messlabor der Bundesnetzagentur in Kolberg eine Vergleichsmessung durchgeführt. Dabei wurde eine Strahlungsquelle in beiden Laboren untersucht und anschließend die Ergebnisse miteinander verglichen. Bei diesem Vergleich zeigte sich, dass die Unterschiede zwischen den Laboren die Messunsicherheit nicht überschreitet.

Ein Validierungskriterium der Sendeeinrichtung ist die Homogenität. Dieser Parameter gibt an, ob die Einrichtung in der Lage ist einen Prüfling mit einem homogenen Feld zu bestrahlen. Bei diesen Versuchen zeigte sich, dass aufgrund der Abmessungen der Absorberkabine Probleme im Frequenzbereich von 250 bis 300 MHz auftreten. Unterschiedliche Messanordnungen bewiesen, dass das erzeugte Feld stark ortsabhängig ist. Die letztendliche Position zeigte jedoch, dass die Einrichtung in der Lage ist bei vertikaler Polarisation ein gleichförmiges Feld zu erzeugen. Bei horizontalen Polarisation wurde der Grenzwert von 3,0 % um 0,5 % überschritten.

Die Messplatzdämpfung bildet den Abschluss der Validierung der Absorberkabine. 15 Positionen bilden einen Zylinder bzw. ein Volumen in dem sich später die größte Abmessung eines Prüflings befindet. Ziel dieses Messverfahrens ist es herauszuarbeiten, wie groß die Abweichungen der einzelnen Messpunkte zur Antenne sind. Die Auswertung ergab, dass die Grenzwerte für beide Polarisationen eingehalten werden.

Die Unsicherheitsbetrachtungen für das Messen und Aussenden von Signalen bilden den Abschluss dieser Arbeit. In diesem Kapitel werden die Einflüsse aufgelistet, die zu Messunsicherheiten bei Sende- und Messkette führen können. Aus der Gesamtheit der Einflüsse wurde die Messunsicherheit errechnet. Dabei ist zu beachten, dass die Messunsicherheit für Störfestigkeit unvollständig ist. An dieser Stelle müssen die Unsicherheiten der jeweiligen Überwachungsmechanismen zusätzlich berücksichtigt werden.

7.2 Schlussbetrachtung

Als persönliches Ziel dieser Abschlussarbeit stand zum einen die Vertiefung sowie der Ausbau meiner Kenntnisse im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit. Dies ist für mich von besonderem Interesse, da meine späteren Berufstätigkeiten im Bereich der EMV anzusiedeln sind. Ein weiteres Ziel war die Verbesserung des Umgangs mit Messtechnik.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte ich beide Ziele erreichen und zusätzlich meine Arbeitsweise mit wissenschaftlichen Texten verbessern.

Das fachliche Ziel dieser Arbeit war die EMV - Absorberkabine der Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg in Betrieb zu nehmen. Anhand der Messungen und der verschiedensten Validierungen zeigt diese Arbeit, dass das Ziel der Inbetriebnahme erreicht wurde. Weiterhin wurden alle gängigen Validierungsverfahren sowie zusätzliche Qualitätsnachweise für Absorberkabinen angewandt und ausgewertet. Die Absorberkabine ist in der Lage Störstrahlungen in einem Frequenzbereich von 30 MHz bis 6 GHz sowie Störfestigkeitsuntersuchungen im Bereich von 50 MHz bis 1 GHz vorzunehmen.

7.3 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit zeigte die Absorberkabine Schwächen im Frequenzbereich von 250 MHz bis 300 MHz. Ein möglicher Ansatz zum Herausarbeiten der Ursache stellt eine Simulation der Absorberkabine mittels geeignetem Programm dar. Diese Simulation kann ebenfalls Aufschluss über die Ortsabhängigkeit bei Aussendungen der Sendekette geben.

Einen weiteren Ausblick stellt die Entwicklung einer breitbandig angepassten und reflexionsfreien Antenne dar. Eine reflexionsfreie Antenne liefert Informationen über Reflexionen an den Absorbermaterialien innerhalb der Absorberkabine.

Momentan wird an der HAW am Bau eines Kammgenerator gearbeitet. Mit Hilfe des Kammgenerators ist es in Zukunft möglich Veränderungen der Absorberkabine zu verifizieren. Weiterhin kann ein breitbandiger Sender helfen in regelmäßigen Messungen die Qualität des Empfangsweges zu sichern.

A Anhang

A.1 Literaturverzeichnis

- [1] *Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder (BEMFV)*. Bundesnetzagentur, 2013. – ISBN 9783955217549
- [Bai14] BAISCH, Thomas: *EMV-Produktnormen- Messlösungen und deren Validierung*. Januar 2014
- [Bun] BUNDESNETZAGENTUR: Erläuterung der Bewertungsverfahren nach BEMFV.
- [CIS08] *CISPR 16-1-4 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus Ancillary equipment Radiated disturbances*. Januar 2008
- [CR00] CHRISTOPH RAUSCHER, Roland M. Volker Janssen J. Volker Janssen: *Grundlagen der Spektrumanalyse*. (2000)
- [DIN11a] *DIN EN 55011:2009 + A1:2010 Industrielle, wissenschaftliche und medizinische Geräte; Funkstörungen; Grenzwerte und Messverfahren*. April 2011
- [DIN11b] *DIN EN 55022 Einrichtungen der Informationstechnik Funkstöreigenschaften Grenzwerte und Messverfahren*. Dezember 2011
- [DIN11c] *DIN EN 61000-4-22 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV); Teil 4-22: Prüf- und Messverfahren; Messungen der gestrahlten Störaussendung und Prüfungen der Störfestigkeit gegen gestrahlte Störgrößen in Vollabsorberräumen*. November 2011
- [DIN12] *DIN EN 55014-1 Elektromagnetische Verträglichkeit Anforderungen an Haushaltgeräte, Elektrowerkzeuge und ähnliche Elektrogeräte Teil 1: Störaussendung*. Mai 2012
- [DIN13] *DIN EN 55013 Ton- und Fernseh-Rundfunkempfänger und verwandte Geräte der Unterhaltungselektronik Funkstöreigenschaften Grenzwerte und Messverfahren*. November 2013
- [DIN14a] *DIN EN 55015 Grenzwerte und Messverfahren für Funkstörungen von elektrischen Beleuchtungseinrichtungen und ähnlichen Elektrogeräten*. März 2014
- [DIN14b] *DIN EN 55016-2-1 Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit Teil 2-1: Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit Messung der leitungsgeführten Störaussendung*. Dezember 2014
- [DIN14c] *DIN EN 55016-2-3 Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit Teil 2-3: Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit Messung der gestrahlten Störaussendung*. November 2014
- [DIN14d] *DIN EN 55016-4-2 Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit Teil 4-2: Unsicherheiten, Statistik und Modelle zur Ableitung von Grenzwerten (Störmodell) Messgeräte Unsicherheit*. November 2014

- [DIN15a] *DIN EN 55016-1-1 Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit; Teil 1-1: Geräte und Einrichtungen zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit; Messgeräte.* Mai 2015
- [DIN15b] *DIN EN 55016-1-2 Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit Teil 1-2: Geräte und Einrichtungen zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit Koppeleinrichtungen zur Messung der leitungsgeführten Störaussendung.* Februar 2015
- [Fra12] FRANKONIA: *Anechoic Chambers / RF-Shielded Rooms*, September 2012
- [GK15] GUSTRAU, F. ; KELLERBAUER, H.: *Elektromagnetische Verträglichkeit: Berechnung der elektromagnetischen Kopplung, Prüf- und Messtechnik, Zulassungsprozesse.* Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2015. – ISBN 9783446443983
- [GLO] GLOBALEMC: HSN-1 FERRITE TILES.
- [ITU90] ; International Telecommunication Union (Veranst.): *Subjective assessment of sound quality.* 1990
- [ITU02] ; International Telecommunication Union (Veranst.): *Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures.* 2002
- [Kar10] KARK, K.: *Antennen und Strahlungsfelder: Elektromagnetische Wellen auf Leitungen, im Freiraum und ihre Abstrahlung.* 3. Vieweg+Teubner Verlag, 2010 (Studium Technik). – ISBN 9783834814951
- [Ric07] RICHTER, Henning: *Vergleich des 10 m- Referenzfreifeldmessplatzes mit alternativen Methoden zur Ermittlung feldgebundener elektromagnetischer Störgrößen*, Diplomarbeit, August 2007
- [Sch03] SCHWARZBECK, Dieter: *Messplatzvalidierung und Feldstärkemessung über 1 GHz Bedeutung und Einfluss der Antennencharakteristik.* In: *EMC Kompendium* (2003)
- [Sch14] SCHIERING, N.: *Die richtige Wahl von Verteilungen.* März 2014
- [SK11] SCHWAB, A.J. ; KÜRNER, W.: *Elektromagnetische Verträglichkeit.* Springer, 2011 (VDI-Buch). – ISBN 9783642166105
- [Tra] TRAUTNITZ, Friedrich-Wilhelm: *Stand der Normen für alternative Meßplätze.*
- [VDE95] *Absorberräume Teil 1: Schirmdämpfungsmessung Deutsche Fassung EN 50147-1:1996.* Juli 1995
- [Wen12] WENDEL, Prof. Dr. Ing. R.: *Vorlesung EMV.* (2012)
- [Wik15] WIKIPEDIA: *Leistungsdichte.* <https://de.wikipedia.org/wiki/Leistungsdichte#/media/File:Leistungsdichte.png>. Version: 2015. – Online; letzter Zugriff 16. November 2015; 10:15
- [Wir10] WIRELESS, Steute Schaltgeräte GmbH & Co. KG (Löhne) G.: *Das Funkbuch: Evolution und Kommunikation.* steute, 2010. – ISBN 9783000329050
- [Wol08] WOLFSPERGER, H.A.: *Elektromagnetische Schirmung: Theorie und Praxisbeispiele.* Springer Berlin Heidelberg, 2008 (VDI-Buch). – ISBN 9783540769132

A.2 Liste der Anlagen

Folgende Dateien bzw. Daten befinden sich als Anlage auf dem beigefügtem Datenträger:

1. Masterthesis
2. Bedienungsanleitung EMC32
3. Validierungsbericht
4. Internetquelle: [Wik15] (Leistungsdichte)
5. EMC32 Messung zu Abschnitt 5.3.6, Polarisierung vertikal und horizontal
6. EMC32 Messung zu Abschnitt 5.3.7, Polarisierung vertikal und horizontal
7. EMC32 Messung zu Abschnitt 5.3.8, Polarisierung vertikal und horizontal
8. EMC32 Messung zu Abschnitt 5.3.9, Polarisierung vertikal und horizontal
9. EMC32 Messung zu Abschnitt 5.3.10, Polarisierung vertikal und horizontal

A.3 Liste der verwendeten Antennen

Tabelle A.1: Verwendete Antennen

Nr.	Hersteller	Typ	Bezeichnung	Frequenzbereich	Serien-/Anlagennr.	Weiteres
1	Rohde & Schwarz	HK 116	Biconical Antenna	20 MHz - 300 MHz	788	
2	Rohde & Schwarz	HL 223	Log-Periodic Antenna	200 MHz - 1300 MHz	789	
3	Rohde & Schwarz	HL 562e	ULTRALOG	30 MHz - 6000 MHz	35102010189-0	
4	Schwarzbeck	VUSLP9111	Log-Periodic Antenna	230 MHz - 1000 MHz	BNetzA 0605503	Empfangsantenne
5	Schwarzbeck	VUSLP9111	Log-Periodic Antenna	230 MHz - 1000 MHz	BNetzA 11001868	Sendeantenne

A.4 Geräteliste

Tabelle A.2: Verwendete Geräte

Nr.	Hersteller	Typ	Bezeichnung	Eigenschaften	Seriennr.
1	Rohde & Schwarz	BBA150	Breitbandverstärker	9 kHz bis 250 MHz	5355.9004K40-101741-Jc
2	Rohde & Schwarz	BBA150	Breitbandverstärker	80 MHz bis 1000 MHz	5355.9004K40-101740-xs
3	Rohde & Schwarz	SMC100A	Signalgenerator	9 kHz bis 3,2 GHz	1411.4002K02-105008-na
4	Rohde & Schwarz	FSP3	Spektrumanalysator	9 kHz bis 3000 MHz	1093 4495 03 100411
5	Rohde & Schwarz	ESR	Spektrumanalysator	10 Hz bis 7 GHz	1316.3003K07-101395-nU
6	Rohde & Schwarz	ZNB20	Vektor-Netzwerkanalysator	100 kHz bis 20 GHz	1311.60100K62-101596-kw
7	Rohde & Schwarz	NRP-Z81	Breitband-Leistungsmesskopf	50 MHz bis 18 GHz 1 nW bis 100 mW	1137.9009.02-102394-em
8	Schaffner	KSQ 1000	Spherical Reference Radiation Source	30 MHz bis 1 GHz	14709
9	NARDA	PMM EP601	Elektrische Feldsonde	10 kHz bis 9,25 GHz	511W50669
10	Wandel & Goltermann	EMR-200	Elektrische Feldsonde	100 kHz bis 3 GHz	BN 2244/21

A.5 Ablauf der Messung nach DIN EN 61000-4-3

Im folgendem wird das aus der Norm DIN EN 61000-4-3 beschriebene Kalibrierverfahren nach konstanter Feldstärke sowie konstanter Leistung dargestellt.

A.5.1 Kalibrierverfahren mit konstanter Feldstärke

1. Ordne die Feldsonde auf einem der 16 Punkte des Netzes an (siehe Bild 5.7) und stelle die Frequenz am Ausgang des Signalgenerators auf die niedrigste Frequenz des Prüfbereichs ein (z. B. 80 MHz).
2. Lege eine solche Vorwärtsleistung an die felderzeugende Antenne an, dass die erzielte Feldstärke gleich der geforderten Kalibrierungsfeldstärke E_c ist. Zeichne den Ablesewert für die Vorwärtsleistung auf.
3. Erhöhe die Frequenz um maximal 1 % der gerade eingestellten Frequenz.
4. Wiederhole die Schritte 2 und 3 so lange, bis die nächste erreichte Frequenz in der Abfolge der Frequenzschritte die höchste Frequenz des Prüfbereichs überschreiten würde.
5. Wiederhole schließlich Schritt 2 bei dieser höchsten Frequenz (z. B. 1 GHz).
6. Wiederhole die Schritte 1 bis 4 für jeden Punkt des Netzes.

A.5.2 Kalibrierverfahren mit konstanter Leistung

1. Ordne die Feldsonde auf einem der 16 Punkte des Netzes an (siehe Bild 5.7) und stelle die Frequenz am Ausgang des Signalgenerators auf die niedrigste Frequenz des Prüfbereichs ein (z. B. 80 MHz).
2. Lege eine solche Vorwärtsleistung an die felderzeugende Antenne an, dass die erzielte Feldstärke gleich E_c ist (unter Berücksichtigung, dass das Prüf-Feld moduliert ist). Zeichne die Ablesewerte für die Vorwärtsleistung und die Feldstärke auf.
3. Erhöhe die Frequenz um maximal 1 % der gerade eingestellten Frequenz.
4. Wiederhole die Schritte 2 und 3 so lange, bis die nächste erreichte Frequenz in der Abfolge der Frequenzschritte die höchste Frequenz des Prüfbereichs überschreiten würde. Wiederhole schließlich Schritt 2 bei dieser höchsten Frequenz (z. B. 1 GHz).
5. Bewege die Feldsonde zu einem anderen Punkt im Gitternetz. Lege die in Schritt 2 festgehaltene Vorwärtsleistung für jede der in den Schritten 1 bis 2 verwendeten Frequenzen an und zeichne den Ablesewert für die Feldstärke auf.
6. Wiederhole Schritt 4 für jeden Punkt des Netzes.

A.6 Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und alle Formulierungen, die wörtlich aus anderen Quellen entnommen wurden, kenntlich gemacht habe.

.....
Thomas Kepsch

(Schwarzenbek, den 22. März 2016)