

Vergleich des 10 m- Referenzfreifeldmessplatzes  
mit alternativen Methoden zur Ermittlung feldgebundener elektromagnetischer  
Störgrößen

Diplomarbeit

im Studiengang Umwelttechnik/ Regenerative Energien  
an der  
Fachhochschule für Technik  
und Wirtschaft Berlin

vorgelegt von

Henning Richter  
Matrikelnummer: 0506461

Berlin, August 2007

## Inhaltsverzeichnis

1. Thema .....	5
2. Einleitung.....	6
3. Der 10 m- Freifeldmessplatz.....	8
3.1. Entwicklung der Funkstörstrahlungsmessung.....	8
3.2. Der 10 m- Freifeldmessplatz in den Normen.....	9
4. Grundlagen und Theorie.....	13
4.1. Funkstörstrahlung .....	13
4.2. Nah- und Fernfeld .....	15
4.3. Messeinrichtungen .....	16
4.3.1. Messempfänger.....	16
4.3.2. Messplatzeinrichtung.....	20
4.4. Messdynamik .....	27
4.5. Messplatzdämpfung.....	28
4.6. Messverfahren .....	31
4.6.1. Messplatzdämpfung .....	31
4.6.2. Konformitätsmessungen.....	32
5. Alternative Messverfahren.....	34
5.1. Alternative Methoden in den Normen.....	34
5.1.1. Der 3 m- Freifeldmessplatz .....	35
5.1.2. Absorberhalle .....	36
5.1.3. Reflexionsfreie Kammer (Vollabsorberkammer).....	38
5.1.4. (G-) TEM- Zelle .....	39
5.1.5. Modenverwirbelungskammer .....	41
5.2. Real existierende Messplätze .....	42
5.2.1. 3 m- /10 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg .....	42
5.2.2. 3 m- Freifeldmessplatz Reichl- EMV .....	43
5.2.3. 3 m- Absorberhalle Messlabor D .....	43
5.2.4. 3 m- Absorberhalle Messlabor P .....	44
5.2.5. 3 m-/ 10 m- Absorberhalle Bundesnetzagentur.....	45
5.2.6. GTEM- Zelle FHTW Berlin.....	46

6. Darstellung der Messergebnisse .....	47
6.1. Messplatzdämpfung .....	47
6.1.1. 10 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg .....	50
6.1.2. 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg .....	55
6.1.3. 3 m- Freifeldmessplatz Reichl- EMV .....	63
6.1.4. 3 m- Absorberhalle Messlabor D .....	69
6.1.5. 3 m- Absorberhalle Bundesnetzagentur .....	73
6.1.6. 10 m- Absorberhalle Bundesnetzagentur .....	75
6.1.7. GTEM- Zelle der FHTW- Berlin .....	77
6.2. Realer Prüfling .....	79
6.2.1. Messung mit der Absorptionsmesswandlerzange .....	81
6.2.2. Ergebnisse der verschiedenen Messplätze, horizontal.....	82
6.2.3. Ergebnisse der verschiedenen Messplätze, vertikal.....	83
6.3. Messverfahren .....	84
6.3.1. Vergleich: Kalibrierung – feste Höhe, Referenzstrahlungsquelle, Messlabor P .....	85
6.3.2. Vergleich: Höhenscan – feste Höhen, Referenzstrahlungsquelle, Messlabor D .....	87
6.3.3. Vergleich: 80 cm – 100 cm Prüflingshöhe, Realer Prüfling.....	89
7. Diskussion der Ergebnisse .....	90
7.1. Messplatzdämpfung .....	90
7.2. Realer Prüfling .....	94
7.3. Messplätze.....	95
7.3.1. 10 m- Freifeldmessplatz .....	95
7.3.2. 3 m- Freifeldmessplatz .....	95
7.3.3. Absorberhalle .....	96
7.3.4. GTEM- Zelle .....	96

7.4. Fehlerdiskussion .....	97
7.4.1. Unsicherheit der Messplatzdämpfung mit Breitbandantennen ....	97
7.4.2. Unsicherheit der Messplatzdämpfung mit Präzisions- Dipolen.....	98
7.4.3. Unsicherheit der Messplatzdämpfung mit Referenzstrahlungsquelle.....	98
7.4.4. Unsicherheit der Messergebnisse des realen Prüflings.....	98
8. Fazit.....	99
9. Anhang .....	100
9.1. Quellenverzeichnis.....	100
9.2. Tabellen der Messergebnisse .....	101
9.2.1. Freifeldmessplatz Altlandsberg .....	101
9.2.2. Freifeldmessplatz Reichl- EMV .....	106
9.2.3. Absorberkammer Messlabor D.....	109
9.2.4. Absorberhalle Bundesnetzagentur .....	116
9.2.5. GTEM- Zelle der FHTW- Berlin .....	117
9.2.6. Messlabor P .....	119
9.3. Verwendete Messmittel.....	121
9.4. Abbildungsverzeichnis .....	122
9.5. Danksagung.....	125
9.6. Erklärung zur Diplomarbeit.....	126

## 1. Thema

Thema der Diplomarbeit:

„Vergleich des 10 m- Referenz- Freifeldmessplatzes mit alternativen Methoden zur Ermittlung feldgebundener elektromagnetischer Störgrößen“

Inhalt dieser Arbeit ist die Untersuchung von Antennenmessplätzen Berliner Firmen, die für EMV- Messungen im Rahmen der CE- Zertifizierung genutzt werden. Die Einhaltung der normativen Anforderungen wird geprüft. Mittels eines realen Prüflings werden die Eigenschaften dieser Messplätze untersucht und mit einem 10 m- Referenz- Freifeldmessplatz verglichen.

Die vorliegende Arbeit ist in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Dipl.-Ing. Günter Reichl entstanden.

## 2. Einleitung

Die zunehmende Verbreitung elektronischer Geräte und der Ausbau drahtloser Nachrichtenübertragungstechnik erfordert zwingend eine Regulierung zur Sicherstellung des störungsfreien Betriebs öffentlicher Nachrichtennetze.

So muss seit 1996 jeder Hersteller und Importeur von elektrischen Geräten und Einrichtungen für den europäischen Markt sicherstellen, dass das entsprechende Gerät die Schutzanforderungen der EMV- Richtlinie [1] erfüllt. Ziel ist die Begrenzung störender elektromagnetischer Beeinflussungen und die Gewährleistung einer ausreichenden Störfestigkeit von Geräten gegenüber elektromagnetischen Störgrößen.

Das Einhalten bescheinigt der Hersteller oder Importeur durch das Ausstellen der Konformitätserklärung und durch das Aufbringen der CE- Kennzeichnung zur Ermöglichung des freien Warenverkehrs im europäischen Markt.

Zur Feststellung der elektromagnetischen Verträglichkeit sind eine Vielzahl von Messungen und Prüfungen nötig. Ein Bestandteil jeder Prüfung ist die Messung der Funkstörstrahlung. Hochfrequente feldgebundene Emissionen sind primär für Funkstörungen verantwortlich. Derzeit werden Messungen im Frequenzbereich von 30 MHz bis 1 GHz durchgeführt.

Die Messanforderungen und Grenzwerte für die CE- Zertifizierung legt das „Comité Européen de Normalisation Electrotechnique“ (CENELEC) für sämtliche Produktgruppen fest; es übernimmt dabei die Veröffentlichungen des „Comité international spécial des perturbations radioélectriques“ (CISPR).

Das CISPR befasst sich seit Mitte der 1930er Jahre mit elektromagnetischen Störungen und definiert Standards für Messverfahren und -einrichtungen, die die reproduzierbare Messung von Funkstörstrahlung ermöglichen. Diese Veröffentlichungen bilden die technische Grundlage zur Überprüfung von Geräten und Einrichtungen, auf die sich alle übergeordneten Normen beziehen.

Die Spezifikationen der Messverfahren sind in der CISPR 16 (bzw. den entsprechenden europäischen oder den davon abgeleiteten nationalen Normen) definiert. Die CISPR 16 ist in der europäischen Norm EN 55016 und der nationalen Norm VDE 0876-16 enthalten.

Der 10m- Freifeldmessplatz stellt das normative Standardverfahren zur Messung der Funkstörstrahlung dar. Er gilt als Referenz für alle alternativen Methoden und als Einrichtung für Schiedsmessungen in juristischen Streitfällen.

Aufgrund der räumlichen Abmessungen des 10 m- Freifeldes sind inzwischen überwiegend alternative Messeinrichtungen im Einsatz, deren Ergebnisse sich von einander unterscheiden können.

Im Folgenden sollen Vor- und Nachteile der verschiedenen Messplätze mit Hilfe unterschiedlicher Methoden untersucht und verglichen werden.

Um das weitere Vorgehen angemessen zu erläutern, werden grundlegende Aspekte der Antennenmesstechnik skizziert. Die Komplexität der Thematik erlaubt nur eine knappe Darstellung mit Verweisen auf die einschlägigen Quellen. Der Hauptteil dieser Arbeit liegt in der praktischen Durchführung der Messungen und deren Beurteilung.

Im Folgenden werden geschützte Bezeichnungen oder Handelsnamen ohne besonderen Hinweis verwendet.

### 3. Der 10 m- Freifeldmessplatz

#### 3.1. Entwicklung der Funkstörstrahlungsmessung

Anfänglich dienten Antennenmessungen zur Kalibrierung von Sende- bzw. Empfangseinrichtungen. Die dazu idealen Freiraumbedingungen konnten bis zur Realisierung von Vollabsorberkammern (s. a. Kap. 5.1.3.) in den 80er Jahren konstruktiv nicht realisiert werden.

Deshalb sind Freifeldmessplätze in reflexionsfreier Umgebung mit anfangs 300 m Messdistanz und Antennenhöhen von einigen Metern über dem Erdboden errichtet worden. Die entstehende Bodenreflexion wird definiert genutzt. Zur Sicherstellung definierter Messbedingungen wird der Bereich zwischen den und um die Antennen mit einem leitfähigen metallischen Untergrund versehen, der für elektromagnetische Wellen reflektierend wirkt. (s. Kap. 4.3.2.5. )

Für die heutigen Anforderungen der Zertifizierungspraxis sind solche Messplätze nicht praktikabel. Zum einen sind die Fremdpegel aus der Umgebung in vielen Frequenzbereichen so hoch, dass dort die Funkstörstrahlung des Prüflings überlagert wird und nicht feststellbar ist. Zum anderen kann man Messplätze dieser Ausmaße nicht wirtschaftlich betreiben. Die Messentfernung wurde mit der Zeit in 10 dB- Schritten (100 m, 30 m, 10 m) auf bis zu 3 m verringert.

Die 10 m- Strecke mit Groundplane stellt dabei einen Kompromiss zwischen theoretischem Anspruch und technischer Realisierbarkeit dar. Durch die Messdistanz von 10 m zwischen dem Prüfling und der Messantenne sind für alle zu messenden Frequenzen Fernfeldbedingungen (s. Kap. 4.2.) sichergestellt. Zudem ist der Prüfling noch nah genug entfernt, um mit handelsüblichen Messeinrichtungen (s. Kap. 4.3.) kleine Störpegel mit ausreichender Genauigkeit aufnehmen und bewerten zu können, ohne dass sich die Messeinrichtungen gegenseitig beeinflussen.



### 3.2. Der 10 m- Freifeldmessplatz in den Normen

Der 10 m- Freifeldmessplatz ist ein hindernisfreier ebener Platz mit metallisch leitfähigem Untergrund.

„Solche Messplätze müssen frei von Gebäuden, elektrischen Leitungen, Zäunen, Bäumen usw. sowie von unterirdisch verlegten Kabeln und Rohrleitungen usw. sein, sofern sie nicht zur Versorgung und zum Betrieb des Prüflings erforderlich sind“ [2]

Charakterisierend für den normenkonformen Messplatz ist die metallisch leitfähige Bodenplatte (en: Groundplane), die mindestens 20 m lang und 17,3 m breit ist. Sie soll eine elliptische Fläche um den Prüfling und den Antennenmast vollständig bedecken. Prüfling und Messantenne stehen dabei in den Brennpunkten der Ellipse. Da Reflexionen an innerhalb der Ellipse befindlichen Objekten von einem Brennpunkt in den anderen gelenkt werden, würden aus zusätzlichen undefinierten Signalüberlagerungen Messfehler resultieren.

Diese Abmessungen gelten unter der Voraussetzung, dass der Prüfling auf einem Drehtisch 360° drehbar ist. Ortsfeste Anlagen erfordern größere Messplätze bzw. müssen unter Standortbedingungen vermessen werden.

Abbildung 1 beschreibt die Anordnung der Antenne und des Prüflings auf der elliptischen Fläche.

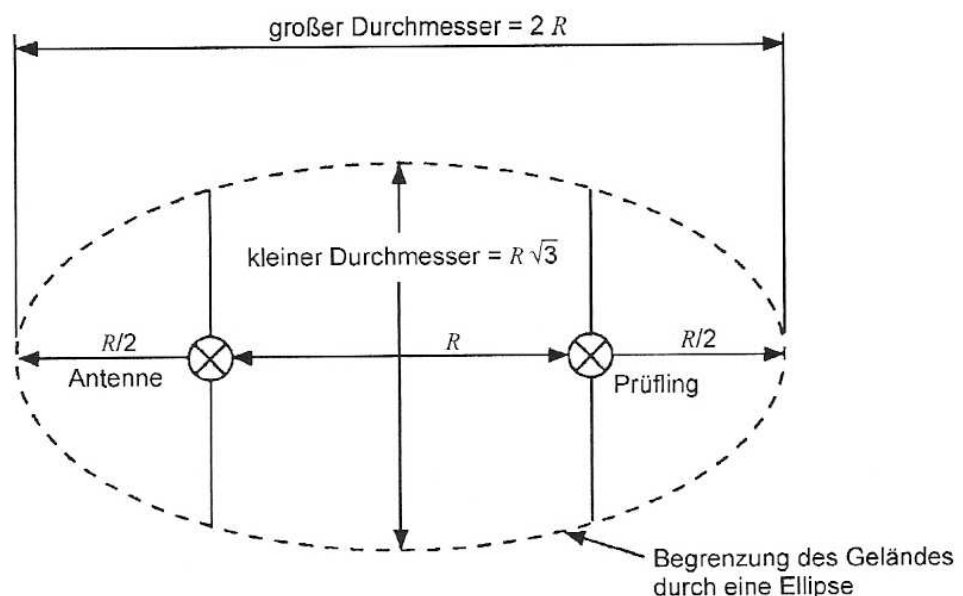


Abb. 1: Hindernisfreier Bereich eines Messplatzes mit Drehtisch [1]

Die Sicherstellung dieser geometrischen Verhältnisse reicht jedoch nicht aus, um reflexionsarme Messungen garantieren zu können. Deshalb muss jeder Messplatz auf Eignung überprüft werden. Dies geschieht mit der Ermittlung der normierten Messplatzdämpfung. (s. Kap. 4.5.)

Die Messplatzdämpfung ist das entscheidende Bewertungskriterium für die Verwendbarkeit des Messplatzes. In der CISPR 16-1-4 sind für verschiedene Messentfernungen (3 m, 10 m, 30 m) und unterschiedliche Antennenpolarisationen (vertikal, horizontal) frequenzabhängige Dämpfungswerte angegeben, die normierte Messplatzdämpfung (en: normalised site attenuation; kurz: NSA). Ein Freifeld kann als Messplatz für Konformitätsmessungen (en: compliance test site, kurz: COMTS) verwendet werden, wenn die nach CISPR 16-1-4 ermittelten Messplatzdämpfungsbeträge nicht mehr als  $\pm 4\text{dB}$  von dieser Messplatzdämpfung abweichen. [2]

Die elektronischen Messmittel (s. Kap. 4.3.) sollten, solange sie den normativen Anforderungen entsprechen, austauschbar sein und die Qualität des Messplatzes nicht wesentlich beeinflussen.

Antennenmast, Drehtisch und Kabelführung sind elementarer Bestandteil eines Messplatzes, deren Eigenschaften unmittelbar Einfluss auf die Messplatzdämpfung haben. Ferner sollten auch Wetterschutzeinrichtungen ortsfest installiert und eine Nichtbeeinflussung des Messplatzes nachgewiesen werden.

Ein weiteres Qualitätskriterium ist die Belastung durch Fremdpegel aus der Umgebung. Da es heutzutage keine Gebiete mehr gibt, die davon nicht erreicht werden, wodurch auch jedes Freifeld mehr oder weniger davon betroffen ist, wird die Güte eines Messplatzes in vier Gruppen eingeteilt:

- „a) Die Umgebungsstörpegel liegen mindestens 6 dB unter den Messwerten.
- b) Einige Umgebungsstörpegel liegen innerhalb von 6 dB unter den Messwerten.
- c) Einige Umgebungsstörpegel liegen über den Messwerten, sind jedoch entweder aperiodisch (d.h., die Zeit zwischen den Aussendungen reicht aus, um eine Messung durchzuführen) oder kontinuierlich, jedoch nur auf einer begrenzten Anzahl von bekannten Frequenzen.
- d) Die Umgebungsstörpegel liegen in einem großen Teil des zu messenden Frequenzbereichs über den Messwerten und treten kontinuierlich auf.“ [1]

Kaum ein Freifeldmessplatz erfüllt für den betrachteten Frequenzbereich von 30 MHz bis 1 GHz das Kriterium b). Aus diesem Grund werden alternative Messverfahren genutzt.

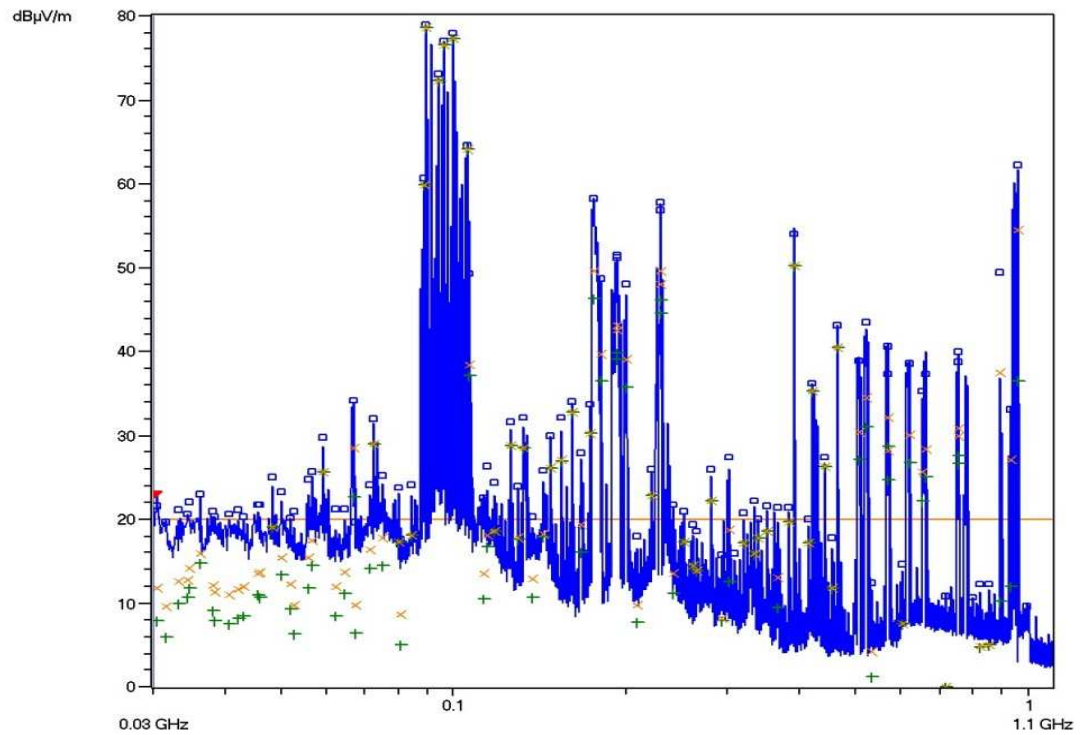


Abb. 2: Exemplarisches Spektrogramm von Fremdsignalen

<u>Frequenzbereich:</u>	<u>Quelle:</u>
47...68 MHz	TV, VHF- Bereich, Band I
87,5...108 MHz	UKW- Rundfunk
um 120 MHz	Flugfunk
174...230 MHz	TV, VHF- Bereich, Band III; digitale Versuchssender
420...862 MHz	TV, UHF- Bereich, Band IV und Band V; ISM
um 950 MHz	Mobilfunk, D- Band

## 4. Grundlagen und Theorie

### 4.1. Funkstörstrahlung

Elektrische Energie hat die Eigenschaft, sich in Form eines elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldes im Raum auszubreiten. Die Form und Intensität dieser Felder hängt von den geometrischen Strukturen des Leiters, der Frequenz, der Signalform und den herrschenden Raumbedingungen ab. Dadurch lässt sich die tatsächliche Wirkung dieser Felder nur sehr schwer theoretisch oder mathematisch vorhersagen. Konkrete Messungen unter definierten Umgebungsbedingungen sind die einzige verlässliche Möglichkeit, die Abstrahleigenschaften komplexer Schaltungen und Geräte zu ermitteln.

Entscheidend für die Funkstörstrahlung ist die Entstehung der spektralen Energie. Zu Zeiten rein analoger Schaltungstechnik gab es außer Abrissfunken u. Ä. kaum ungewollte Funkstörstrahlung. Mit der Einführung der digitalen Signalverarbeitung traten jedoch immer mehr Probleme in diesem Bereich auf. Hohe Taktraten der Signalträgerfrequenzen und die damit verbundenen kurzen Schaltzeiten sorgen für die Ausbildung hochfrequenter elektrischer Energie, die weit über den Frequenzbereich des Nutzsignals hinausgeht.

Es wird zwischen schmal- und breitbandigen Störungen unterschieden. Breitbandige Störungen zeichnen sich durch ein diskontinuierliches Spektrum aus. Typische Quellen sind das kosmische Rauschen, digitaler Datenverkehr und alle nichtperiodischen Schaltvorgänge.

Schmalbandige Funkstörungen sind einzelne oder periodisch auftretende Spektrallinien. Sie entstehen beispielsweise durch Funksender, Oberwellen von Taktoszillatoren oder Leckstrahlung medizinischer oder industrieller HF-Generatoren. [4]

Im Folgenden wird zwischen Fremdpegeln (kommerzielle Funkdienste) und Störpegeln (ungewollte Emissionen) unterschieden.

Das Zeit- Bandbreiten- Gesetz beschreibt den theoretischen Zusammenhang zwischen der Taktrate und den dabei entstehenden Oberwellen.

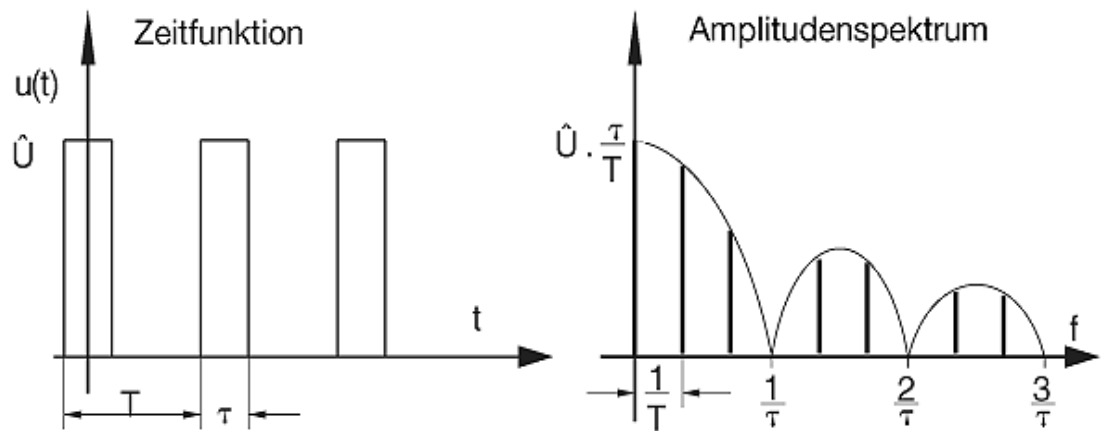


Abb. 3: Zusammenhang zwischen Schaltzeiten und Oberwellen

Besonders oberwellenhaltig sind digitale Rechteck- Signale mit extrem kurzen Schaltzeiten im Nanosekundenbereich. Nach Fourier kann durch folgende Formel die maximal auftretende Frequenz bei gegebener Schaltzeit  $t_f$  berechnet werden:

$$f_{\max} = \frac{1}{t_f}$$

Die real auftretende Funkstörstrahlung ist zusätzlich von den geometrischen Eigenschaften des Leiters und der Umgebung abhängig. So wirken sich Kabellängen und Gehäuseeigenschaften durch entstehende Reflexionen oder Resonanzen auf das Abstrahlverhalten eines Gerätes aus.

#### 4.2. Nah- und Fernfeld

Hochfrequente elektrische Energie tritt als magnetisches oder elektrisches Feld auf. Diese beiden Feldkomponenten verbinden sich mit zunehmendem Abstand von der Strahlungsquelle zum transversalen elektromagnetischen Feld, das konstante lineare Eigenschaften besitzt.

Für technische Anwendungen wird unter Vernachlässigung möglicher Phasenfehler der Bereich zwischen Strahlungsquelle und  $l = \lambda / 2\pi$  Nahfeld, der jenseitige hingegen Fernfeld genannt.

In der Physik wird das Fernfeld ab  $l = 3 \dots 5 \lambda$  definiert. Zwischen  $l = \lambda / 2\pi$  und  $l = 3 \dots 5 \lambda$  gibt es einen Übergangsbereich. Die Feldstärke nimmt im Fernfeld linear mit  $1/r$  ab. Im Nahfeld ist die Feldstärkeabnahme kubisch ( $1/r^3$ ), im Übergangsbereich quadratisch ( $1/r^2$ ).

Im Fernfeld sind elektrisches und magnetisches Feld fest über den Feldwellenwiderstand  $Z$  miteinander verknüpft. Im Fernfeld gilt:

$$E = Z \cdot H \quad \text{wobei, } Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \pi \cdot 120 \, \Omega = 377 \, \Omega.$$

Im Fernfeld wird ausschließlich das elektrische Feld gemessen, damit gleichzeitig aber auch die magnetische Feldkomponente erfasst.

Beim Messen der Funkstörstrahlung sollen Fernfeldbedingungen wegen der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse eingehalten werden. Messungen bei geringerer Entfernung unterliegen Unsicherheiten durch gegenseitige Beeinflussung von Antenne und Prüfling.

Für den hier betrachteten Frequenzbereich soll somit eine Messentfernung von ca. 1,6 m nicht unterschritten werden:

$$l = \frac{\lambda}{2\pi} \Rightarrow l_{(30\text{MHz})} = \frac{\lambda_{(30\text{MHz})}}{2\pi} = \frac{10\text{m}}{2\pi} = 1,59\text{m}$$

### 4.3. Messeinrichtungen

#### 4.3.1. Messempfänger

Messempfänger sind abstimmbare selektive Mikrovoltmeter für hochfrequente Spannungen. Sie arbeiten üblicherweise nach dem Überlagerungsverfahren.

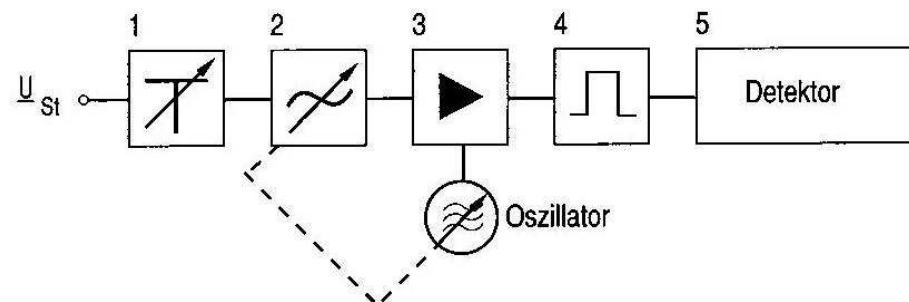


Abb. 4: Vereinfachtes Blockschaubild eines Messempfängers [4]

Die zu messende Spannung gelangt über ein Eingangsdämpfungsglied (1) und das abstimmbare Eingangsfiltersymbol (2) zur Mischstufe (3). Dem vorselektierten Frequenzgemisch wird die gewählte Oszillatorfrequenz überlagert. Aus den Mischprodukten wird die so genannte Zwischenfrequenz (kurz: ZF) mit wählbarer Bandbreite herausgefiltert und verstärkt (4). Die zu verwendenden Filterbreiten der ZF (200 Hz, 9 KHz, 120 kHz) orientieren sich an den Bandbreiten der Rundfunkkanäle der entsprechenden Frequenzbereiche. Mit Hilfe unterschiedlicher Detektoren (5) lässt sich die Ausgangsspannung des ZF- Verstärkers bewerten und anzeigen. [4]



## Spitzenwertanzeige (Peak)

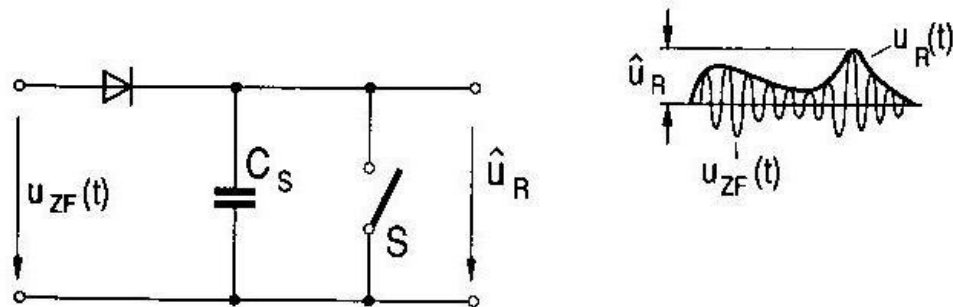


Abb. 5: Spitzenwertdetektor [4]

Die Spitzenwertanzeige zeigt die maximale Amplitude der gleichgerichteten Ausgangsspannung des ZF- Verstärkers an. Die Diode richtet die veränderliche ZF- Spannung  $u_{ZF}(t)$  gleich und lädt den Kondensator  $C_S$  auf den maximalen Scheitelwert der Einhüllenden auf. Die Einhüllende hat nur formalen Charakter und tritt nicht als physikalische Spannung auf. [4]

### Quasi- Spitzenwertanzeige (Quasi- Peak)

Der Quasi- Spitzenwertdetektor nimmt eine physiologische Bewertung der gemessenen Scheitelspannung vor. Er folgt damit dem Lästigkeitseindruck von Störungen bei Störsenken, an denen der Mensch als Zuhörer beteiligt ist und stellt ein brauchbares Maß für den subjektiven Störeindruck dar. Knackstörungen großen Scheitelwerts und geringer Häufigkeit werden beim Rundfunkempfang genauso störend empfunden wie Knackstörungen kleinen Scheitelwerts und großer Häufigkeit.

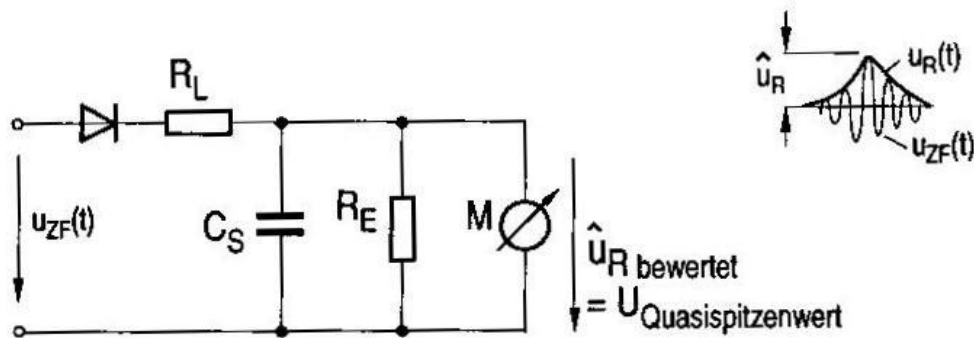


Abb. 6: Quasi- Spitzenwertdetektor [4]

Wie bei der Spitzenwertanzeige wird ein Speicherkondensator  $C_S$  aufgeladen, diesmal jedoch über einen definierten Ladewiderstand  $R_L$ . Aufladezeitkonstante  $R_L, C_S$  und Entladezeitkonstante  $R_E, C_S$  sind so gewählt, dass sich der Kondensator zwischen aufeinander folgenden Impulsen teilweise entladen kann, so dass das Messinstrument einen von der Impulshäufigkeit abhängigen Mittelwert anzeigt. [4]

### Mittelwertanzeige (Average)

Die Mittelwertanzeige zeigt den arithmetischen Mittelwert  $\bar{u}_R$  der Einhüllenden der ZF- Spannung an.

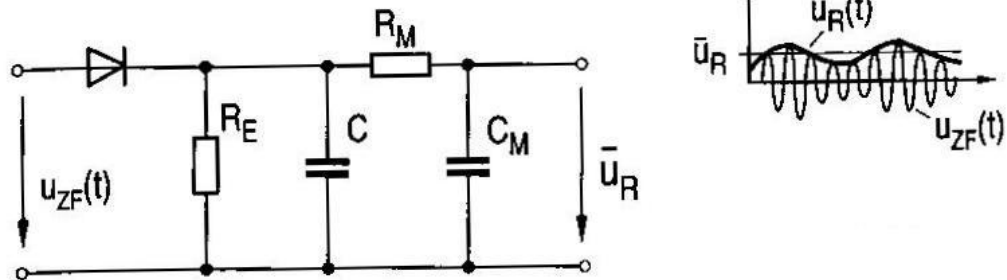


Abb. 7: Mittelwertdetektor [4]

Die Diode richtet die Ausgangsspannung des ZF- Verstärkers gleich und lädt den Kondensator C zunächst auf den jeweiligen Momentanwert der Hüllkurve auf. Durch den vergleichsweise kleinen Entladewiderstand  $R_E$  kann die Spannung an C der Hüllkurve folgen. Der Tiefpass  $R_M, C_M$  glättet die Spannung, so dass sich an  $C_M$  ihr arithmetischer Mittelwert einstellt.

Die Mittelwertanzeige eignet sich für die unbeeinflusste Messung der Störwirkung diskreter Frequenzen und modulierter Trägerfrequenzen. Einzelne höhere Störimpulse und Modulationsprodukte werden durch die Mittelung schwächer bewertet. [4]

Die Empfindlichkeit eines Messempfängers bestimmt das so genannte Grundrauschen. Es hängt von der Qualität der Eingangsfilter und –verstärker sowie der ZF- und nimmt mit zunehmender Bandbreite zu. Hochwertige Empfänger haben bei 120 kHz Bandbreite ein Grundrauschen von etwa  $6 \pm 1$  dB, während auch Geräte mit einem Eigenrauschen von  $13 \pm 2$  dB auf dem Markt sind. Letztere Geräte werden von Herstellern für so genannte entwicklungsbegleitende Messungen (“Precompliance“) angeboten.

### 4.3.2. Messplatzeinrichtung

#### 4.3.2.1. Antennen

Elektromagnetische Felder und auch quasistatische elektrische und magnetische Felder erfasst man mit Antennen, die an ihren Ausgängen eine der zur messenden Feldstärke proportionale Spannung liefern.

Die physikalische Grundstruktur für alle E- Feldantennen sind Hertz'sche Dipole. Die Länge der Dipole wird auf die zu messende Frequenz angepasst. Die exakte Wirkungsweise wird aufgrund der thematischen Komplexität hier nicht ausführlicher behandelt.

Das Verhältnis der herrschenden Feldstärke und der am Antennenanschluss gemessenen Spannung ergibt den für die Praxis wichtigen Antennenfaktor. Die Antennenfaktoren sind frequenzabhängige Korrekturwerte, die das Umrechnen von Feldstärken in Spannungswerte und umgekehrt ermöglichen.

Für  $\lambda/2$ - Dipole werden die Antennenfaktoren berechnet:

$$AF = 20 \cdot \log \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

Bei Breitbandantennen werden die Antennenfaktoren messtechnisch ermittelt und vom Hersteller mitgeliefert. Je niedriger der Antennenfaktor, desto „empfindlicher“ ist die Antenne. Die Beträge der Antennenfaktoren liegen zwischen 10 dB und 30 dB, bei besonders verlustarmen Symmetrierübertragern auch unter 10 dB.

Die gesuchte Feldstärke berechnet sich aus dem gemessenen Spannungswert wie folgt:

$$E_{\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}} = U_{\text{dB}\mu\text{V}} + AF_{\text{dB}/\text{m}}$$

In der EMV- Praxis werden in der Regel Breitbandantennen verwendet, deren Messbereich größere Frequenzbänder umfassen, um Antennenwechsel während der Messung zu vermeiden. Üblich sind bikonische und logarithmisch- periodische (kurz: LogPer-) Antennen oder Mischformen.

Die bikonische Antenne besteht aus zwei konisch geformten Reusendipolen und einem Symmetrierübertrager, dem so genannten Balun. Sie hat aufgrund ihrer Bauform eine natürliche Bandbreite von etwa 1:3; die handelsüblichen Antennen sind auf 80 MHz abgestimmt und werden zu niedrigen Frequenzen hin (30 MHz) durch die Induktivität des Symmetrierübertragers „verlängert“. Die obere Frequenzgrenze liegt im Bereich zwischen etwa 250 MHz und 300 MHz.



Abb. 8: a) symmetrischer Dipol; b) bikonische Breitbandantenne [4]

Die Logarithmisch- periodische- Antenne („LogPer“) stellt eine serielle Anordnung mehrerer abgestimmter Dipolpaare dar. Die Abstände der Dipolpaare zueinander verringern sich in logarithmischen Abständen (s. Abb. 9:). Der Messbereich wird durch die Länge der jeweils verwendeten Dipolpaare bestimmt. Die langen Paare erfassen die niedrigen Frequenzen, die Kurzen die hohen Frequenzen. Grundsätzlich können LogPer- Antennen für beliebige Frequenzbereiche hergestellt werden. Aus räumlichen Gründen werden sie meistens für Frequenzbereiche oberhalb von 200 MHz hergestellt.

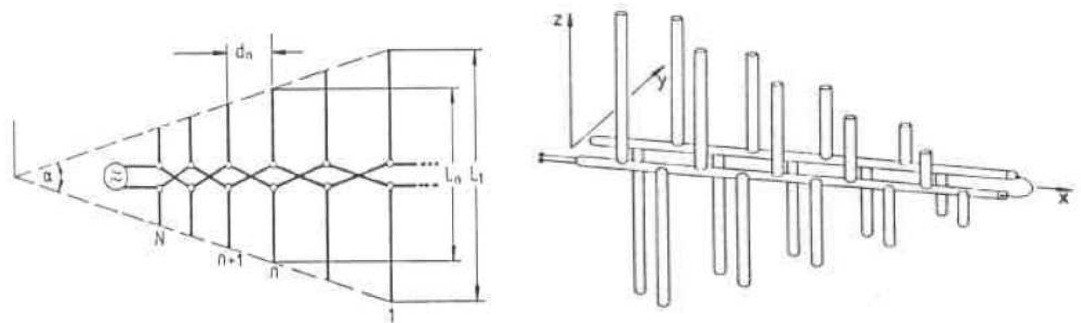


Abb. 9: Logarithmisch- periodische Breitbandantenne

Als Mischform beider Antennenformen ist die so genannte Hybrid- oder BiLog- Antenne auf dem Markt, die den gesamten Messbereich von 30 MHz bis 1 GHz abdeckt.

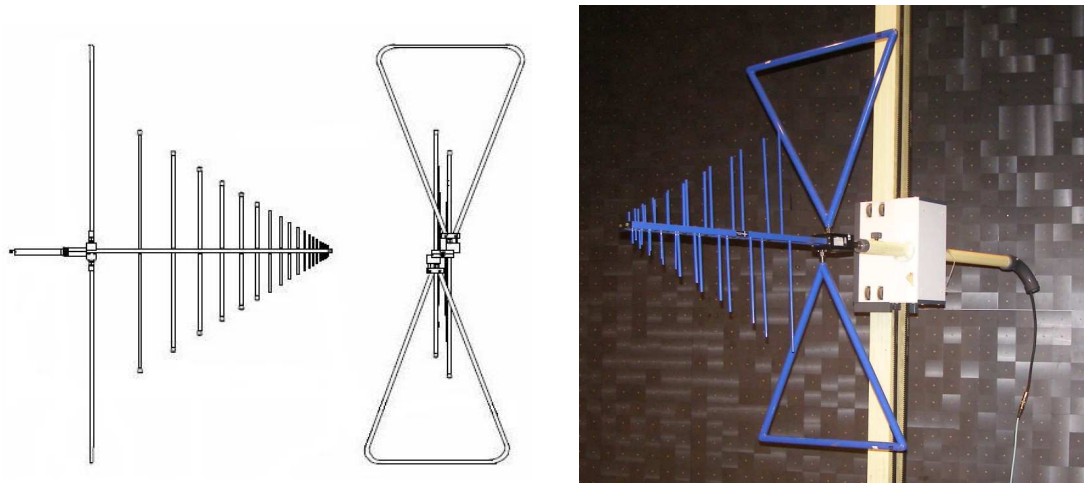


Abb. 10: Bikonische- Logarithmisch- Periodische Antenne

Die genauen Spezifikationen der für Konformitätsprüfungen zu verwendenden Antennen sind in Teil 1-4 der CISPR 16 enthalten.

Für die Messungen auf dem Freifeld wurden Antennen der Firma Schwarzbeck verwendet. Es lagen für 3 m und 10 m separate Antennenfaktoren vor, deren Fehler mit  $\pm 0,7$  dB angenommen werden. [10]

#### 4.3.2.2. Kabel

Kabel für Hochfrequenzanwendungen müssen besonderen Anforderungen genügen. Die Transmissionsdämpfung soll niedrig und die Schirmdämpfung hoch sein. Zudem dürfen keine Resonanzstellen durch fehlerhafte Kontaktierung an Steckern oder möglichen Knickstellen auftreten. Die Transmissionsdämpfung nimmt wegen des Skineffekts mit steigender Frequenz zu. Deshalb muss jedes verwendete Kabel in einem Messaufbau geprüft und die auftretenden Verluste im gesamten Messaufbau entsprechend korrigiert werden. Die Kabel stellen damit einen festen Bestandteil des Messplatzes dar und können nicht ohne weiteres ersetzt werden.

Die verwendeten Kabel hatten folgende Dämpfungswerte:

Bezeichnung	Material	a. bei 30 MHz	a. bei 1000 MHz
„Ant.- dünn“	5 m, RG 58, N-N	0,545 dB	3,459 dB
„TX- Ant.“	10 m, Ecoflex 15, N-N	0,114 dB	1,257 dB
„RX- Ant.“	12 m, Ecoflex 15, N-N	0,227 dB	1,332 dB
„RX- Ant.- 2“	10 m, RG214U, N-N	0,350 dB	2,491 dB

Abb. 11: Tabelle: Transmissionsdämpfung verwendeter Kabel

Die Kabeldämpfung wurde mit einem Netzwerkanalysator im gesamten Messbereich in 10 MHz- Schritten gemessen; geschätzter Fehler:  $\pm 0,05$  dB.

#### 4.3.2.3. Antennenmast

Messplätze für Konformitätsprüfungen müssen einen höhenverstellbaren Antennenmast haben. Gefordert ist eine Variation der Antennenhöhe im Bereich von 1 m bis 4 m über dem Erdboden. Da der Antennenmast in unmittelbarer Nähe zur Empfangsantenne steht, dürfen dort zur Vermeidung von Reflexionen keine metallischen Materialien verwendet werden. Beim Einmessen mit abstimmbaren Halbwellendipolen können unter Umständen auch 6 m erforderlich sein. Die Höhenänderung muss fernsteuerbar sein. Messpersonal innerhalb des Messareals wirkt sich störend auf die Ergebnisse auf. In der Regel lässt sich auch die horizontale und vertikale Antennenpolarisation fernsteuern.

Dies stellt einen hohen konstruktiven Anspruch dar, weil präzise und reproduzierbare Positionsänderungen bei hoher mechanischer Stabilität realisiert werden müssen.

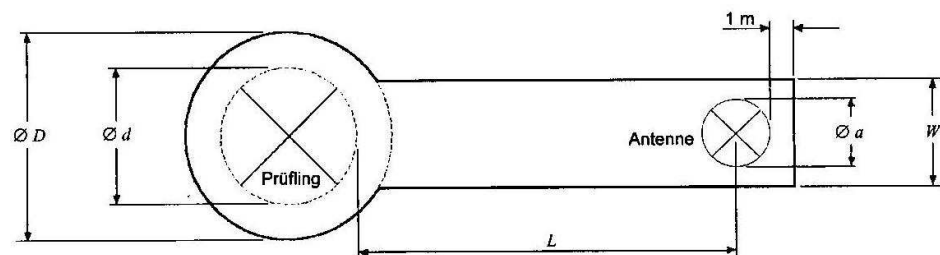


#### 4.3.2.4. Drehtisch

Für den Drehtisch gelten ähnliche konstruktive Anforderungen wie für den Antennenmast. Er muss fernsteuerbar um  $\pm 180^\circ$  in vertikaler Achse drehbar und vollkommen metallfrei sein. Die normativ geforderte Höhe beträgt 0,80 m über der horizontalen Bezugsmassefläche. [3]

#### 4.3.2.5. Groundplane

Die Groundplane ist die reflektierende Grundfläche des Messplatzes. Im Idealfall bedeckt sie die gesamte elliptische Grundfläche (s. Abb. 1:). Nach EN 55022 kann aber auch eine reduzierte Ausführung genügen, solange das  $\pm 4$  dB- Eignungskriterium erfüllt wird (s. Kap. 4.5.).



$D = d + 2$  m, wobei  $d$  die größte Ausdehnung des Prüflings ist  
 $W = a + 2$  m, wobei  $a$  die größte Ausdehnung der Antenne ist  
 $L = 3$  m oder 10 m

Abb. 12: Mindestmasse der metallischen Massefläche [3]

Das empfohlene Material ist Metall. Es können Vollbleche, Metallfolien, perforiertes Metall, Streckgitter, Metallgewebe, Drahtschirme und Metallgitter verwendet werden. Die Groundplane sollte keine Öffnungen oder Schlitze aufweisen, deren Abmessungen 1/10 der Wellenlänge der höchsten Messfrequenz (ca. 3 cm bei 1000 MHz) überschreiten. Gleiches gilt für Nähte und Kontaktstellen.

Das Rayleigh- Rauheitskriterium liefert eine brauchbare Abschätzung des höchstzulässigen Effektivwertes der Rauheit einer reflektierenden Grundfläche. Für die meisten Messplätze, besonders für die 3 m- Strecke, sind bis zu 4,5 cm Rauheit bei der Messung ohne Bedeutung. Für Messentfernungen von 10 m und 30 m sind noch größere Rauheiten zulässig.

Dicke dielektrische Beschichtungen, wie Sand, Asphalt oder Holz können eine unzulässig hohe Messplatzdämpfung zur Folge haben.

Die Eignung der Groundplane wird durch die Messung der Messplatzdämpfung ermittelt. (s. Kap. 4.5.)

#### 4.3.2.6. Netznachbildungen

Zur Versorgung eines Prüflings mit 230 V- Wechselspannung oder anderen zum bestimmungsgemäßen Betrieb benötigten Signale sind entsprechende Entkopplungseinrichtungen wie z.B. Netznachbildungen gefordert. Netznachbildungen geben dem Prüfling eine definierte Netzimpedanz vor. Spezifikationen der Netznachbildungen sind in der Norm EN 61000-4-6 definiert.

#### 4.3.2.7. Absorberzangen

Absorberzangen dienen zur Terminierung langer Leitungen. Meistens ist es nicht möglich, wie normativ gefordert, herunterhängende Leitungen unterhalb des Prüflings durch die Groundplane zu führen. Stattdessen werden die Leitungen am Boden durch Absorberzangen geführt, die die hochfrequente Energie umsetzen. Verkopplungen der Leitung mit der metallischen Bodenplatte sind zu vermeiden.

#### 4.4. Messdynamik

Unter Messdynamik wird der Abstand zwischen der Grenzwertkurve und der durch die Messplatzdämpfung und das Messsystem bedingten unteren Messgrenze verstanden. Die Messdynamik wird durch das Grundrauschen des Messempfängers, die Antennenfaktoren und die Kabeldämpfung bestimmt. Mit zunehmenden Beträgen nimmt sie ab. Werte kleiner 0 dB machen Messungen unmöglich.

Störpegel unterhalb der unteren Messgrenze sind nicht messbar. Die Grenzwerte für Wohn- und Gewerbegebiete nach EN 55022 liegen bei 30 dB $\mu$ V/m von 30 MHz bis 270 MHz und 37 dB $\mu$ V/m im Bereich 270 MHz bis 1000 MHz. [3]

$$MD = GW - (GR + AF + KD)$$

$$[MD] = \text{dB}$$

MD.....Messdynamik des Messplatzes

GW.....Grenzwertkurve für Funkstörstrahlung

GR.....Grundrauschen des Empfängers

AF.....Antennenfaktor der Empfangsantenne

KD.....Kabeldämpfung des gesamten Kabels

Als Beispiele werden drei ausgewählte Frequenzen mit ungünstigen Werten aus Kap. 4.3. genannt:

Frequenz	Grenzwert	Rauschen	Ant.faktor	Kabel	Dynamik/dB
MD <sub>(30 MHz)</sub>	= 30	- (14,5	+ 18,57	+ 0,772)	= - 3,84
MD <sub>(500 MHz)</sub>	= 37	- (11,0	+ 17,10	+ 3,243)	= 5,66
MD <sub>(1000 MHz)</sub>	= 37	- (14,8	+ 23,5	+ 4,791)	= - 6,09

Zur Beschreibung der Messdynamik eines Messplatzes muss die entsprechende Messplatzdämpfung zusätzlich berücksichtigt werden.

#### 4.5. Messplatzdämpfung

Die Eignung eines Freifeldmessplatzes für Konformitätsmessungen nach CISPR 16- 1- 4 wird im Wesentlichen durch die Einhaltung der theoretischen Messplatzdämpfung innerhalb des  $\pm 4$  dB- Eignungskriteriums bestimmt. Sie hängt von der Größe, Form, Leitfähigkeit und Rauigkeit der Groundplane (s. Kap. 4.3.2.5. ) sowie von der Qualität der mechanischen Hilfseinrichtungen ab.

Es sind für verschiedene Messentfernungen (3 m, 10 m, 30 m) und unterschiedliche Antennenpolarisationsebenen (vertikal, horizontal) frequenzabhängige Dämpfungswerte angegeben, die normierte Messplatzdämpfung (en: normalised site attenuation, kurz: NSA). Grundlage zur theoretischen Berechnung bilden optische Modelle. Das genaue Berechnungsverfahren ist in CISPR 16-1-5; Anhang C beschrieben. [2]

normierte Streckendämpfung für 3 m und 10 m; horizontal

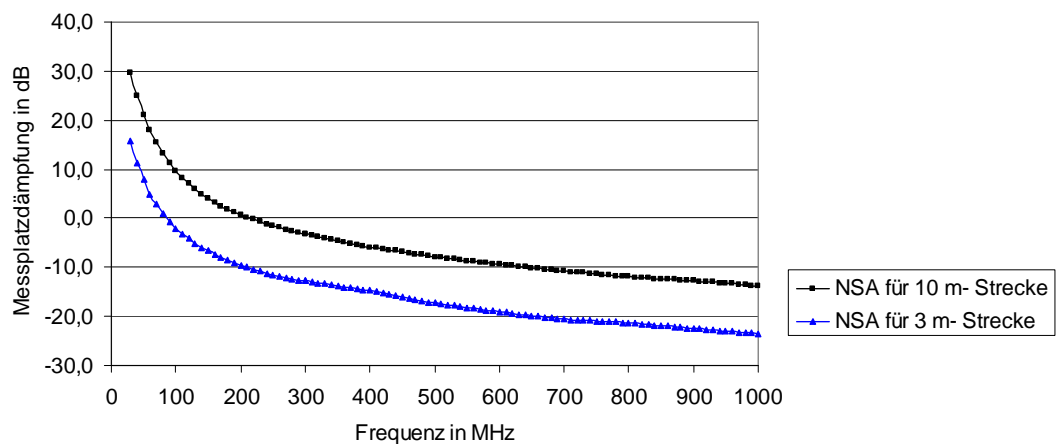


Abb. 13: Beispiele für die normierte Streckendämpfung [2]

Die Einhaltung der Freifelddämpfung des Messplatzes wird in einem eigenen Messverfahren nachgewiesen. Dabei wird mit einer Sendeantenne anstelle des Prüflings ein definierter Feldstärkepegel erzeugt. Die empfangende Feldstärke darf dann nach Berücksichtigung der Antennenfaktoren, der Kabeldämpfung und der normierten Messplatzdämpfung nicht mehr als  $\pm 4$  dB vom Sendepiegel abweichen. [2]

Das ganze System „Generator- Kabel- Sendeantenne- Messplatz- Empfangsantenne- Kabel- Empfänger“ kann als Vierpolsystem betrachtet werden.

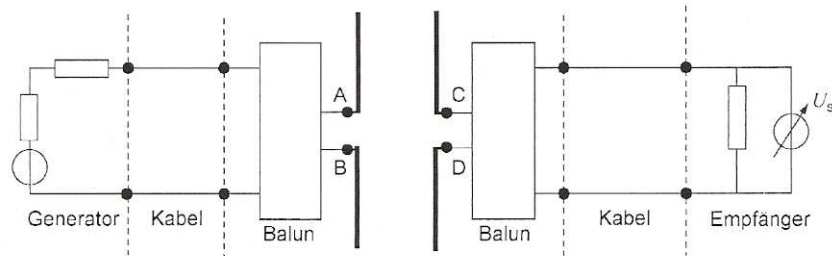


Abb. 14: Netzwerkmodell zur Bestimmung der Messplatzdämpfung [2]

Die Messplatzdämpfung ist die Einfügungsdämpfung zwischen den Toren AB und CD.

Am Generator wird in Frequenzschritten ein Spannungspegel  $U_s$  eingestellt, der mindesten 60 dB über dem Grundrauschen des Empfängers liegt. Durch Höhenvariation der Empfangsantenne wird für jede Frequenz der maximale Empfangspegel  $U_E$  ermittelt. Die Dämpfungskurven der Kabel und die Antennenfaktoren der Sende- und Empfangsantenne werden als bekannt vorausgesetzt.

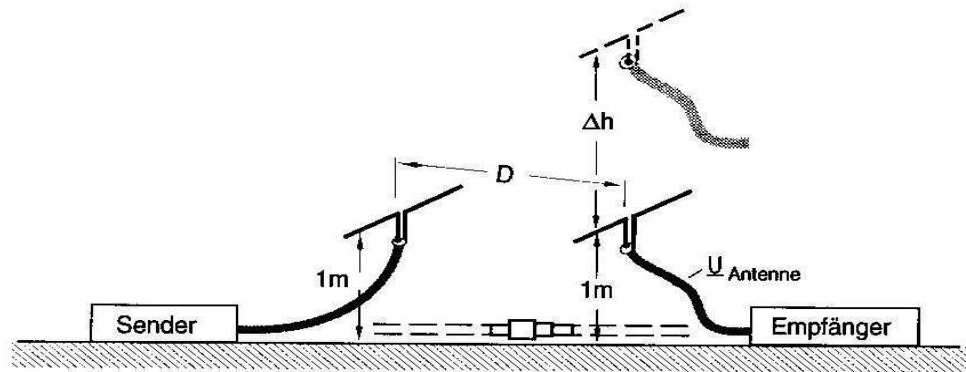


Abb. 15: Messung der Messplatzdämpfung [4]

Die normierte Messplatzdämpfung berechnet sich daraus wie folgt:

$NSA = U_S - U_E - K_S - K_E - AF_S - AF_E$	$[NSA] = \text{dB}$
---	---------------------

$U_{E/S}$ .....Empfangs- bzw. Sendepiegel

$K_{E/S}$ .....Kabeldämpfung der Empfänger- bzw. Senderseite

$AF_{E/S}$ .....Antennenfaktoren der Empfangs- bzw. Sendeantenne

Das  $\pm 4$  dB- Eignungskriterium

Als Toleranz der gemessenen Streckendämpfung werden  $\pm 4$  dB Abweichung vom theoretischen Wert zugelassen. Dieses Eignungskriterium setzt sich aus der Summe der geschätzten Fehler zusammen. Die Fehler der Antennenfaktoren von Sende- und Empfangsantenne werden jeweils mit  $\pm 1$  dB angenommen. Zusätzlich werden für ein Dämpfungsglied und die Unregelmäßigkeit des Messplatzes Fehler von jeweils  $\pm 1$  dB geschätzt.

In der Praxis pflanzen sich die berücksichtigten Fehler selten mit gleichem Vorzeichen fort. Ein gut aufgebauter Messplatz kann das  $\pm 4$  dB-Eignungskriterium erfüllen, selbst wenn die Unregelmäßigkeiten des Messplatzes um mehr als  $\pm 1$  dB vom Idealwert abweichen. [3]

## 4.6. Messverfahren

### 4.6.1. Messplatzdämpfung

Die Messplatzdämpfung wird in der Regel durch das in CISPR 16 definierte Verfahren ermittelt (s. Kap. 4.4.).

Alternativ kann die Messplatzdämpfung aber auch mit einer geeigneten Referenzstrahlungsquelle ermittelt werden. Voraussetzung dafür ist die exakte Kalibrierung der Sendepiegel für den gesamten zu messenden Frequenzbereich und beide Polarisations Ebenen. Die Erstellung der Kalibriertabelle wird auf Präzisionsfreifeldmessplätzen mit hohem messtechnischem Aufwand vorgenommen. Die Feldstärkepegel können daher als hochgenau angesehen werden.

Der mittels Höhengscan maximiert ermittelte Empfangsfeldstärkepegel bei einer Frequenz wird vom entsprechenden Wert der Kalibriertabelle subtrahiert. Die Differenz gibt die Abweichung der Messplatzdämpfung an. Auch hier muss das  $\pm 4$  dB- Eignungskriterium erfüllt werden.

Zum Vergleich mit Messergebnissen aus dem normativen Verfahren wird der Wert der Differenz mit dem entsprechenden Wert der normierten Messplatzdämpfung addiert und dargestellt.

Dieses Verfahren reduziert den mechanischen Aufwand der Messungen, verringert die Fehlerquellen (Sendeantenne, senderseitiges Kabel) und eignet sich besonders zur regelmäßigen Überprüfung der Langzeitstabilität der Messplatzeigenschaften und des Messaufbaus.



Abb. 16: Foto: Referenzstrahlungsquelle

## 4.6.2. Konformitätsmessungen

### 4.6.2.1. Manuelle Messung

Bei Konformitätsprüfungen wird die Funkstörstrahlung gemessen. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten haben sich Vorbewertungsverfahren herauskristallisiert. Dazu werden zunächst Übersichtsmessungen des gesamten Messbereichs mit dem Peak- Detektor (s. Kap. 4.3.1.) bei konstanten Höhen der Empfangsantenne für beiden Polarisationssebenen durchgeführt. Diese werden im Anschluss mit dem Quasipeak- Detektor, Höhenvariation der Empfangsantenne und Drehen des Prüflings maximiert. Nötig wird dieses Verfahren, da eine pauschale Messung des gesamten Messspektrums mit Quasipeak- Detektor zu zeitintensiv und damit unwirtschaftlich ist. Zudem kann es wegen Störpegeln aus der Umgebung zu Interpretationsschwierigkeiten der Messergebnisse kommen.

Weiterhin kann zur Vorevaluierung eines Prüflings eine Absorptionswandlerzange zur Erfassung der leitungsgeführten hochfrequenten Leistung verwendet werden. Hierbei wird in einem Schirmraum über die in die Anschlussleitungen strömende Energie eine Abschätzung des zu erwartenden Spektrums möglich. Dieses Verfahren wird an dieser Stelle aber nicht präzisiert. (s. Abb. 62:).

Eine Messung ohne Höhenscan ist aufgrund der Überlagerung nicht-phasengleicher Wellen fehlerbehaftet. Das Diagramm des Spektrums der Referenzstrahlungsquelle zeigt eine Welligkeit der Amplituden gegenüber dem Sollpegel. (s. Kap. 6.3.)



#### 4.6.2.2. Automatisierte Verfahren

Es wird bei festen Höhen der Empfangsantenne das gesamte Messspektrum geprüft, dabei werden grenzwertnahe Pegel registriert. Im Anschluss wird bei den auffälligen Frequenzen durch automatische Höhenscans und Drehungen des Tisches die Feldstärke maximiert und gespeichert.

Bei anderen automatisierten Messungen wird die Höhe der Empfangsantenne schrittweise variiert. Es wird bei jeder Höhe und horizontaler und vertikaler Polarisierung der gesamte Messbereich gescannt und die Maxima für jede Frequenz gespeichert. Zusätzlich wird der Prüfling in definierten Winkelintervallen um seine vertikale Achse gedreht.

Automatisierte Verfahren sind ausschließlich in geschirmten Messeinrichtungen zweckmäßig. Auf Grund fehlender Fremdsignale sind alle zu messenden Emissionen dem Prüfling zuzuordnen. Dieses Verfahren benötigt einen komplexen Messaufbau mit Computerunterstützung und kann ohne Betriebspersonal durchgeführt werden.

## 5. Alternative Messverfahren

### 5.1. Alternative Methoden in den Normen

Der 10 m- Freifeldmessplatz ist aufgrund seiner räumlichen Dimensionen aufwendig in Anschaffung und Unterhalt. Die fortschreitende Belegung des zu messenden Frequenzbandes mit Radio-, Fernseh- und Mobilfunksendern lässt eine normgerechte automatisierte Messung in entsprechenden Bereichen kaum noch zu.

Deshalb wurden alternative Messverfahren und -einrichtungen in die Normen aufgenommen. Die Spezifikationen der Antennenmessverfahren sind in der CISPR 16 bzw. ihren nationalen und europäischen Ausgaben beschrieben. Die Verwendung von Streifenleitern und (G-) TEM- Systemen ist in der Norm EN 61000-4-20; Anhang A definiert.

Die aktuelle Entwicklung in diesem Bereich beschäftigt sich mit der Verwendung von Modenverwirbelungskammern zur Messung der Emission. Erste Spezifikationen dazu befinden sich in der EN 61000-4-21.

### 5.1.1. Der 3 m- Freifeldmessplatz

Selten zu finden ist der 3 m- Freifeldmessplatz. Er tritt fast nur in Verbindung mit dem 10 m- Freifeld als verkürzte Version auf, wenn es durch eine Produktnorm gefordert wird, oder als kostengünstige Methode bei eingeschränkten räumlichen Gegebenheiten.

Er ist von den Abmessungen mit reduzierten Dimensionen ähnlich beschaffen wie der 10 m- Messplatz. Die empfangene Feldstärke vom Prüfling ist höher als bei 10 m Messentfernung bei gleichem Grundrauschen der Messeinrichtungen. Durch Korrelation (s. u.) können die Messwerte auf 10 m umgerechnet und mit entsprechenden Grenzwertkurven bewertet werden. Man erhält präzisere Ergebnisse durch einen größeren Signal-Rausch- Abstand.

Auch hier beeinflussen, wie auf dem 10m- Freifeld, Fremdpegeln die Messungen. Zudem kann es aufgrund des relativ geringen Abstandes zwischen Prüfling und Antenne zu Wechselwirkungen mit dem Prüfling und somit zu Messfehlern kommen.

Normative Korrelation der 3 m- und 10 m- Messergebnisse:

Es wird angenommen, dass für den zu messenden Frequenzbereich bei 3 m Messentfernung noch Fernfeldbedingungen (s. Kap. 4.2.) gelten, wodurch die Feldstärke linear mit dem Kehrwert des Messabstandes abnimmt.

Daraus folgt:

$$E_{\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}} (10 \text{ m}) = E_{\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}} (3\text{m}) - k_{\text{dB}}$$

Der Korrekturwert  $k$  in dB berechnet sich wie folgt:

$$k_{\text{dB}} = 20 \cdot \log (10 \text{ m} / 3\text{m}) = 10,45 \text{ dB}$$

Es müssen bei jedem Messwert auf dem 3 m- Messplatz 10,45 dB abgezogen werden. Danach sind die Ergebnisse mit Messergebnissen und Grenzwertkurven der 10 m-Strecke vergleichbar. [3]

### 5.1.2. Absorberhalle

Im Inneren von Schirmräumen erfahren elektromagnetische Wellen Reflexionen an den Wänden. Die reflektierten Wellen überlagern sich den ankommenden Wellen zu stehenden Wellen mit ausgeprägten konstruktiven und destruktiven Interferenzen. Die räumliche Verteilung wird stark inhomogen und macht die Ergebnisse von Emissions- und Störfestigkeitsmessungen in nicht überschaubarer, frequenzabhängiger Weise von der räumlichen Anordnung des Prüflings und der Antenne abhängig.

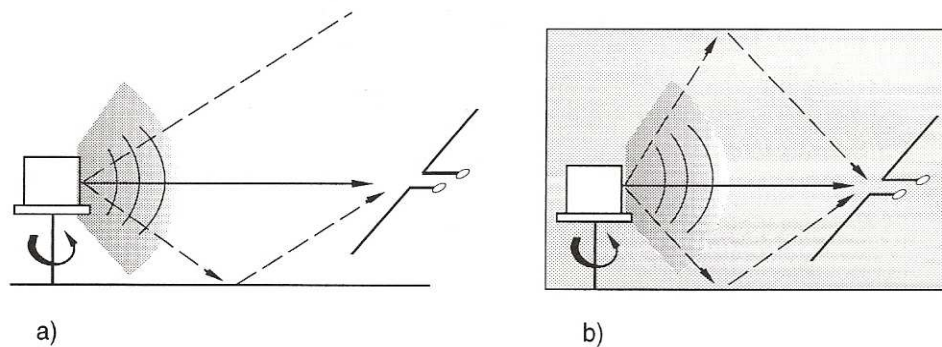


Abb. 17: Direkte und reflektierte Strahlung a) Freifeld, b) Schirmraum [4]

Zur Vermeidung der Wandreflexionen werden EMV- Messkabinen mit Absorbern ausgekleidet. Die Absorber bewirken eine reflexionsarme stetige Impedanzanpassung des Feldwiderstandes im Schirminnern ( $Z_0 = 377 \Omega$ ) an den Feldwiderstand der Schirmwand ( $Z_0 = 0 \Omega$ ). Die Absorber bestehen aus verlustbehafteten Dielektrika und Ferromagnetika, in denen die einfallende elektromagnetische Energie zum größten Teil in Wärme umgewandelt wird. Gebräuchlich sind mit kohlenstoffhaltiger Latexfarbe getränkte, pyramidenförmige Polyurethanschäume und Ferritplatten.

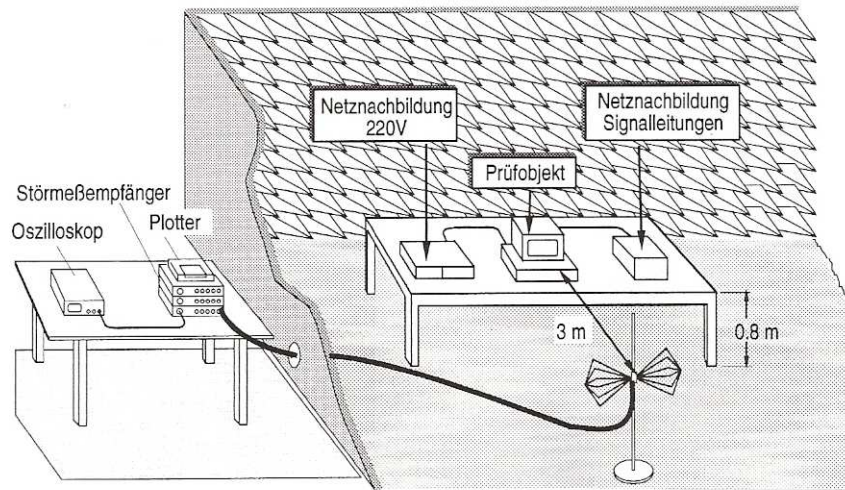


Abb. 18: Typischer Versuchsaufbau in einer Absorberkammer [4]

Absorberhallen sind geschirmte Räume mit Absorbern an Decke und Wänden. Den Untergrund bildet eine Groundplane (s. Kap. 4.3.2.5. ). Diese Kammern dienen als Ersatz des normenkonformen Freifeldes. Sie erlauben Innenraummessungen unter Freifeldbedingungen. [4]

Es ergeben sich, wie auf dem Freifeld, frequenz- und höhenabhängige Überlagerungen an der Empfangsantenne. Es können Eignungsprüfung und Messverfahren sowie die für die jeweilige Messentfernung und Anforderung gültigen Grenzwertkurven des Freifeldes übernommen werden.

Den entscheidenden Vorteil gegenüber dem Freifeld stellt die Durchführung wetterunabhängiger, automatisierter Messungen ohne Fremdsignale dar.

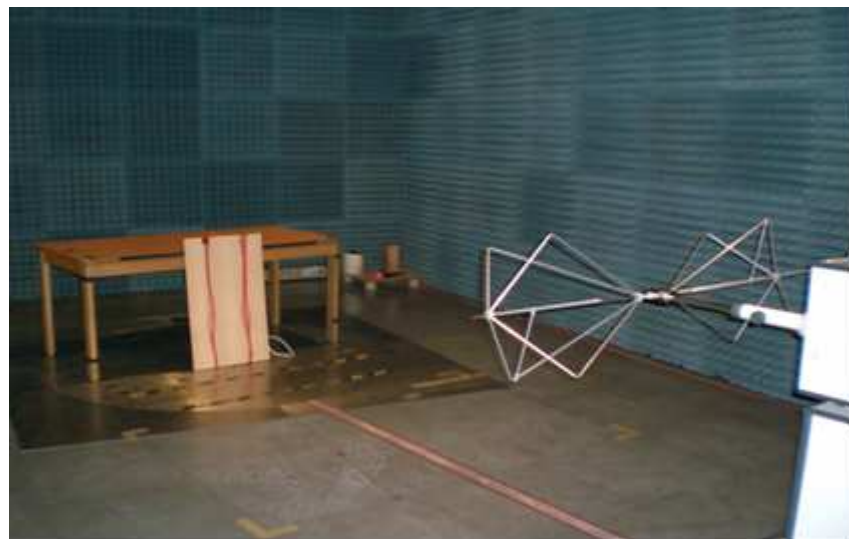


Abb. 19: Foto, 3-m- Absorberhalle mit Drehtisch

### 5.1.3. Reflexionsfreie Kammer (Vollabsorberkammer)

Vollabsorberkammern sind Absorberhallen mit reflexionsfreiem Untergrund anstelle einer Groundplane. So wird zum Beispiel ein stabiles metallfreies Netz als Lafebene verspannt, unter dem sich Ferrit- bzw. Pyramidenabsorber befinden. Es treten keinerlei Reflexionen innerhalb des Schirmraumes auf. Damit entfällt der Höhengscan der Empfangsantenne. Wegen der fehlenden Überlagerung durch die Bodenreflexion müssen von den für das Freifeld geltenden Grenzwert- und Messplatzdämpfungskurven 6 dB abgezogen werden.

Der entscheidende messtechnische Vorteil der Vollabsorberkammer ist der Fortfall des Höhengscans. Somit lassen sich Feldstärkepegel und Richtwirkungen der hochfrequenten Energie ermitteln. Die Vollabsorberkammer ist das gängige Messmittel zur Kalibrierung und Erprobung von Antennen und Funkeinrichtungen. Sie wird auch für Störfestigkeitsprüfungen verwendet, da dort Prüflinge mit hohen Feldstärken belastet werden können, ohne Messpersonal oder Umwelt zu gefährden.

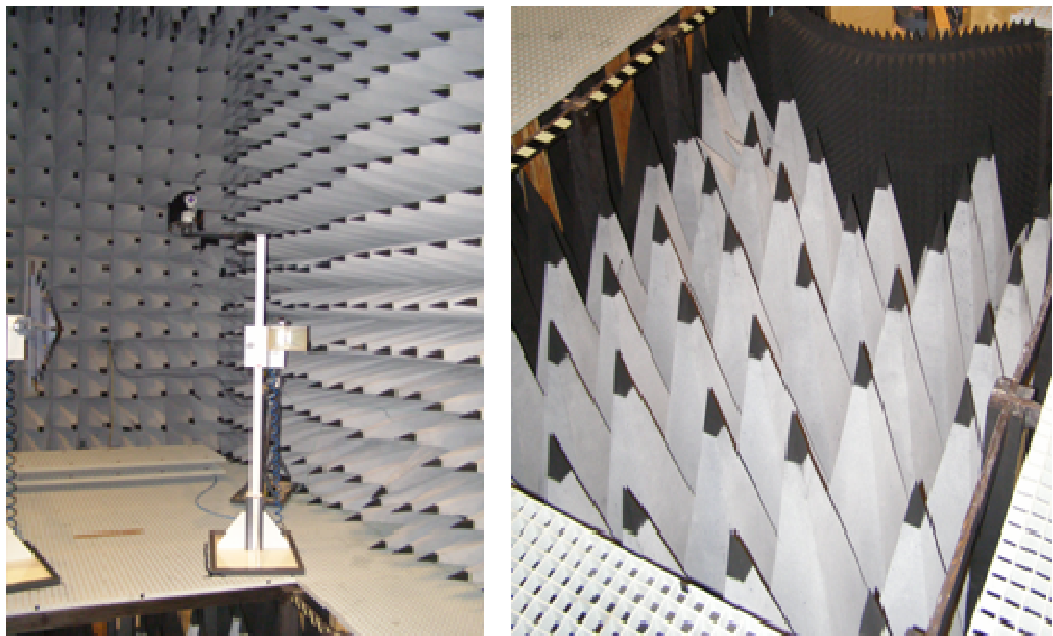


Abb. 20: Fotos: 3 m- Vollabsorberkammer der Bundesnetzagentur

#### 5.1.4. (G-) TEM- Zelle

Die TEM- Zelle ist ein geschlossener Wellenleiter. Diese Struktur kann im Prinzip als eine aufgeweitete Koaxialleitung betrachtet werden, deren Innenleiter (Septum) als Streifen ausgeführt ist.

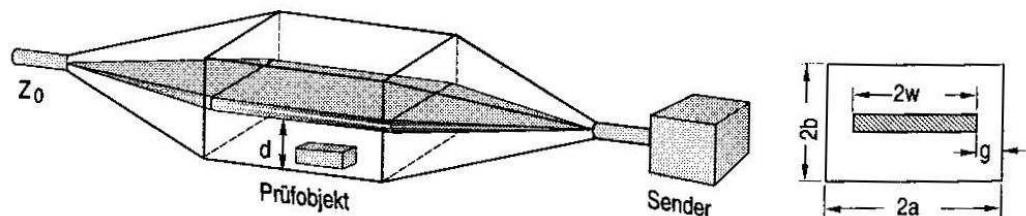


Abb. 21: Aufbau einer TEM- Zelle [4]

TEM- Zellen besitzen einen rechteckigen Querschnitt. An einem oder beiden Enden gehen sie in koaxiale Kabelsysteme gleichen Leitungswellenwiderstands über.

Das Querschnittsverhältnis von Außen- und Innenleiter längs der Ausbreitungsrichtung ist so gewählt, dass der Leitungswellenwiderstand konstant bleibt. [4]

Der Feldwellenwiderstand innerhalb dieser Struktur beträgt  $120\pi\Omega = 377\Omega$ . Damit sind Bedingungen geschaffen, die auch im freien, ungestörten Messgelände (Freifeld) gelten. Diese Struktur und weitere zweifach metallisch berandete Strukturen sind somit als Feldtestmittel als Ersatz des normenkonformen Freifeldes geeignet.

Somit können innerhalb dieser Wellenleiters normenkonforme Emissionsuntersuchungen durchgeführt werden.

Bei der Emission höherer Frequenzen (ab einigen 100MHz) innerhalb der TEM- Zelle entstehen in dem ursprünglichen Wellenfeld sich überlagernde Elementarwellen durch Diskontinuitäten am Übergang vom konischen zum quaderförmigen Teil der TEM- Zelle. Es kommt zur Anregung höherer Moden, was zu resonanzartig überhöhten Feldzuständen und damit fehlerhaften Messergebnissen führen kann.

TEM- Zellen lassen sich deshalb nur im unteren Frequenzband des Messbereichs zur Emissionsmessung einsetzen.

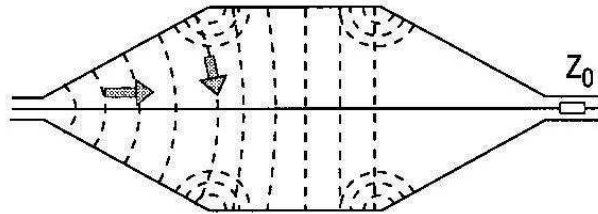


Abb. 22: Störung des TEM- Modus

In der so genannten Gigahertz- TEM- Zelle (GTEM- Zelle) vermeidet man den kritischen Übergang von der konischen auf eine parallele Struktur. Die GTEM- Zelle ist über ihre gesamte Länge konisch aufgebaut.

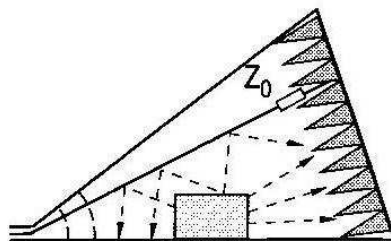


Abb. 23: Emissionsmessung in GTEM-Zelle [4]

Die Anpassung des Leitungswellenwiderstandes erfolgt bei niedrigen Frequenzen mit einem Widerstandsnetzwerk und wird bei höheren Frequenzen von Pyramidenabsorbern übernommen.

Durch diesen Aufbau und die Vermeidung von Diskontinuitäten ist die GTEM-Zelle als Untersuchungsanordnung für Frequenzen bis in den GHz-Bereich geeignet.

Zu Emissionsmessungen wird der Prüfling in drei orthogonalen Achsen innerhalb des Prüfvolumens der Zelle gedreht. In jeder Position wird das Emissionsspektrum erfasst, aus den jeweiligen Messwerten mit dem sog. Wilson- Algorithmus die einer Freifeldmessung entsprechenden Feldstärken berechnet. [2]



### 5.1.5. Modenverwirbelungskammer

Eine weitere Möglichkeit, Einflüsse störender Wandreflexionen zu minimieren, bieten Schirmräume mit periodisch beweglich angeordneten großen Metallstrukturen, so genannte Moden- Verwirbelungs- Kammern. Die Ausbreitungsbedingungen für Wellen mit Frequenzen, bei denen Eigenresonanz auftritt, werden kontinuierlich verändert, so dass sich die räumliche Lage der Interferenzen innerhalb des Schirmraumes in weiten Grenzen verschiebt. [4]



Abb. 24: Modenverwirbelungskammer [13]

## 5.2. Real existierende Messplätze

### 5.2.1. 3 m- /10 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg

Der Freifeldmessplatz bei Altlandsberg östlich von Berlin ist Teil eines quadratischen Areals mit 100 m Seitenlänge. Er liegt auf freiem Feld inmitten bewirtschafteter Felder.

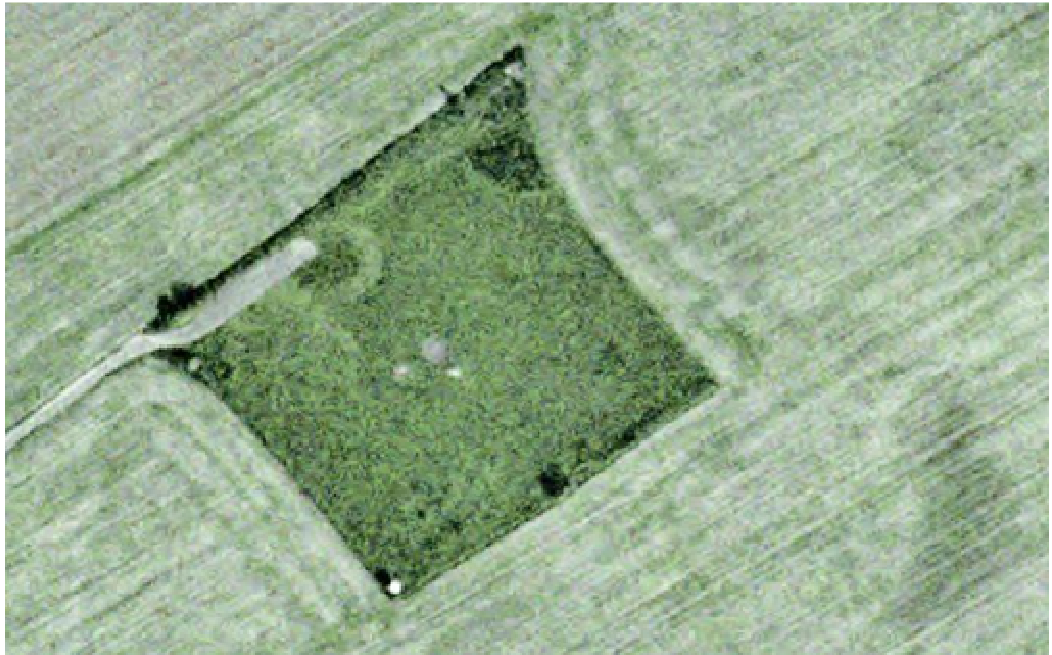


Abb. 25: Luftaufnahme Freifeldmessplatzes Altlandsberg [14]

Als ortsfeste Anlagen befinden sich dort ein wettergeschützter, gesicherter Stromanschluss und ein vom Vormieter übernommener Drehteller mit 6 m Durchmesser. Am Nord- Westrand der Wiese ist ein ca. 40 x 7 m<sup>2</sup> großer Streifen planiert und asphaltiert worden, der als 10 m- und 3m- Messplatz verwendet wird. Seit Anfang des Jahres 2007 wird dieser Messplatz von Dipl.-Ing. Günter Reichl gepachtet und soll mehreren Firmen im Berliner Raum als Referenz- Freifeldmessplatz dienen.

### 5.2.2. 3 m- Freifeldmessplatz Reichl- EMV

Als Freifeldmessplatz des Messlabors der Firma Reichl- EMV wird eine ungeschirmte 3 m- Strecke innerhalb der Firmenräume genutzt. Als Groundplane wurde eine durch Teppichboden geschützte dicke Aluminiumfolie aufgebracht. Alle konstruktiven Forderungen werden erfüllt.

### 5.2.3. 3 m- Absorberhalle Messlabor D

Das Messlabor D unterhält eine 3 m- Absorberkammer. Der Schirmraum hat die Maße 8,4 x 5,0 x 4,0 m<sup>3</sup> und ist mit Ferrit- und Pyramidenabsorbern ausgekleidet. Der Boden und die Drehfläche sind vollständig mit der Groundplane bedeckt. Dieser Messplatz erfüllt alle normativen Anforderungen. Zusätzlich ist ein Video- Überwachungssystem installiert. Vollautomatisierte Messreihen können durchgeführt werden.

Auf dem Messplatz werden entwicklungsbegleitende Messungen und Konformitätsprüfungen firmeneigener Produkte vorgenommen.

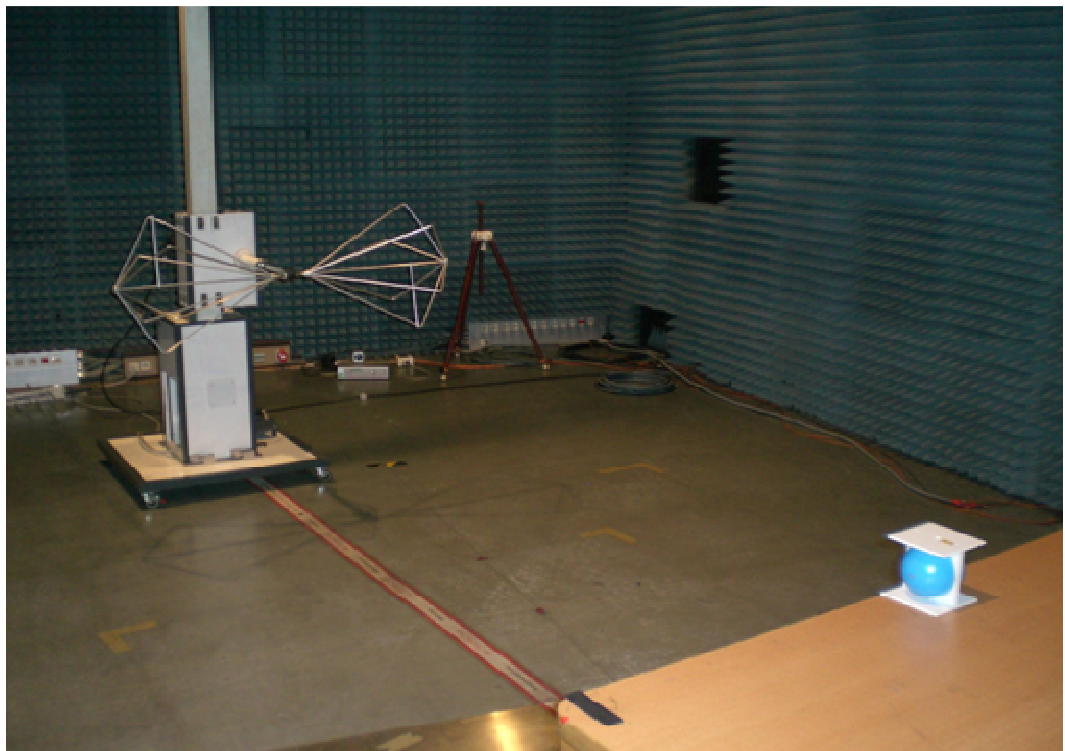


Abb. 26: Foto: 3 m- Absorberkammer Messlabor D

#### 5.2.4. 3 m- Absorberhalle Messlabor P

Das Messlabor P bietet EMV- Messungen aller Art für die CE- Zertifizierung an. Es besitzt eine 3 m- Absorberhalle mit den Maßen L x B x H = 8,38 m x 7,18 m x 5,25 m. Sie ist ausgelegt für Prüflinge bis 0,5 t und 1,5 m<sup>3</sup> Volumen. Die Halle ist mit Ferrit- und Pyramidenabsorbern ausgekleidet. Der gesamte Hallenboden ist metallisch.

Der Messplatz erfüllt alle normativen Bedingungen für Emissions- und Störfestigkeitsprüfungen bis 18 GHz.



Abb. 27: Foto: 3 m- Absorberhalle Messlabor P mit realem Prüfling

### 5.2.5. 3 m-/ 10 m- Absorberhalle Bundesnetzagentur

Die Bundesnetzagentur verfügt in Kolberg bei Berlin über eine große Absorberhalle, die den derzeitigen Stand der EMV- Messtechnik repräsentiert. Die Abmessungen von 21m x 18m x 9m, reflexionsfreie Wände, Drehscheibe und eine entsprechende Groundplane ermöglichen den Betrieb eines 3 m- sowie eines 10 m- Messplatzes unter Freifeldbedingungen ohne die Nachteile von Fremdstörpegeln und Witterungseinflüssen. Zusätzlich ist diese Halle mit einer Absaugvorrichtung für Abgase, Videoüberwachung, Brandmeldeeinrichtung und Klimaanlage ausgestattet. In dieser Einrichtung werden Messungen der Funkstörstrahlung als auch Immunitätsprüfungen im Frequenzbereich von 25 MHz bis 4 GHz durchgeführt.

Die Bundesnetzagentur kommt in Kolberg ihren Aufgaben bei der Überwachung des Marktes nach. Es werden EMV- Messungen aller Art, Prüfungen von funktechnischen Einrichtungen sowie Messungen der Spezifischen Absorptionsrate durchgeführt.

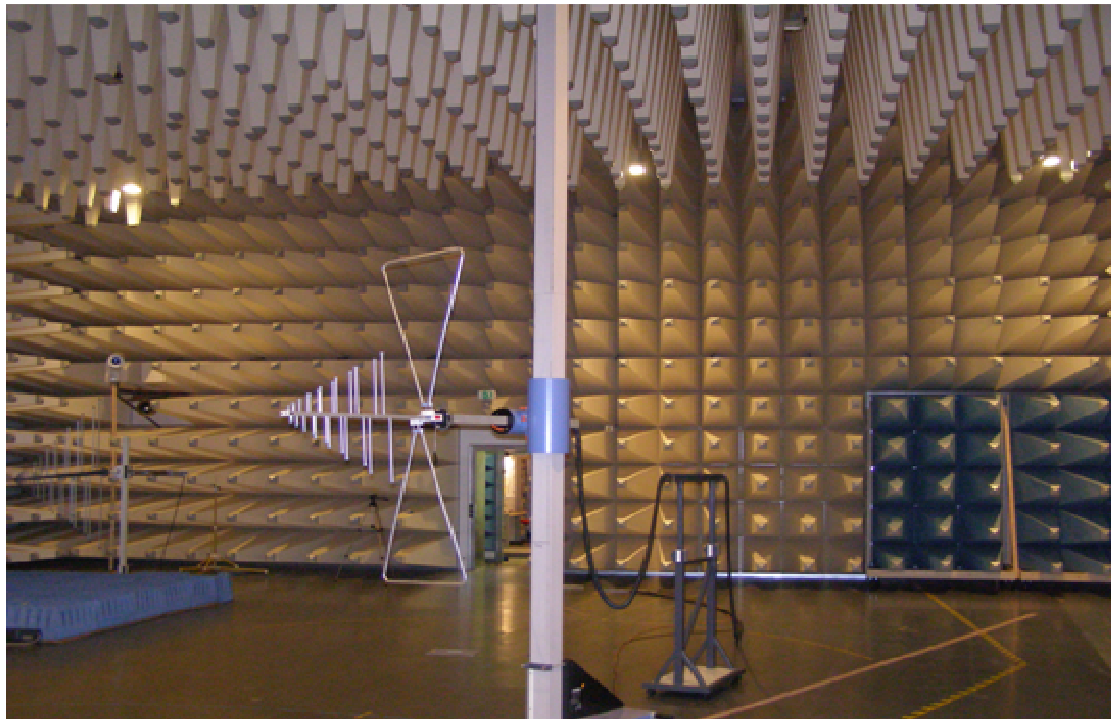


Abb. 28: Foto; 10 m- Absorberhalle Bundesnetzagentur Kolberg

### 5.2.6. GTEM- Zelle FHTW Berlin

Die Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (FHTW) betreibt an ihrem Standort Allee der Kosmonauten eine GTEM- Zelle „MEB 1100“ der Firma Messelektronik Berlin (heute TESEQ). Die Zelle ist ca. 4 m lang und 2,5 m hoch. Es können dort Emissions-, und Immunitätsprüfungen bis 1,1 GHz durchgeführt werden.

Als Messmittel ist ein Messempfänger ESVS von Rhode&Schwarz in Kombination mit einer Software von MEB zur Umrechnung in Freifeldpegel vorhanden. Ein elektrischer Manipulator im Inneren der Zelle ermöglicht das automatische Schwenken in allen drei Ortho- Achsen und damit einen halbautomatischen Messablauf ohne zwischenzeitliches Öffnen des Prüfraums.

Benutzt wird diese GTEM- Zelle primär für Studienzwecke zur Demonstration elektromagnetischer Störphänomene.



Abb. 29: Foto: GTEM- Zelle FHTW Berlin

## 6. Darstellung der Messergebnisse

### 6.1. Messplatzdämpfung

Die Messplatzdämpfung der verschiedenen Messplätze wurde mit unterschiedlichen Methoden gemessen. Das normativ geforderte Verfahren mit Breitbandantennen wurde überall verwendet. Wo es möglich war, wurden weitere Messungen mit Präzisions- Dipolen durchgeführt. Auf den 3 m- Strecken konnte zusätzlich eine Referenzstrahlungsquelle eingesetzt werden (s. Kap. 4.6.1.).

Die Messungen in den Absorberhallen sind durch Firmenmitarbeiter mit der dortigen Messtechnik durchgeführt worden. Alle anderen Ergebnisse wurden selbständig erstellt.

Die Messwerte wurden mit den geforderten Sollwerten verglichen und mit den Grenzen des  $\pm 4$  dB- Kriteriums graphisch dargestellt. Die dazugehörigen Messwerttabellen sind im Anhang zu finden (s. Kap. 9.2.).

GTEM- Zellen weisen keine Messplatzdämpfung in eigentlichen Sinn auf. Die Eignung wird durch den Vergleich mit Ergebnissen aus Freifeldmessungen sichergestellt. Die verfügbare Messeinrichtung in der FHTW- Berlin erlaubte auf Grund der begrenzten Septumshöhe nur eine Überprüfung mit der Referenzstrahlungsquelle. Die Messwerte der GTEM- Zelle lagen „unpolarisiert“ vor. Sie wurden sowohl mit der „horizontalen“, als auch mit der „vertikalen“ Kalibrierkurve verglichen und graphisch dargestellt. Entsprechende Messwerttabellen sind ebenfalls im Anhang aufgeführt (s. Kap. 9.2.).

## Messaufbau: Freifeldmessplatz Altlandsberg

## 10 m- Freifeldmessplatz



Abb. 30: Foto: Messaufbau Messplatzdämpfung, 10 m- Strecke Altlandsberg

Zur Aufnahme der Empfangsantenne wurde ein Hartfasermast mit einem höhenverstellbaren Antennenschlitten aus Holz verwendet. Die Sendeantennen wurden auf einem Holzstativ in einem Meter Höhe positioniert. Es sind normenkonforme Messungen der Messplatzdämpfung mit Breitbandantennen und Präzisions- Dipolen durchgeführt worden (s. Kap. 4.5.).



## 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg



Abb. 31: Foto: Messaufbau Messplatzdämpfung, 3 m- Strecke Altlandsberg

Neben den Messreihen mit Breitbandantennen und Präzisions- Dipolen wurde die Messung der Streckendämpfung mit der Referenzstrahlungsquelle wiederholt. Dazu ist die Antennenhalterung am Holzstativ entfernt und der Kugelstrahler mittels Spanngurt befestigt worden.

## 6.1.1. 10 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg

Breitbandantennen, 10 m, horizontal, Altlandsberg

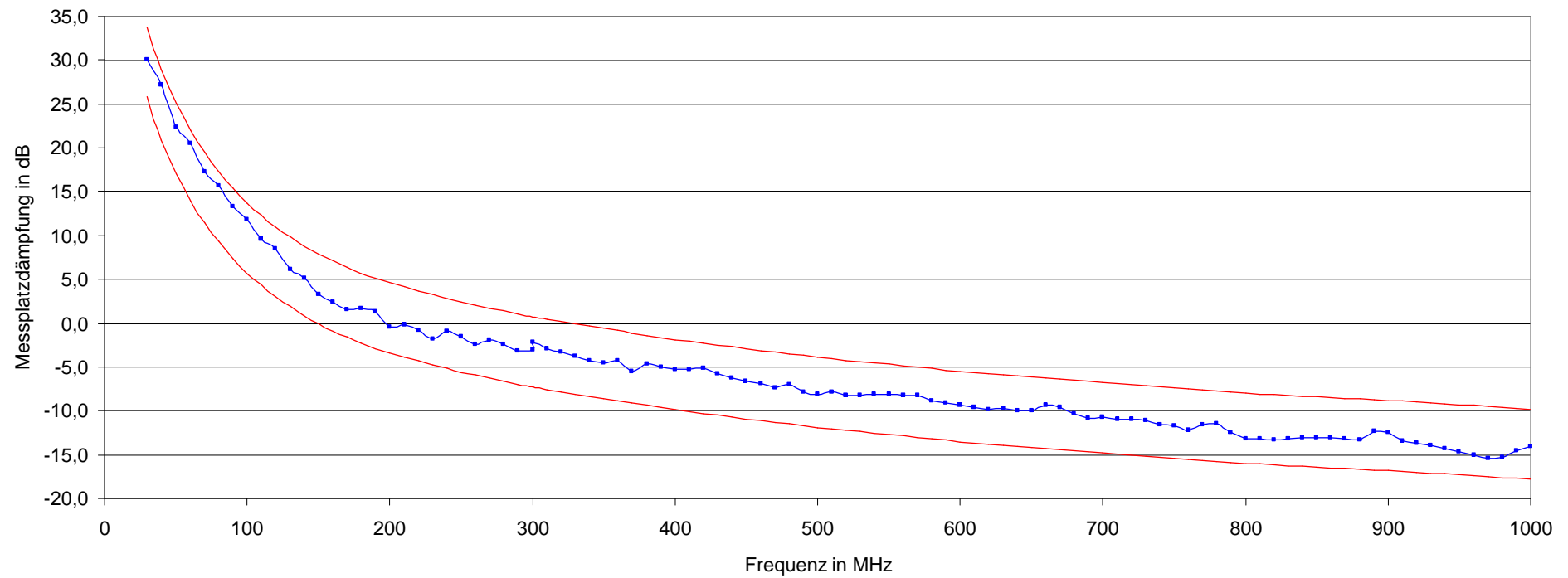


Abb. 32: Messplatzdämpfung 10 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, horizontal, mit Breitbandantennen

## Breitbandantennen, 10m, vertikal, Altlandsberg

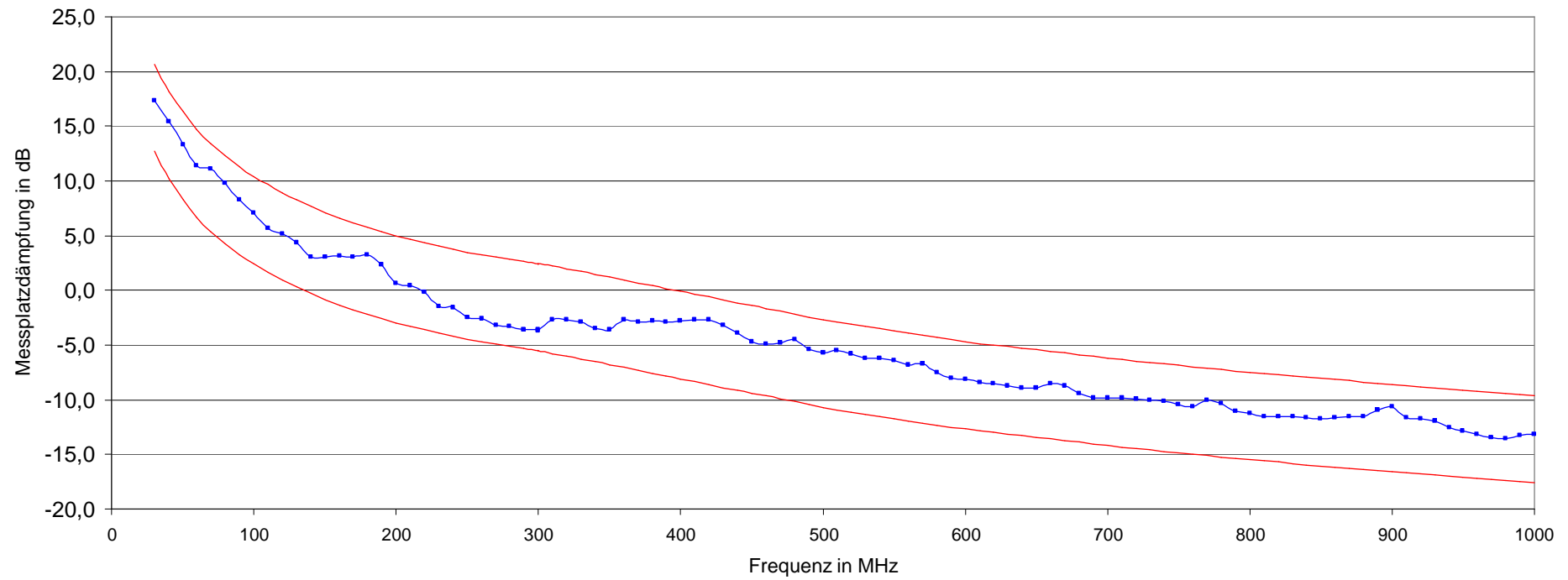


Abb. 33: Messplatzdämpfung 10 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, vertikal, mit Breitbandantennen

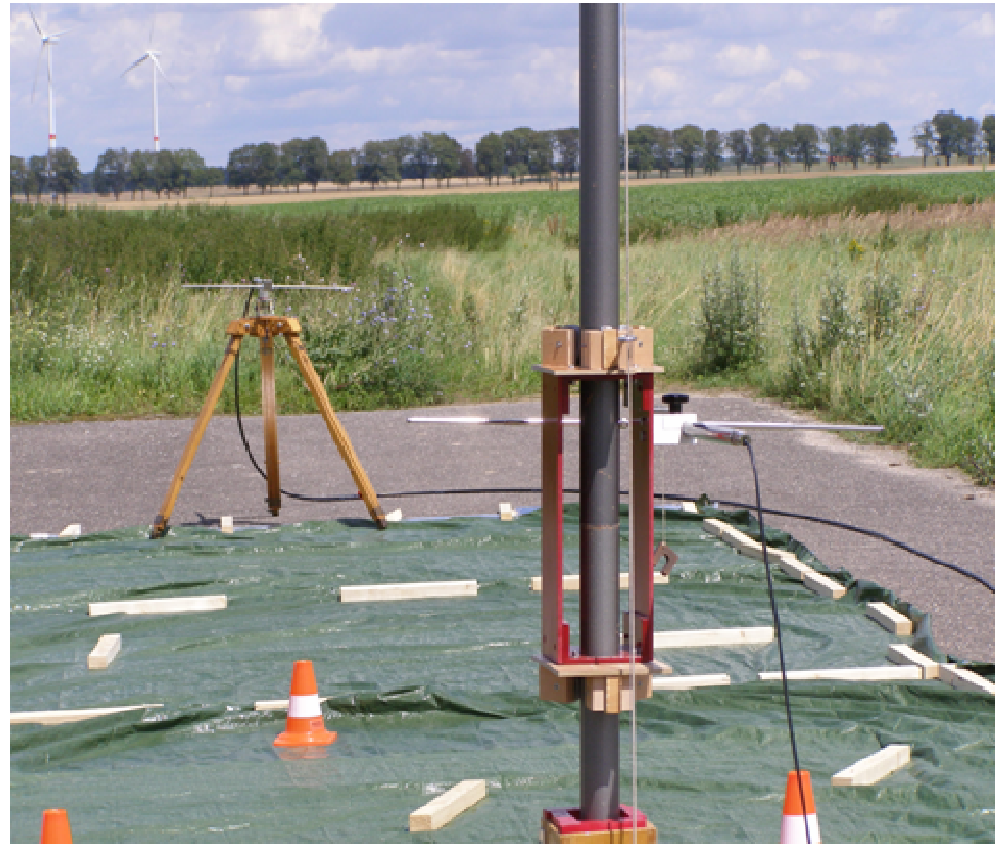


Abb. 34: Fotos: Messung mit Präzisions- Dipolen, Altlandsberg

## Präzisions- Dipole, 10 m, horizontal, Altlandsberg

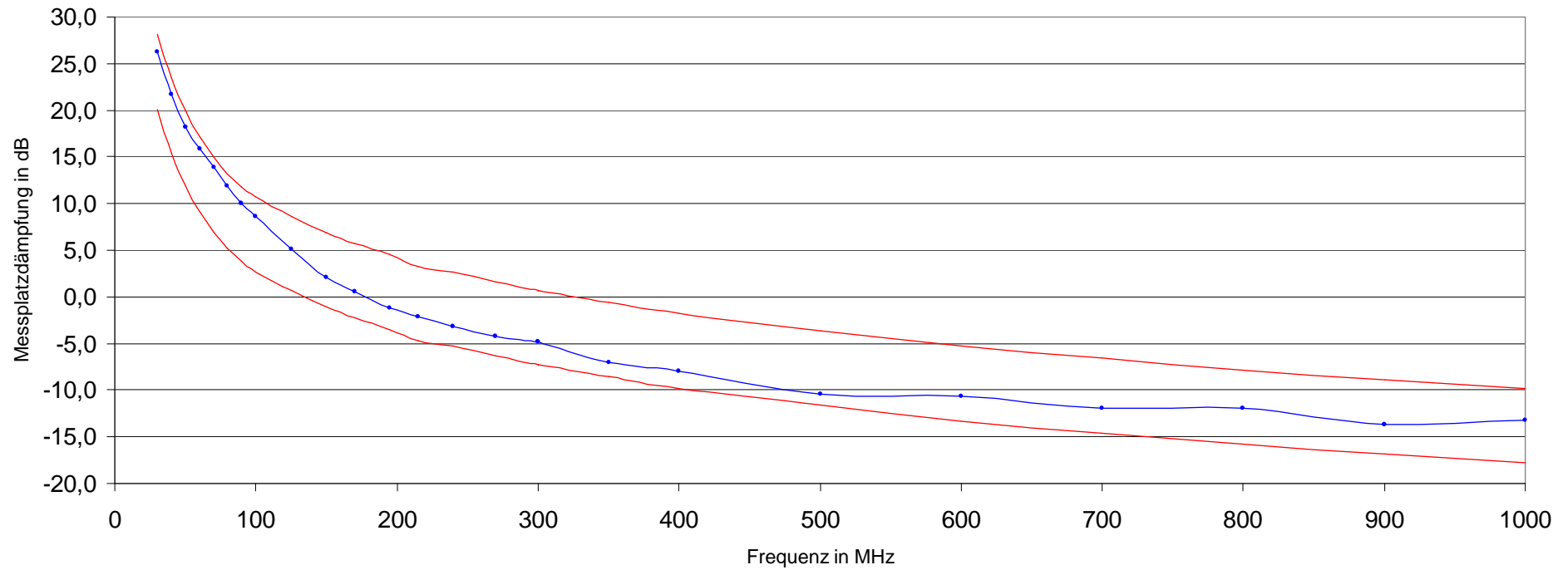


Abb. 35: Messplatzdämpfung 10 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, horizontal, mit Präzisions- Dipolen

Präzisions- Dipole, 10 m, vertikal, Altlandsberg

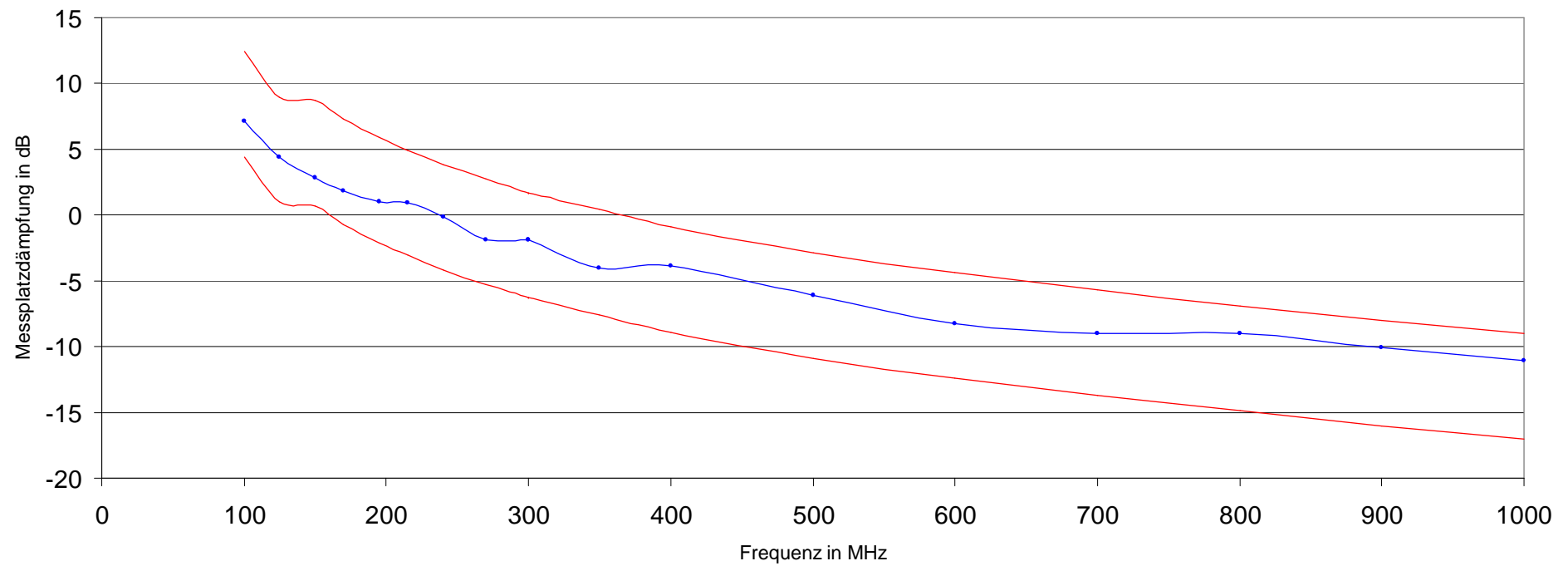


Abb. 36: Messplatzdämpfung 10 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, vertikal, mit Präzisions- Dipolen

## 6.1.2. 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg

Breitbandantennen, 3m, horizontal, Altlandsberg

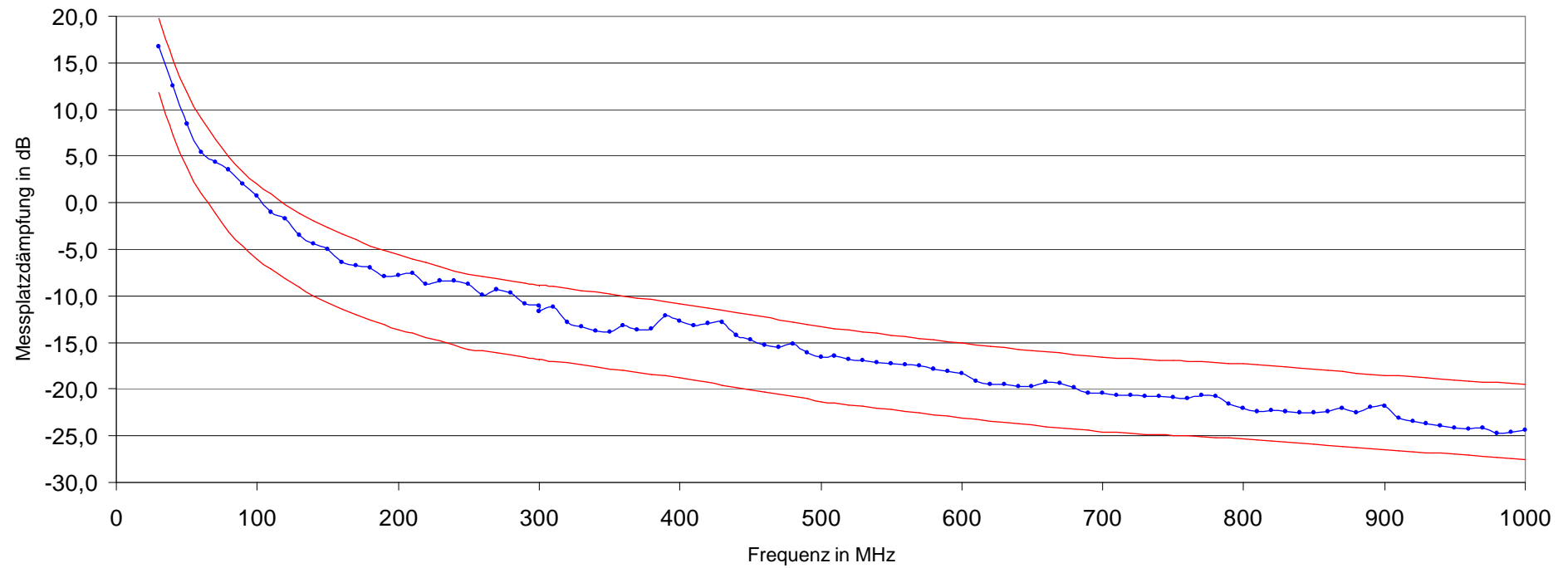


Abb. 37: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, horizontal, mit Breitbandantennen

## Breitbandantennen; 3m vertikal, Altlandsberg

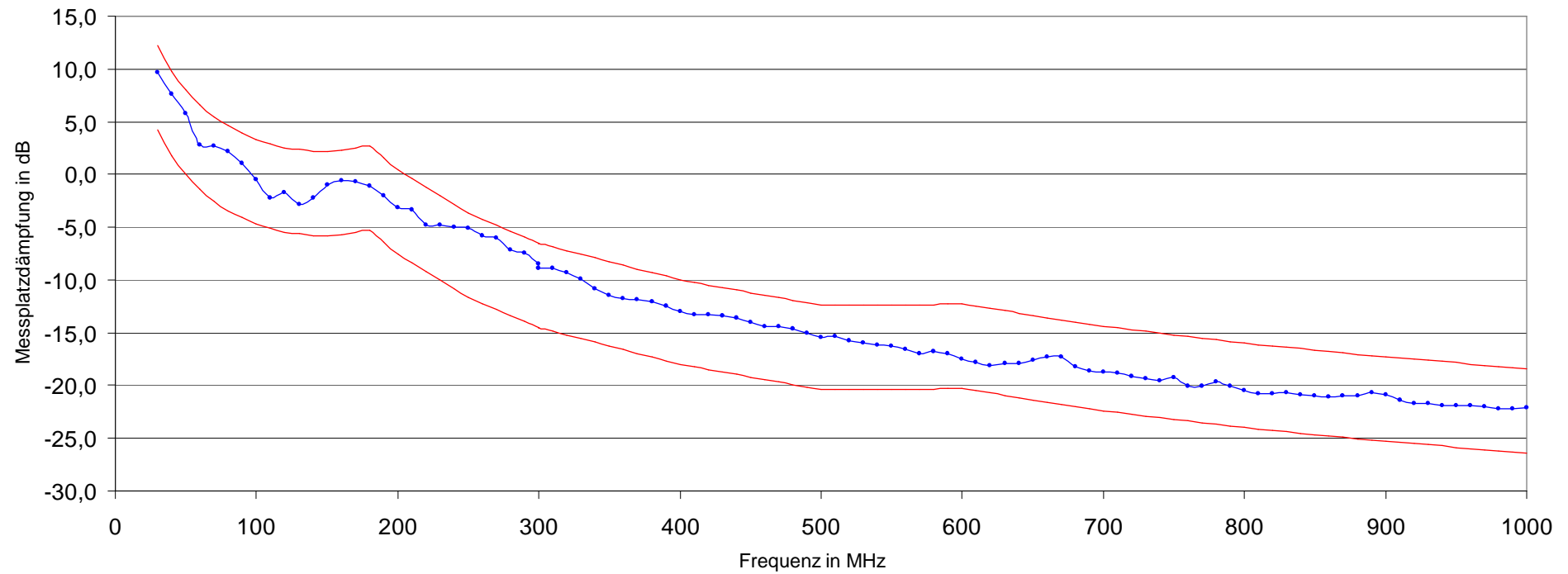


Abb. 38: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, vertikal, mit Breitbandantennen



## Präzisions- Dipole, 3m, horizontal, Altlandsberg

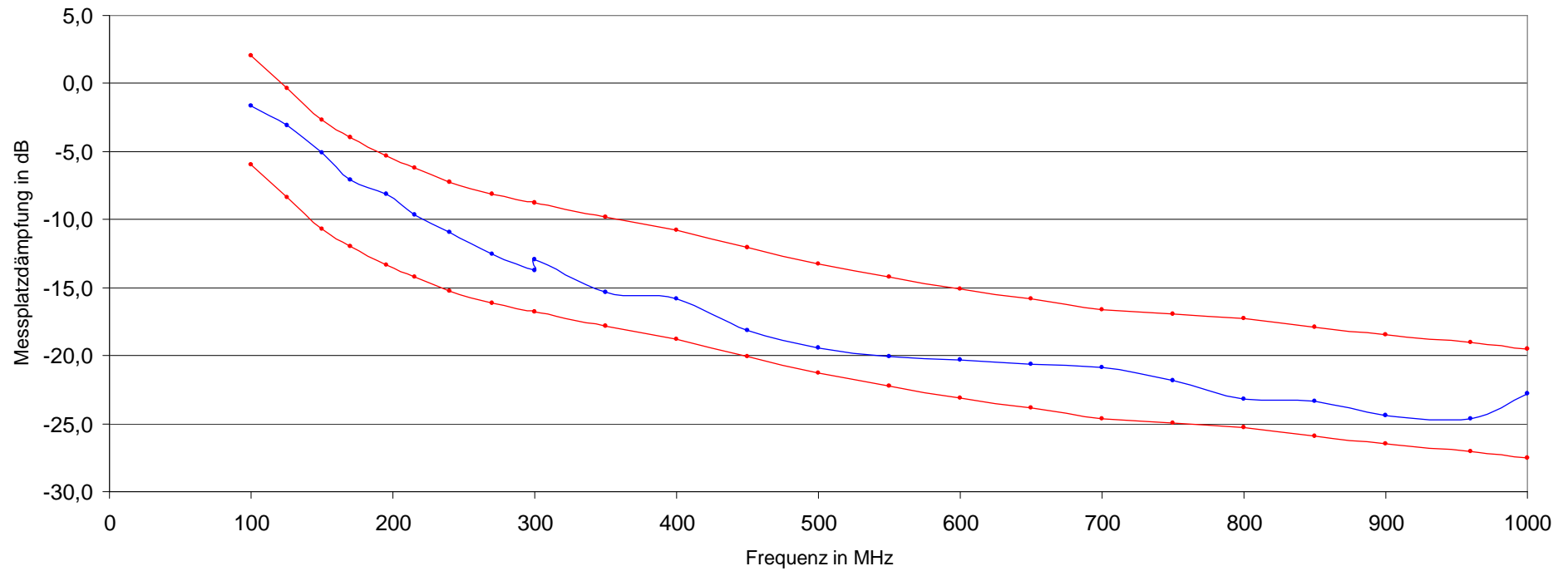


Abb. 39: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, horizontal, mit Präzisions- Dipolen

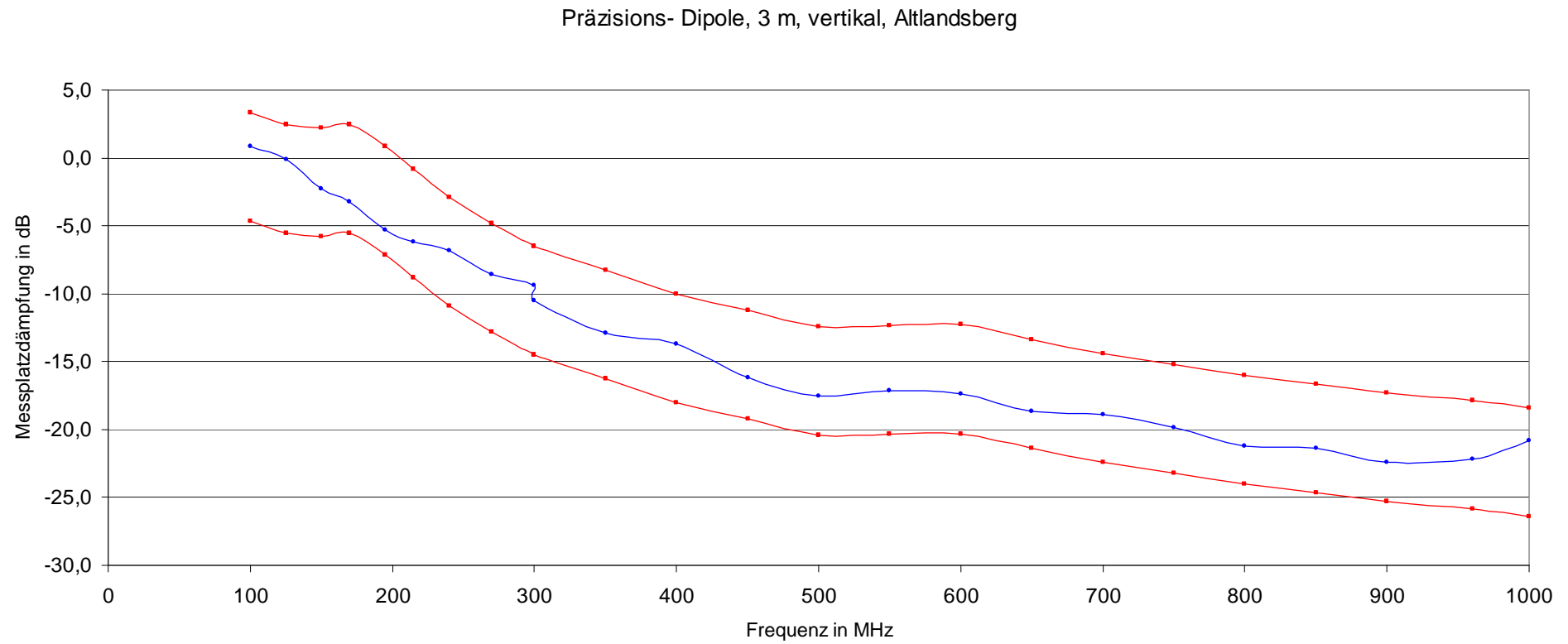


Abb. 40: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, vertikal, mit Präzisions- Dipolen

Referenzstrahlungsquelle, 3 m, horizontal, Altlandsberg, ohne Grundplane

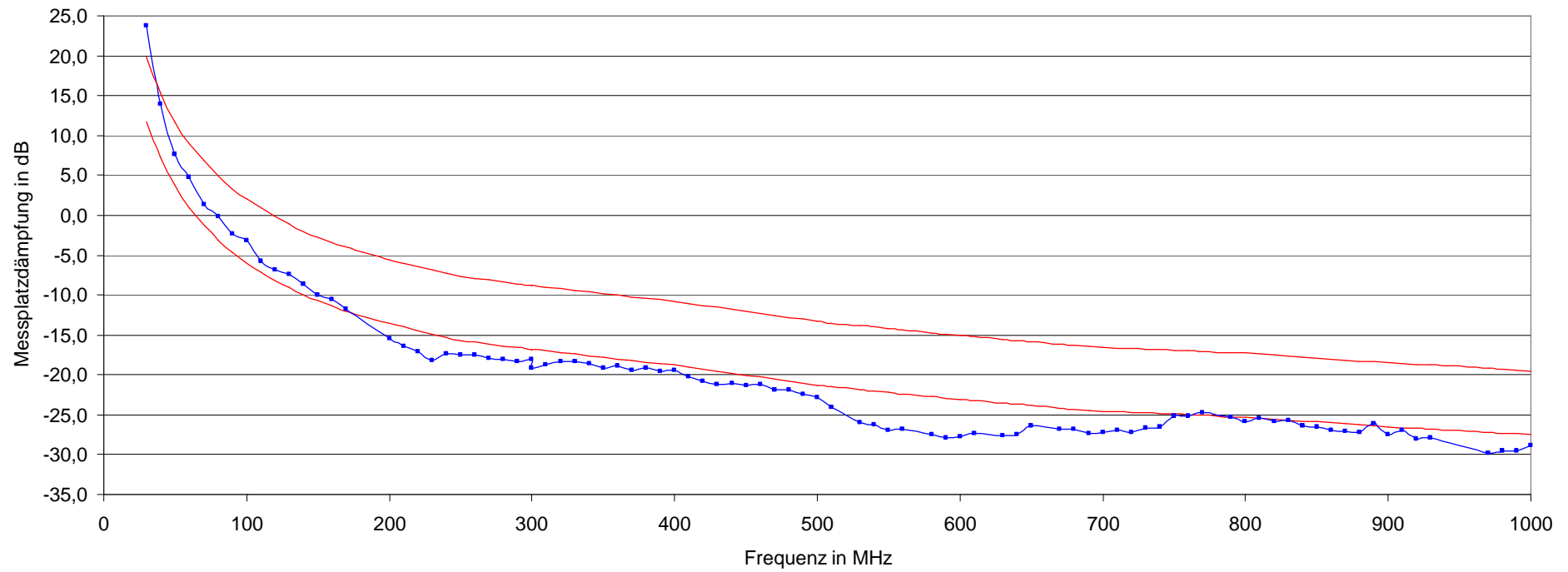


Abb. 41: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, horizontal, mit Referenzstrahlungsquelle, ohne Grundplane

Referenzstrahlungsquelle, 3 m, vertikal, Altlandsberg, ohne Groundplane

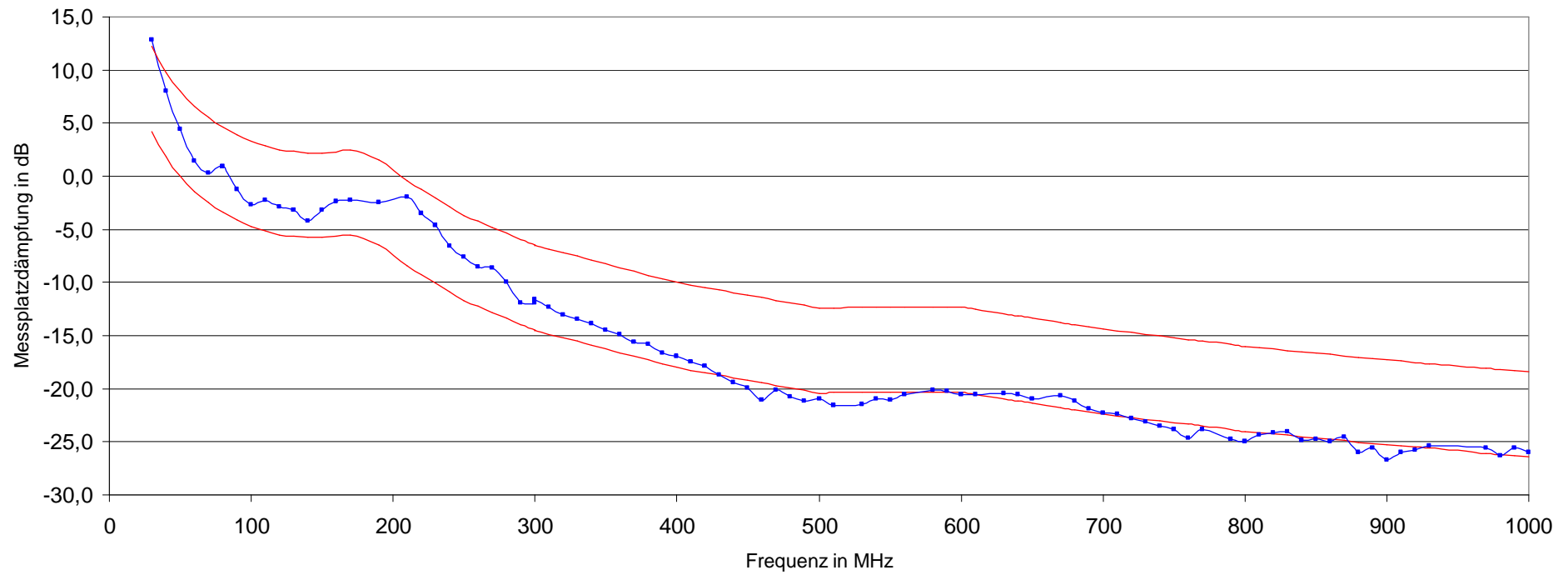


Abb. 42: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, vertikal, mit Referenzstrahlungsquelle, ohne Groundplane

Referenzstrahlungsquelle, 3 m, horizontal, Altlandsberg, mit Groundplane

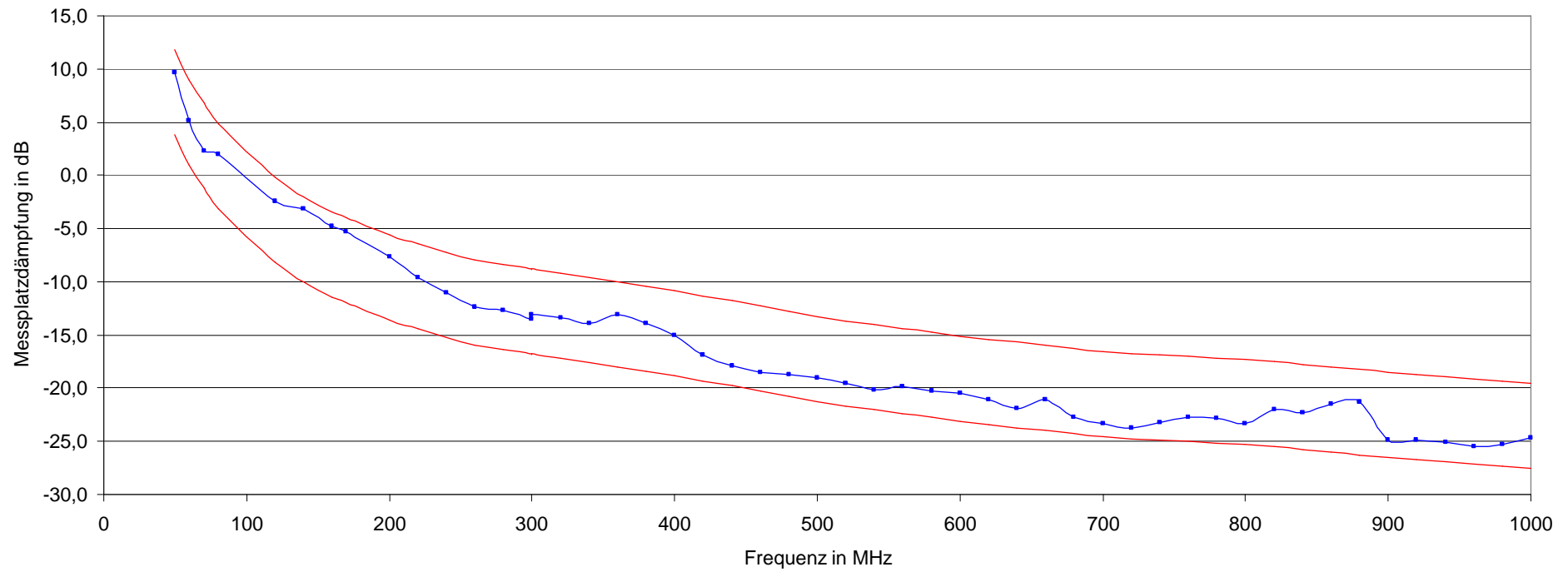


Abb. 43: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, horizontal, mit Referenzstrahlungsquelle, mit Groundplane

Referenzstrahlungsquelle, 3 m, vertikal, Altlandsberg, mit Groundplane

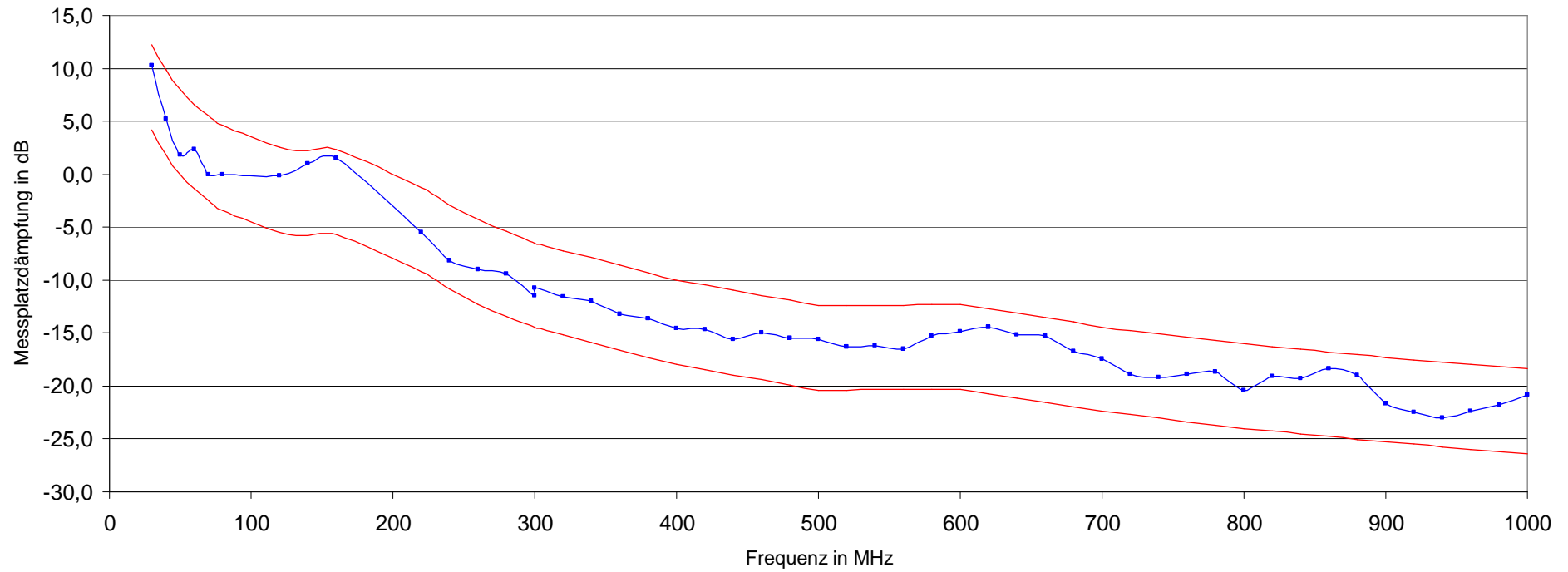


Abb. 44: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, vertikal, mit Referenzstrahlungsquelle, mit Groundplane

## 6.1.3. 3 m- Freifeldmessplatz Reichl- EMV

Breitbandantennen, 3m, horizontal, Reichl- EMV

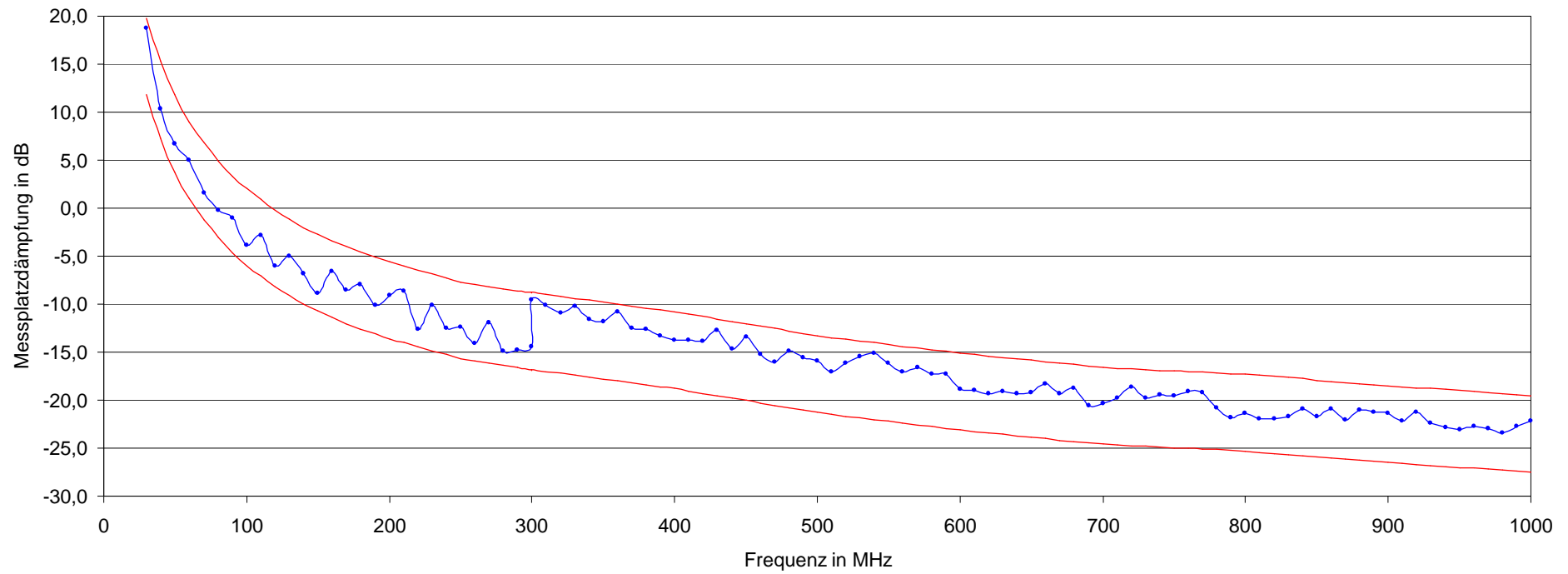


Abb. 45: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Reichl- EMV, horizontal, mit Breitbandantennen

## Breitbandantennen; 3m vertikal, Reichl- EMV

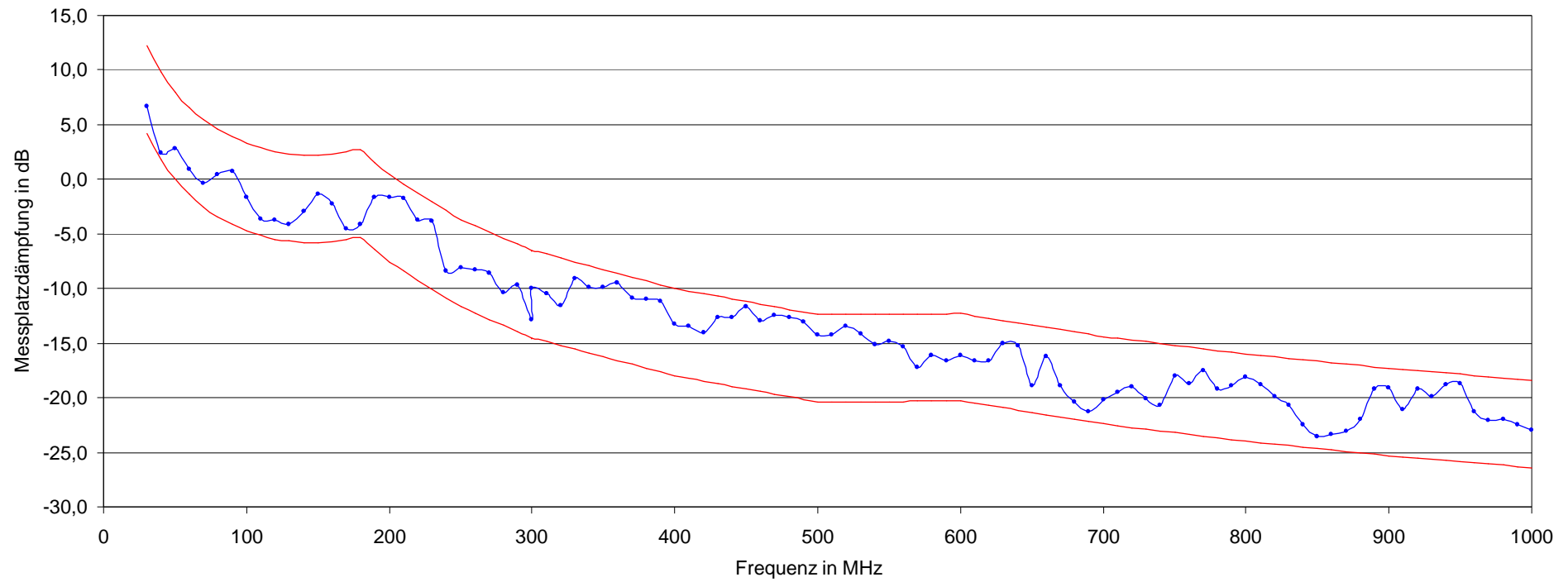


Abb. 46: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Reichl- EMV, vertikal, mit Breitbandantennen



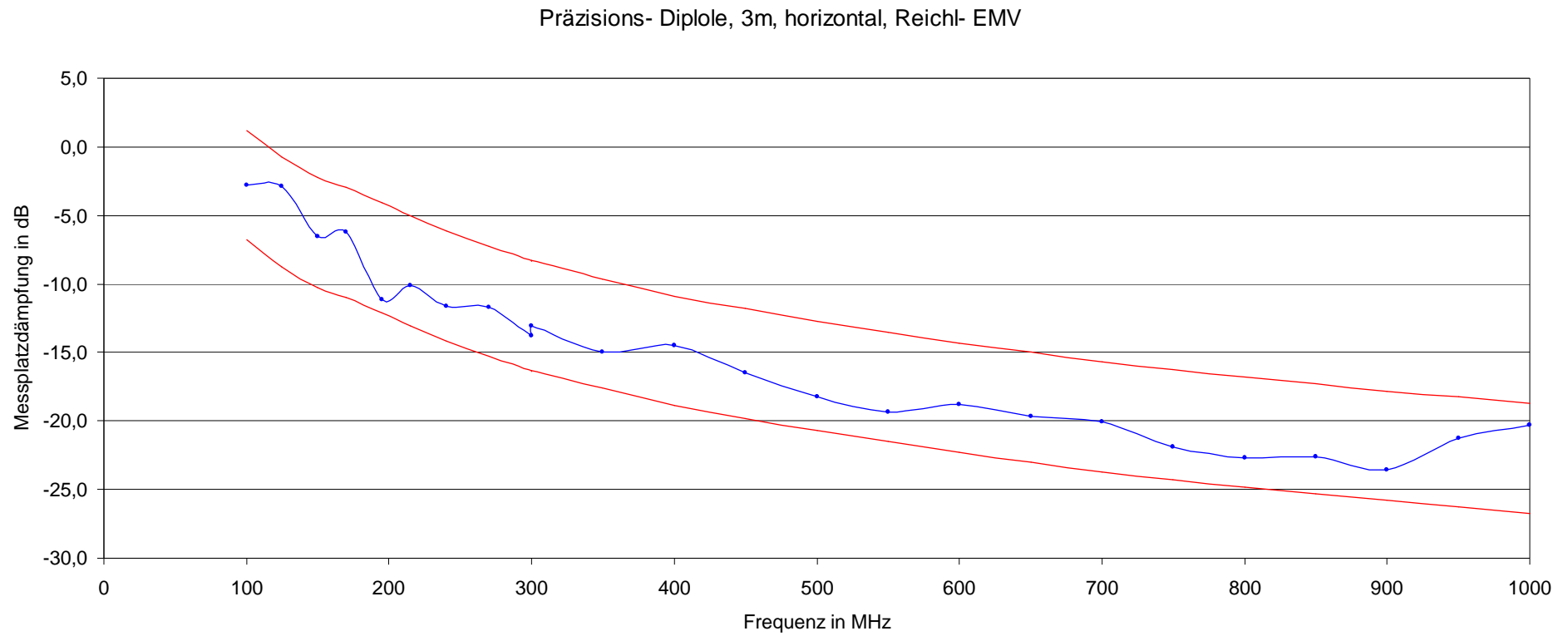


Abb. 47: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Reichl- EMV, horizontal, mit Präzisions- Dipolen

## Präzisions- Dipole, 3m, vertikal, Reichl- EMV

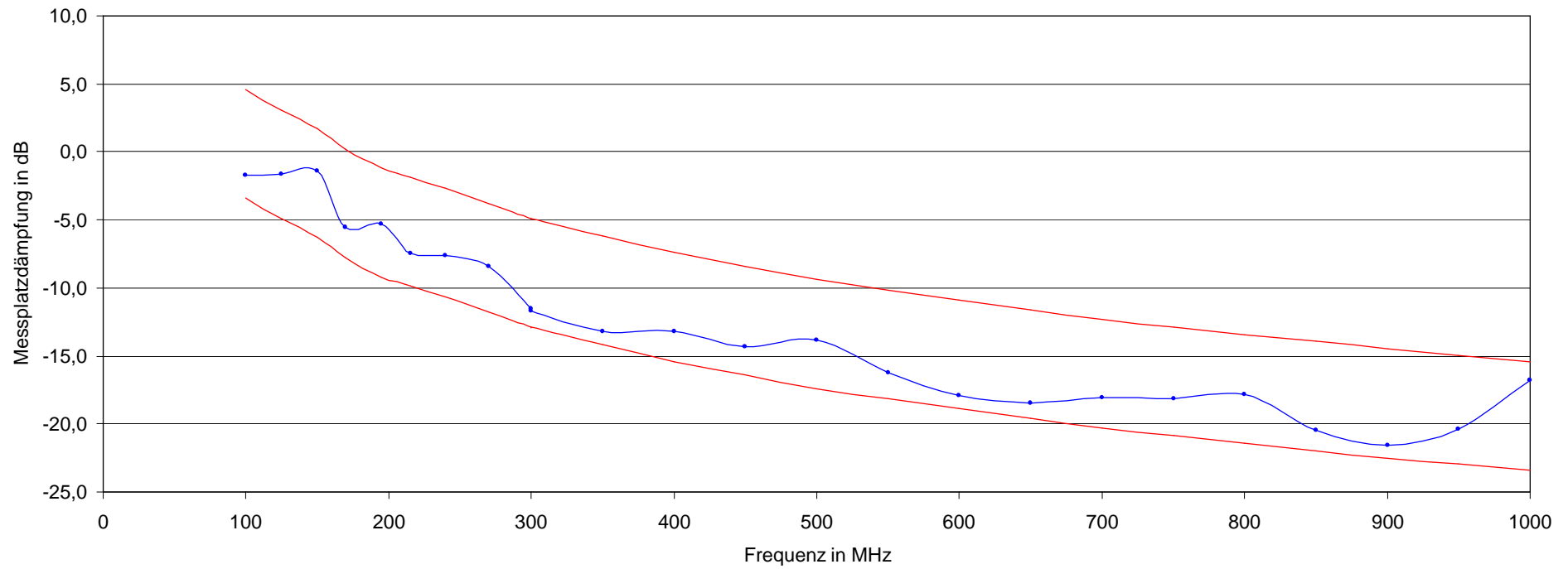


Abb. 48: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Reichl- EMV, vertikal, mit Präzisions- Dipolen

Referenzstrahlungsquelle, 3m, horizontal, Reichl- EMV

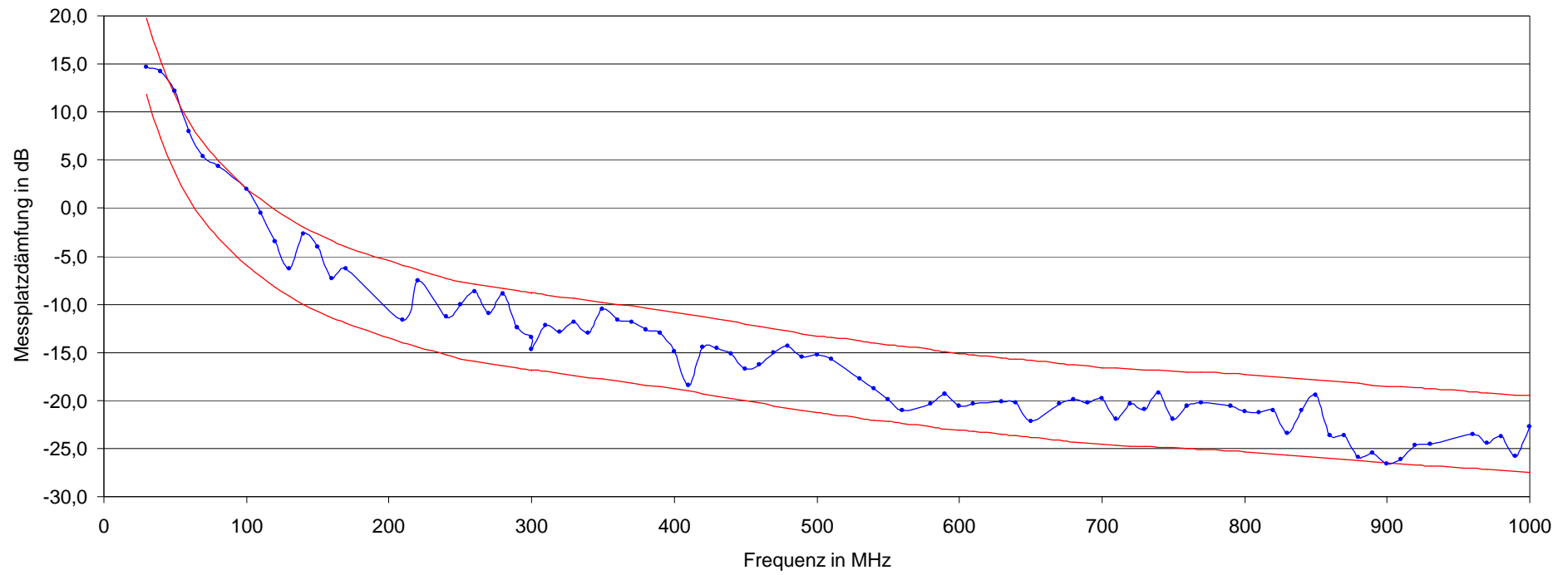


Abb. 49: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz, Reichl- EMV, horizontal, mit Referenzstrahlungsquelle

Referenzstrahlungsquelle, 3m, vertikal, Reichl- EMV

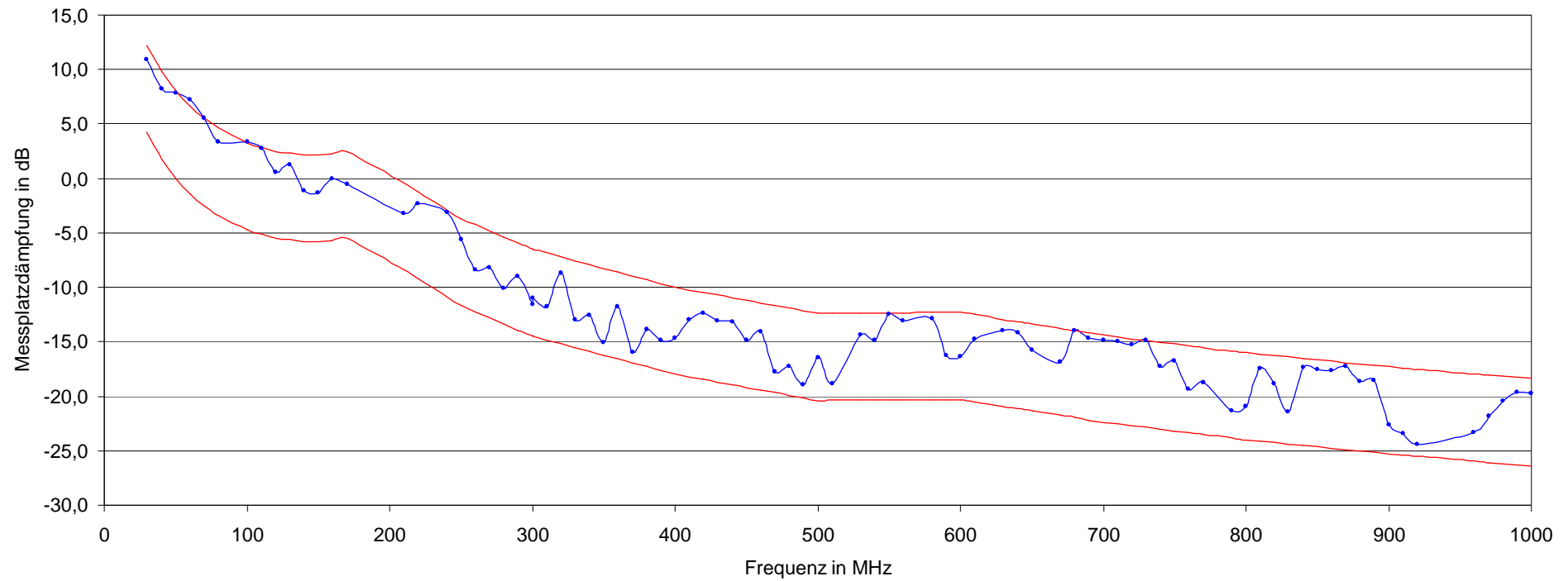


Abb. 50: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz, Reichl- EMV, vertikal, mit Referenzstrahlungsquelle

## 6.1.4. 3 m- Absorberhalle Messlabor D

Breitbandantennen, 3m, horizontal, Messlabor D

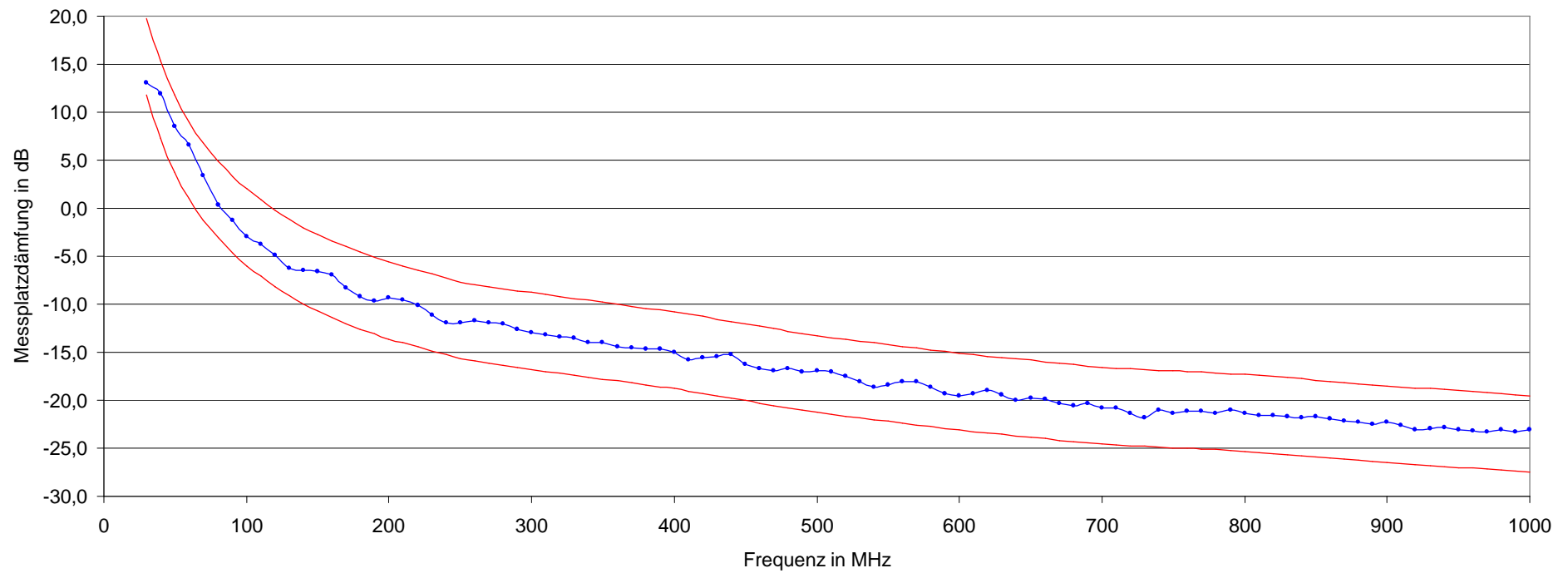


Abb. 51: Messplatzdämpfung 3 m- Absorberhalle, horizontal, mit Breitbandantennen

## Breitbandantennen, 3m, vertikal, Messlabor D

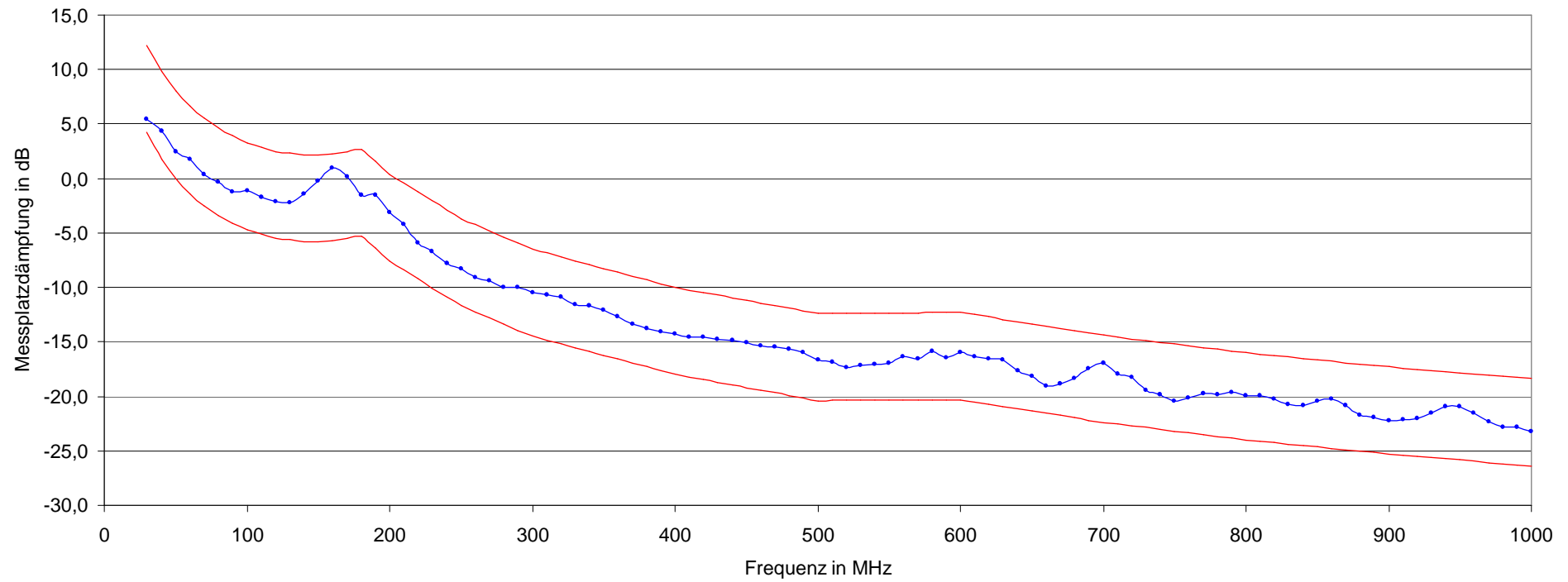


Abb. 52: Messplatzdämpfung 3 m- Absorberhalle, vertikal, mit Breitbandantennen

Referenzstrahlungsquelle, 3m, horizontal, Messlabor D

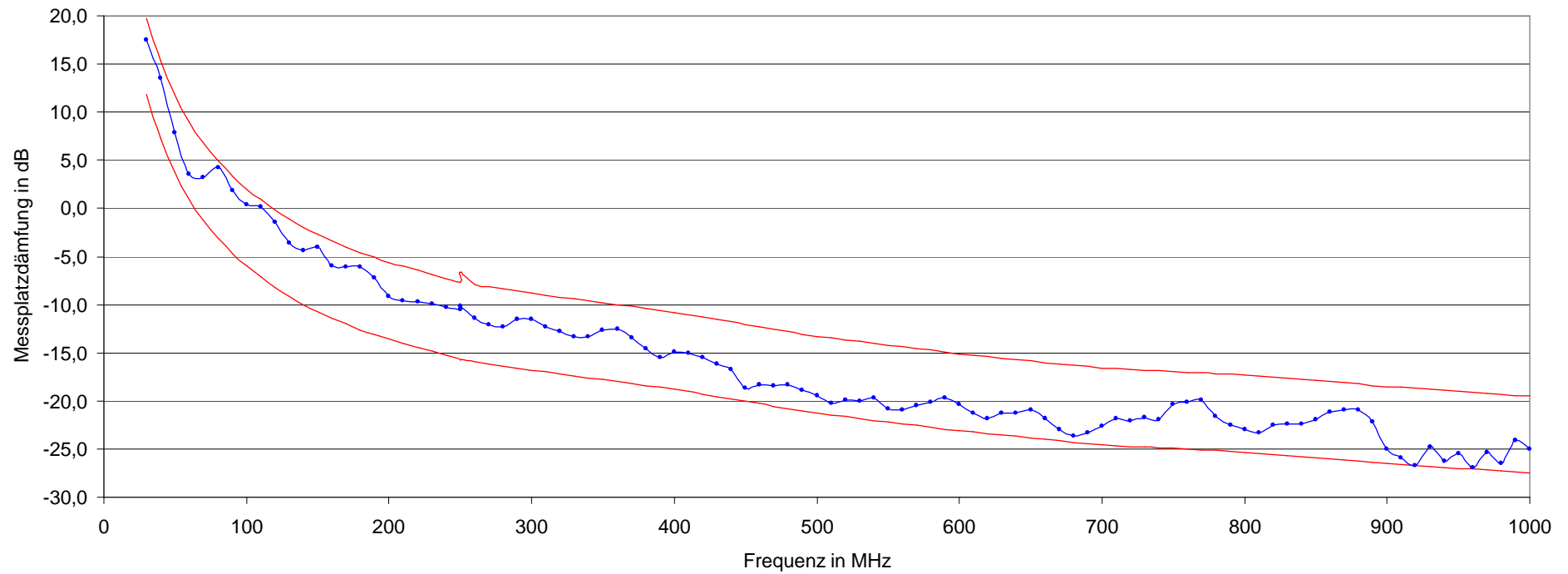


Abb. 53: Messplatzdämpfung 3 m- Absorberhalle Messlabor D, horizontal, mit Referenzstrahlungsquelle

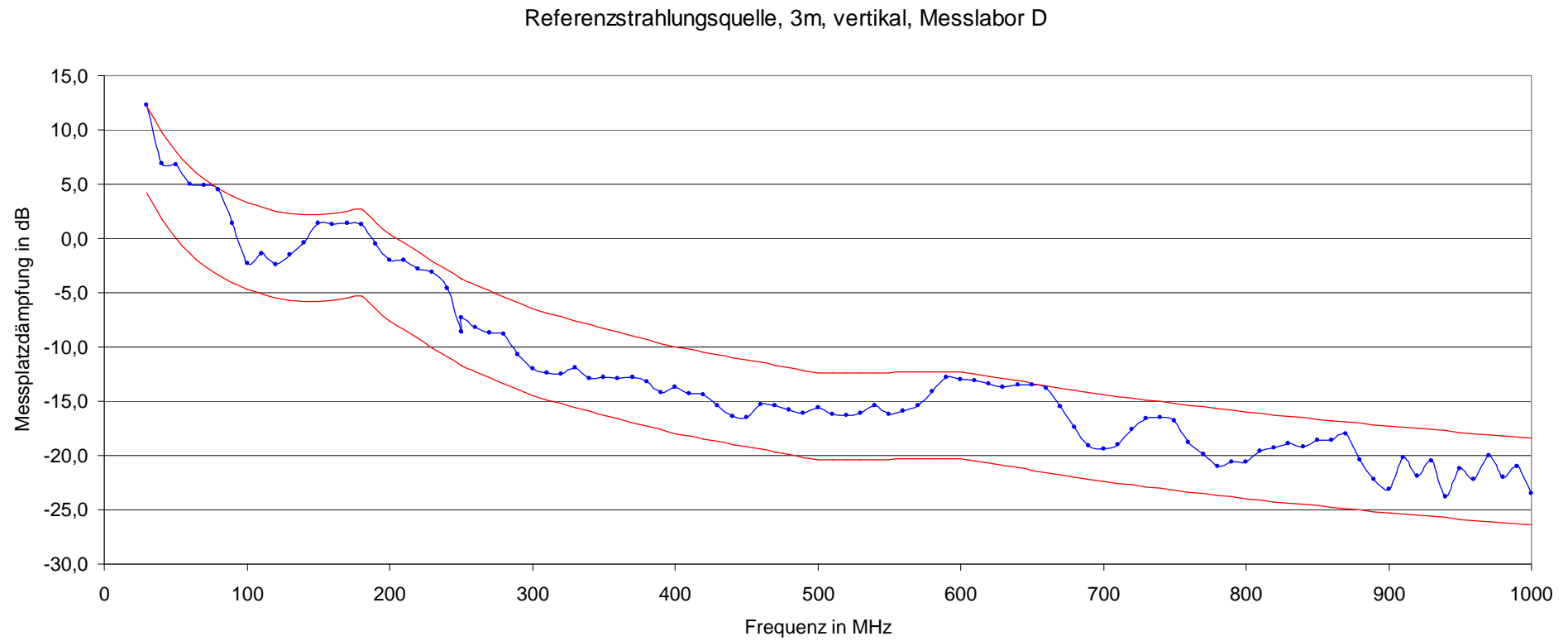


Abb. 54: Messplatzdämpfung 3 m- Absorberhalle Messlabor D, vertikal, mit Referenzstrahlungsquelle



## 6.1.5. 3 m- Absorberhalle Bundesnetzagentur

Breitbandantennen, 3m, horizontal, Bundesnetzagentur

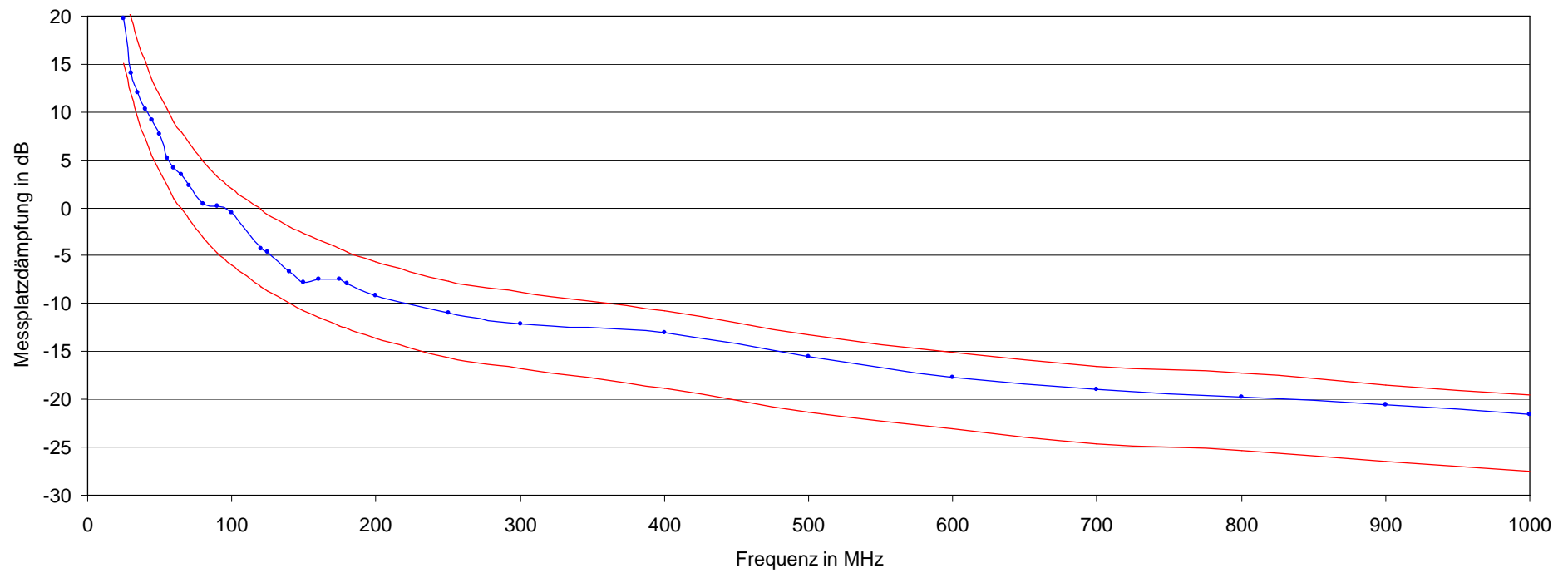


Abb. 55: Messplatzdämpfung 3 m- Absorberhalle, horizontal, mit Breitbandantennen

Breitbandantennen; 3m vertikal, Bundesnetzagentur

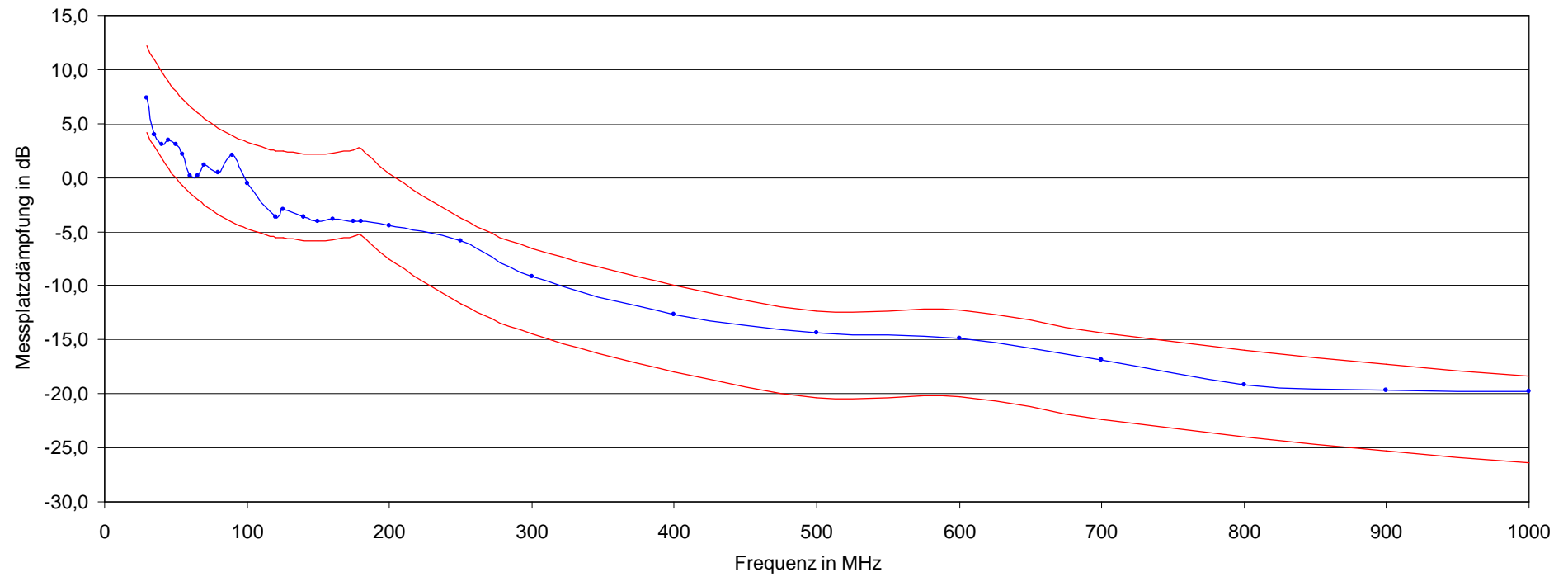


Abb. 56: Messplatzdämpfung 3 m- Absorberhalle, vertikal, mit Breitbandantennen

## 6.1.6. 10 m- Absorberhalle Bundesnetzagentur

Breitbandantenne, 10m, horizontal, Bundesnetzagentur

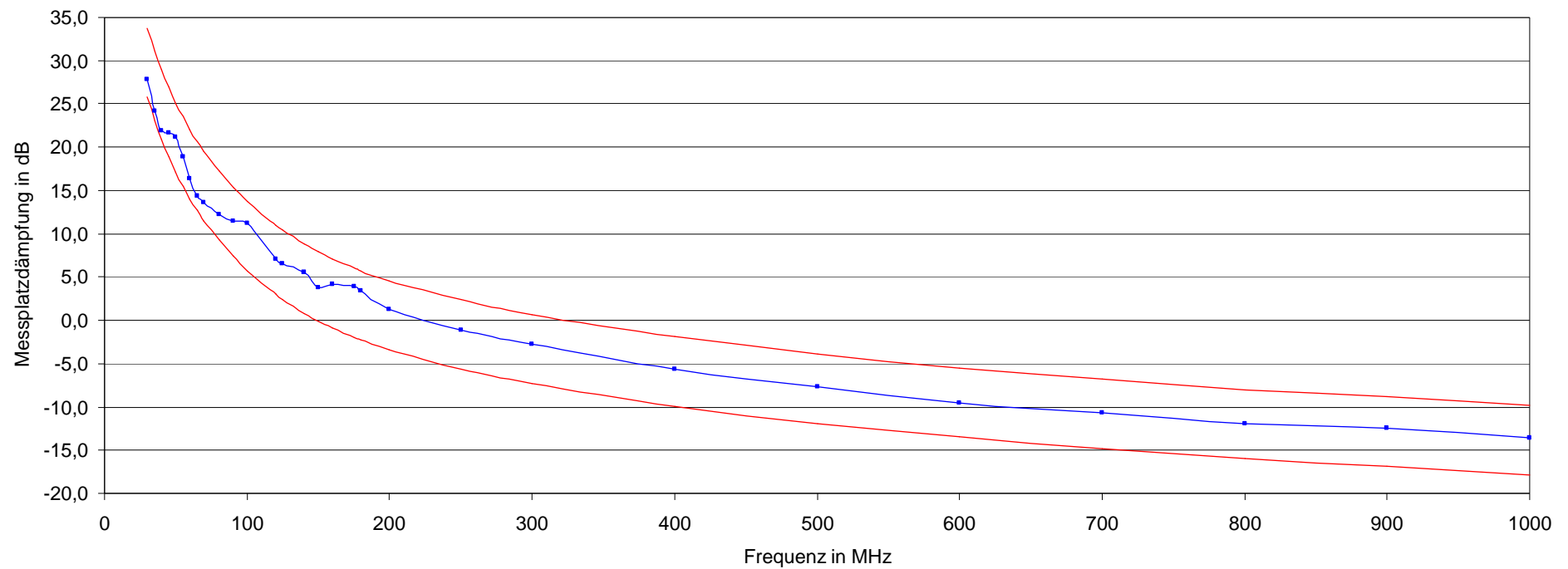


Abb. 57: Messplatzdämpfung 10 m- Absorberhalle, horizontal, mit Breitbandantennen

Breitbandantenne, 10m, vertikal, Absorberhalle Bundesnetzagentur

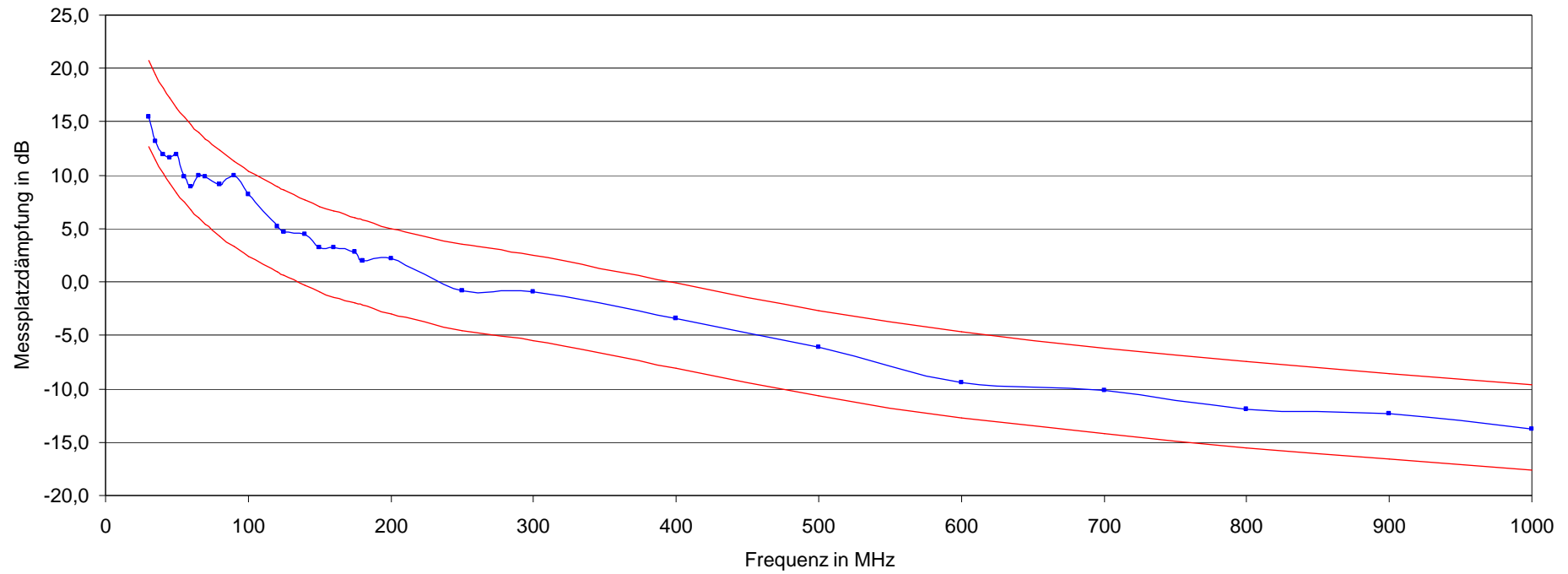


Abb. 58: Messplatzdämpfung 10 m- Absorberhalle, vertikal, mit Breitbandantennen

## 6.1.7. GTEM- Zelle der FHTW- Berlin

Vergleich: GTEM- Zelle mit Kalibrierung; KSQ, 3m, horizontal

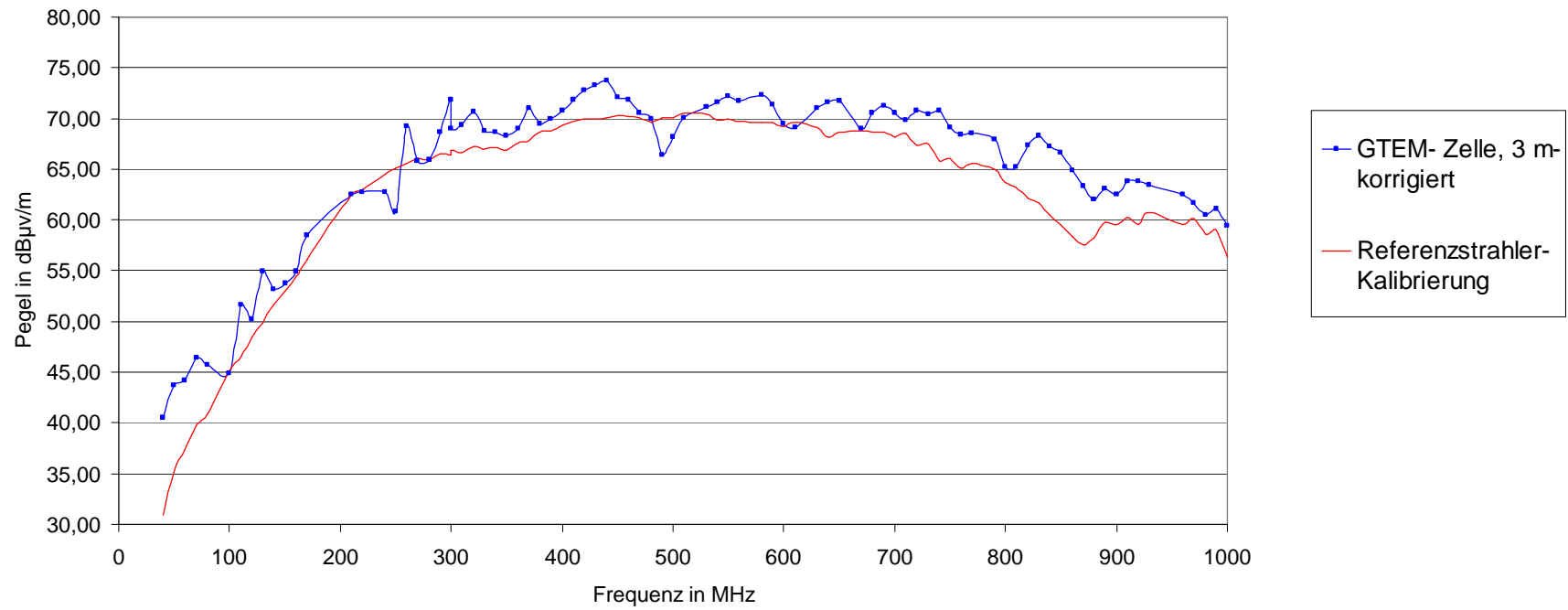


Abb. 59: Vergleich: GTEM- Zelle mit Kalibrierung, Referenzstrahlungsquelle, horizontal, 3 m korrigiert

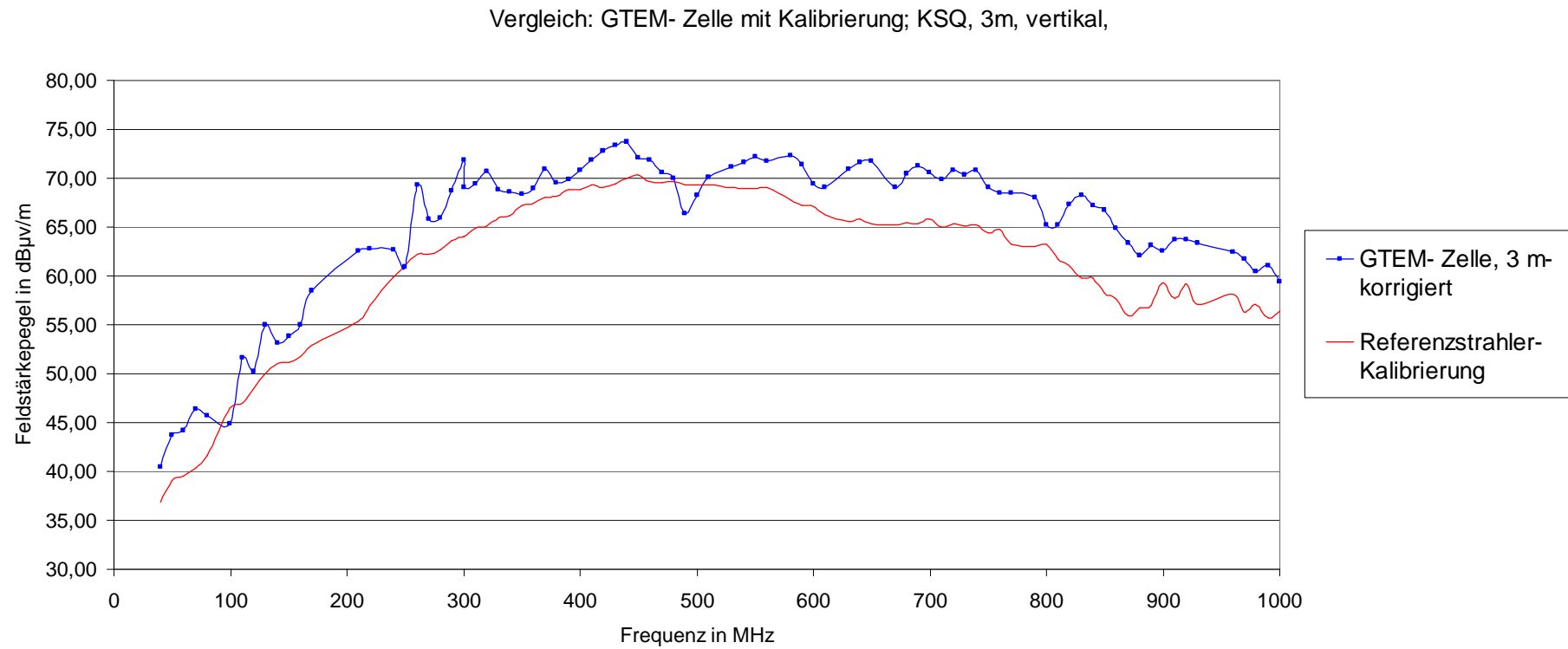


Abb. 60: Vergleich: GTEM- Zelle mit Kalibrierung, Referenzstrahlungsquelle, vertikal, 3 m korrigiert

## 6.2. Realer Prüfling

Zur Evaluierung der Messstrecken konnte der nicht-entstörte Prototyp eines Kundengerätes verwendet werden. Dieses Gerät weist ein ausgeprägtes Spektrum von Harmonischen der Taktfrequenz von 5 MHz auf, die bis etwa 300 MHz nachweisbar sind. Zusätzlich werden von Schaltreglern einige breitbandige Signale generiert, deren Amplituden aber nicht relevant waren. Das Gerät besitzt eine Vielzahl von I/O-Leitungen.

Zur Gewährleistung eines reproduzierbaren Prüfaufbaues wurden das Gerät und die Leitungen auf einer Holzkonstruktion fixiert. Die Länge aller Leitungen mit Ausnahme der Stromversorgungsleitung ist auf 80 cm Länge begrenzt. Gespeist wird der Prüfling mit 24 VDC aus Batterien.

Gemessen wurde die Emission des Prüflings auf folgenden Messplätzen:

- Absorptionswandlerzange MDS,
- 10 m- Freifeld Altlandsberg,
- 3 m- Freifeld Altlandsberg,
- 3 m- Freifeld Reichl- EMV,
- 3 m- Absorberhalle Messlabor D
- 3 m- Absorberhalle Messlabor P.

Messungen in der Absorberhalle bei der Bundesnetzagentur konnten aus logistischen Gründen nicht durchgeführt werden. Für eine Prüfung in der GTEM-Zelle sind die räumlichen Abmessungen des Prüflings zu groß. Die Messreihen im Labor P konnten aus zeitlichen Gründen nur auf festen Antennenhöhen ohne Höhenscans erfolgen.

Auf den Freifeld-Messplätzen wurden die höhenabhängigen Maxima für ausgewählte Frequenzen ermittelt. Um die Messergebnisse besser vergleichen zu können, ist auf die Drehung des Prüflings um seine vertikale Achse verzichtet worden. Alle Ergebnisse der 3 m-Messplätze sind mit dem in Kap. 5.1.1. beschriebenen Verfahren „auf 10 m“ korrigiert.

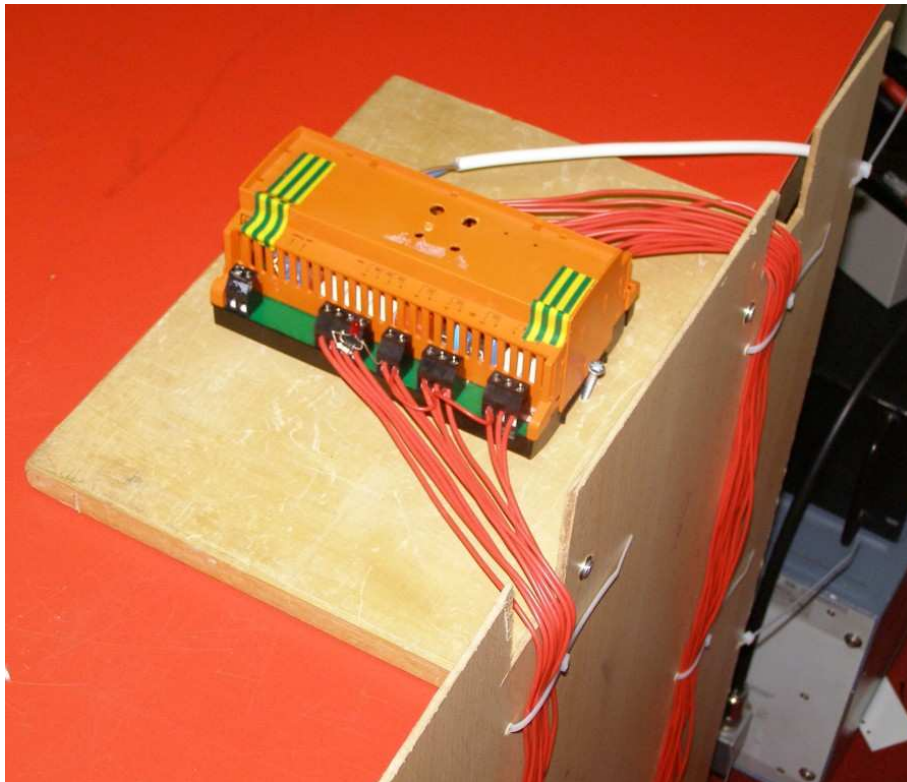


Abb. 61: Fotos: Realer Prüfling auf Holzkonstruktion



## 6.2.1. Messung mit der Absorptionmesswandlerzange

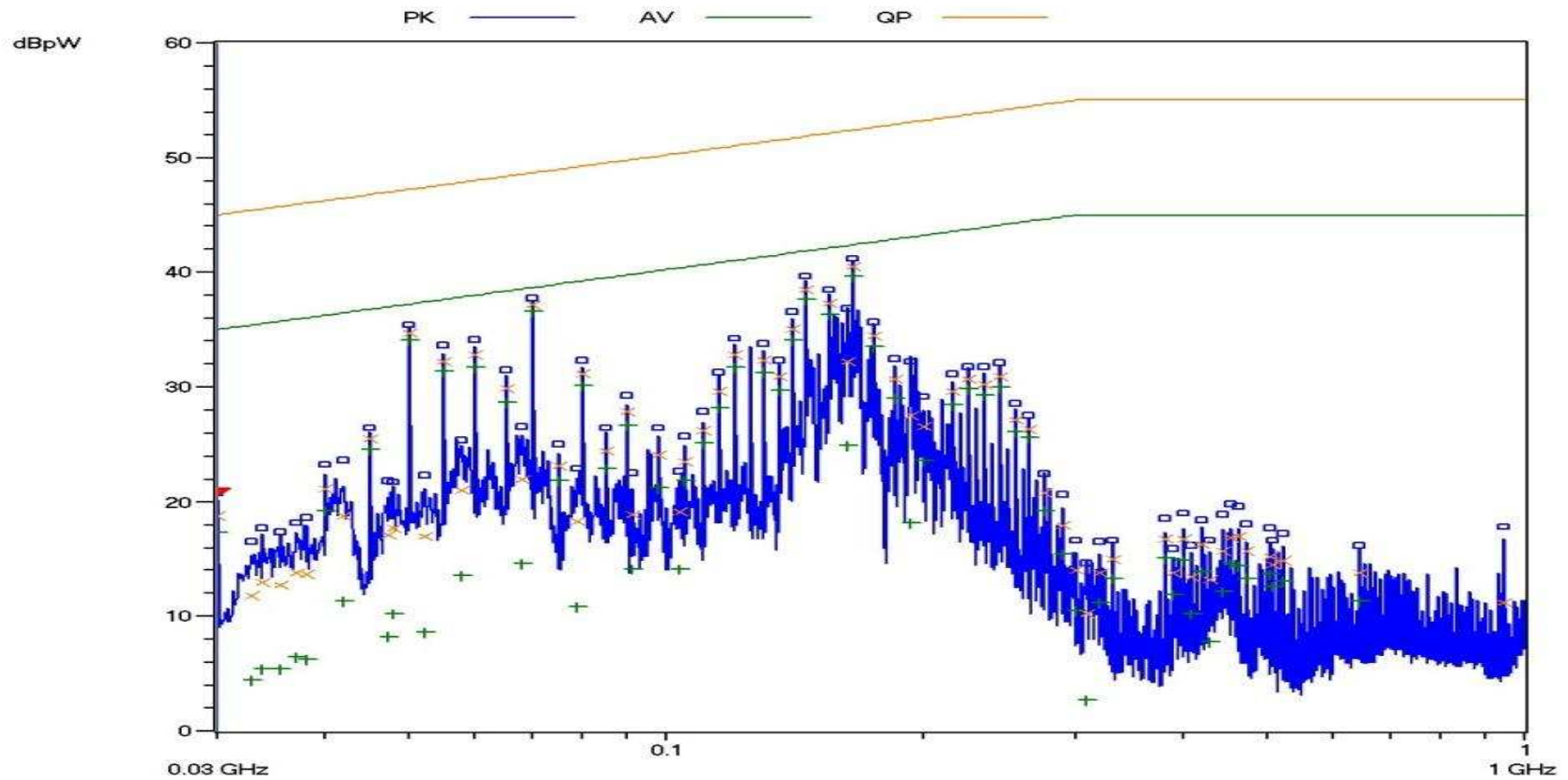


Abb. 62: Vorbereitende Messung mit der Absorptionmesswandlerzange

## 6.2.2. Ergebnisse der verschiedenen Messplätze, horizontal

<b>Frequenz</b>	<b>10 m</b>	<b>3 m</b>	<b>3 m</b>	<b>3 m</b>	<b>3 m</b>
<b>[MHz]</b>	<b>Altlandsberg</b>	<b>Altlandsberg</b>	<b>Reichl- EMV</b>	<b>Messlabor D</b>	<b>Messlabor P*</b>
	<b>[dB<math>\mu</math>V/m]</b>	<b>[dB<math>\mu</math>V/m]</b>	<b>[dB<math>\mu</math>V/m]</b>	<b>[dB<math>\mu</math>V/m]</b>	<b>[dB<math>\mu</math>V/m]</b>
45		16,6	13,8		
50		16,4	19,2		
55		17,1	12,1		
60		16,6	17,1		
65		17,0	17,5		
70		19,4	24,7		
80		16,3	22,7		
110		17,4	19,1		
115		17,5	18,1		
120		17,9	24,1		19,1
125		19,3	24,6		
130		21,0	13,9		16,3
135		19,0	12,2		
140		20,2	12,2		16,8
145	33,7	30,6	20,6	24,7	
150		31,1	23,6		25,8
155	34,6	31,1	22,8	37,0	31,8
165	34,2	29,3	33,1	32,8	28,8
185	39,7		24,6		29,3
215	31,9	22,6	32,6		29,5
220	37,3	26,8	33,3		28,9
235		26,2	25,4		
245	33,3	30,0	26,7	20,3	
255		31,6	30,8		

\* = ohne Höhenscan

Abb. 63: Tabelle: Messergebnisse Realer Prüfling, horizontal

## 6.2.3. Ergebnisse der verschiedenen Messplätze, vertikal

<b>Frequenz</b>	<b>10 m</b>	<b>3 m</b>	<b>3 m</b>	<b>3 m</b>	<b>3 m</b>
<b>[MHz]</b>	<b>Altlandsberg</b>	<b>Altlandsberg</b>	<b>Reichl- EMV</b>	<b>Messlabor D</b>	<b>Messlabor P*</b>
	<b>[dB<math>\mu</math>V/m]</b>	<b>[dB<math>\mu</math>V/m]</b>	<b>[dB<math>\mu</math>V/m]</b>	<b>[dB<math>\mu</math>V/m]</b>	<b>[dB<math>\mu</math>V/m]</b>
50	28,8	20,4	25,1	20,4	
55	27,6	23,3	19,6	25,5	
60	34,6	27,0	23,1		
65		30,7	20,4	31,6	
70	34,1	34,6	34,5	33,8	23,1
80	28,6	26,8	32,4		18,9
90		24,3		25,9	25,1
110	25,3	18,3			20,0
115	31,8	19,2	18,2		22,8
120	28,1	16,9	22,0		24,2
125		20,1	20,1		25,8
130	29,3	21,8	25,4		25,7
135		19,7	20,3		17,1
140	29,3	18,7	18,2		
145	32,8	26,2	24,2		
150	30,2	25,2	22,0		22,4
155	33,6	26,8	24,4		27,3
165	31,9	19,8	36,7		28,6
185	35,6	28,3		30,1	26,4
215	31,9	22,3	25,6		
220	44,3		22,4		16,5
235	32,9	24,6	24,5	24,8	
245	33,2	25,8	23,3	18,8	
255		25,5	27,2		

\* = ohne Höhenscan

Tabelle: Messergebnisse Realer Prüfling, vertikal

### 6.3. Messverfahren

In den 3 m- Absorberhallen im Messlabor P und im Messlabor D sind mittels der Referenzstrahlungsquelle die Unterschiede zwischen halbautomatischen und manuellen Messverfahren untersucht worden. Die halbautomatischen Messungen wurden mit beiden Polarisationssebenen bei festen Antennenhöhen, die manuellen Messungen hingegen mit Höhenscans durchgeführt. (s. Kap. 4.6.)

In der Praxis werden für Vormessungen bei beiden Antennenpolarisationen (horizontal, vertikal) jeweils zwei unterschiedliche Höhen verwendet; entstehende Abweichungen werden dadurch minimiert. Es werden in den Diagrammen neben den Ergebnissen des Höhenscans die Maxima der Summe der beiden Vormessungen dargestellt.

Ferner wurde auf den 3 m- Freifeldmessplätzen Altlandsberg und Reich-EMV am realen Prüfling der Einfluss geringfügiger Änderung der Prüflingshöhe auf die Messergebnisse untersucht und der auffällige Frequenzbereich tabellarisch dargestellt.

## 6.3.1. Vergleich: Kalibrierung – feste Höhe, Referenzstrahlungsquelle, Messlabor P

Vergleich: Kalibrierung - feste Höhe (2 m), Referenzstrahlungsquelle, horizontal

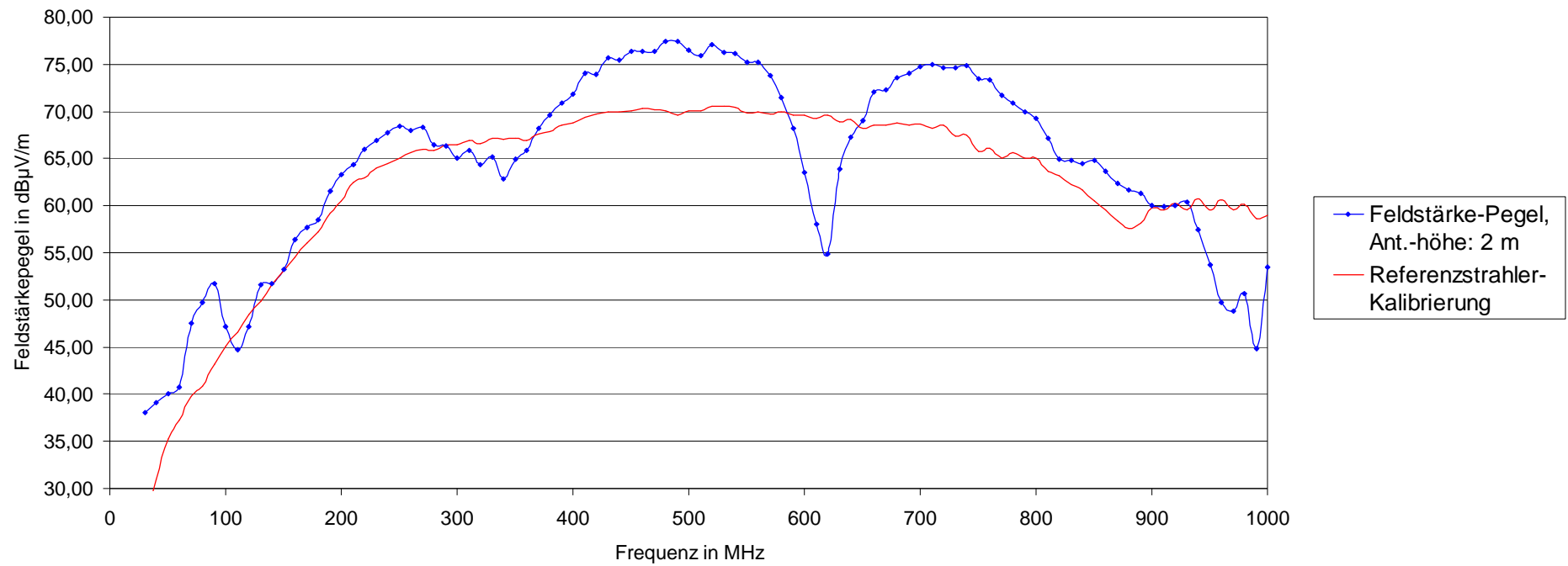


Abb. 64: Vergleich: Kalibrierung – feste Höhen, horizontal, Messlabor P

Vergleich: Kalibrierung - feste Höhe (2 m), Referenzstrahlungsquelle, vertikal

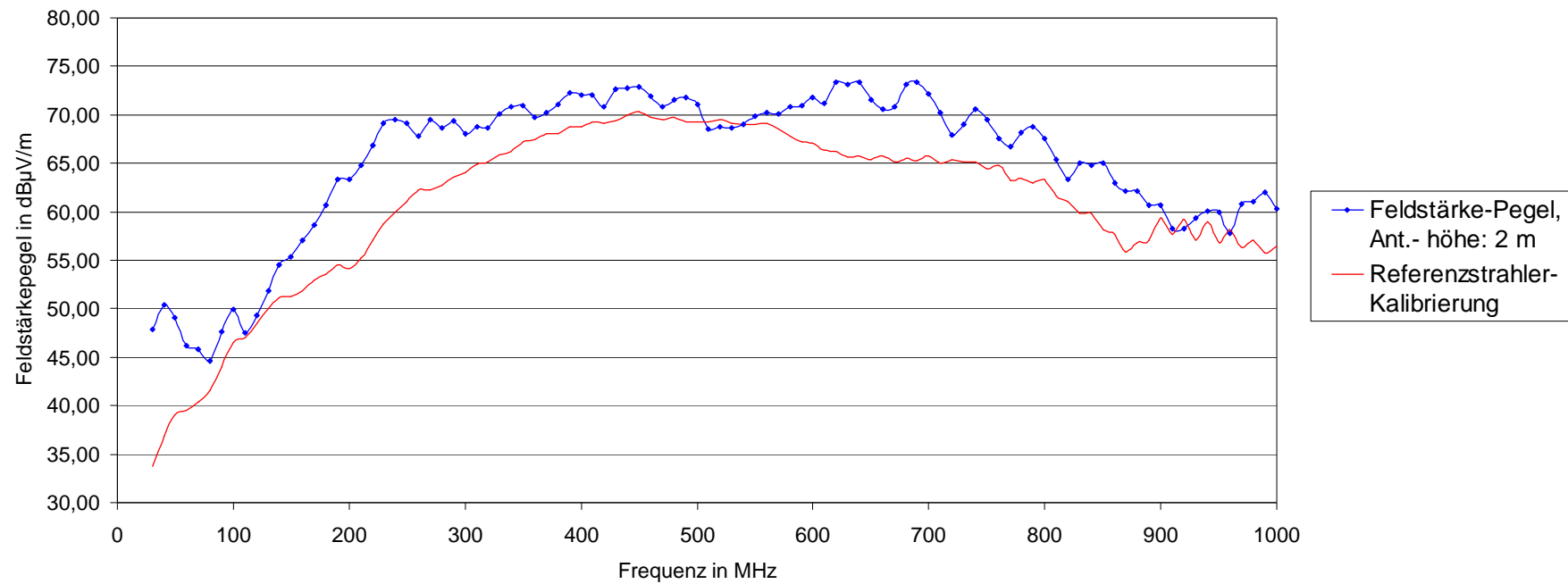


Abb. 65: Vergleich: Kalibrierung – feste Höhen, vertikal, Messlabor P

## 6.3.2. Vergleich: Höhenscan – feste Höhen, Referenzstrahlungsquelle, Messlabor D

Vergleich: "feste Höhen" - Höhenscan - Kalibrierung, horizontal

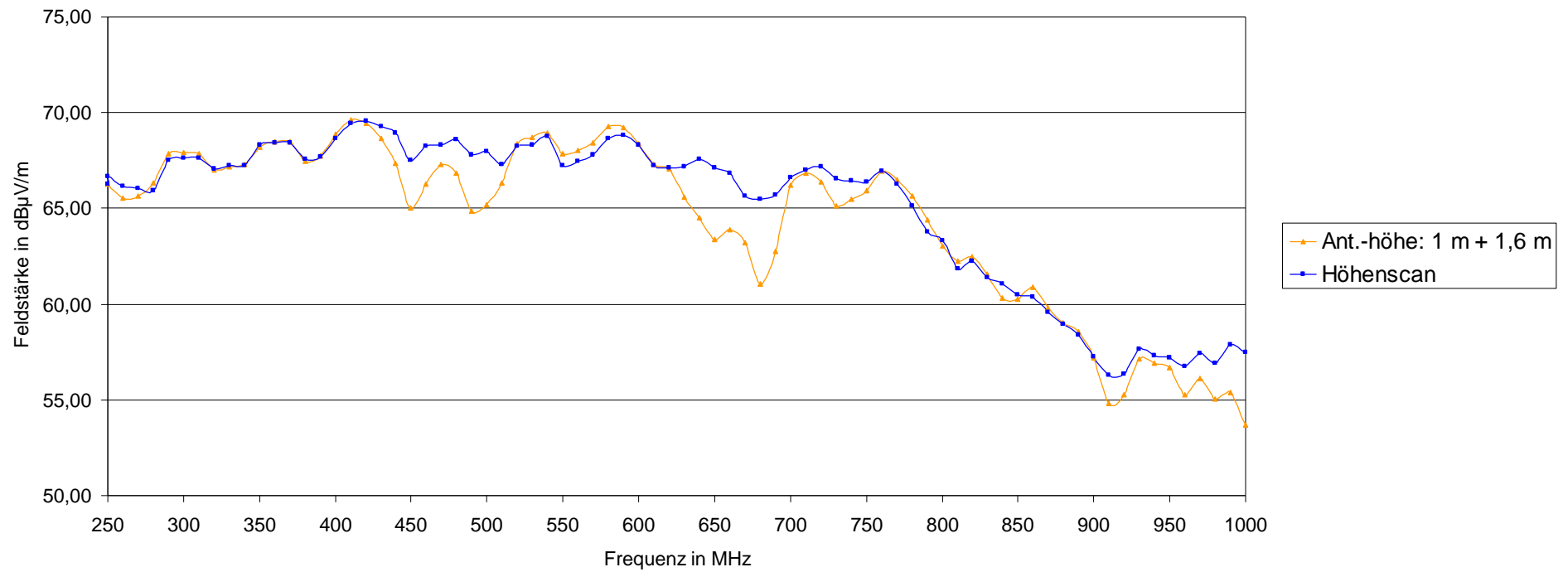


Abb. 66: Vergleich: Höhenscan – feste Höhen, horizontal, Messlabor D

Vergleich: "feste Höhen" - Höhengscan - Kalibrierung, vertikal

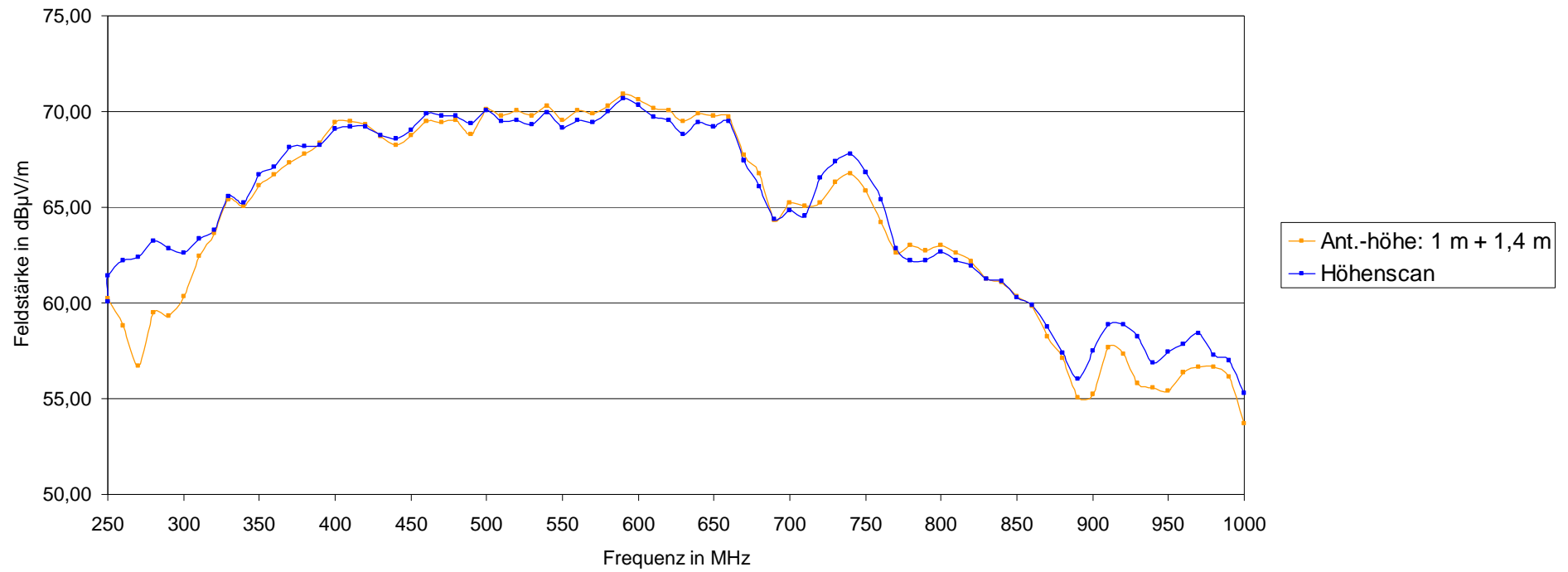


Abb. 67: Vergleich: Höhengscan – feste Höhen, vertikal, Messlabor D



## 6.3.3. Vergleich: 80 cm – 100 cm Prüflingshöhe, Realer Prüfling

<b>Frequenz</b>	<b>80 cm Prüflingshöhe</b>	<b>100 cm Prüflingshöhe</b>
	<b>3 m, vertikal</b>	<b>3 m, vertikal</b>
<b>[MHz]</b>	<b>[dB<math>\mu</math>V/m]</b>	<b>[dB<math>\mu</math>V/m]</b>
<b>135</b>	19,7	19,9
<b>140</b>	18,7	18,1
<b>145</b>	26,2	23,8
<b>150</b>	25,2	23,4
<b>155</b>	26,8	20,2
<b>160</b>	18,8	19,8
<b>165</b>	19,8	21,7
<b>170</b>	20,2	21,2

Abb. 68: Tabelle: Vergleich: 80 cm – 100 cm Prüflingshöhe, Realer Prüfling, vertikal, 3 m- Freifeld Altlandsberg

<b>Frequenz</b>	<b>80 cm Prüflingshöhe</b>	<b>100 cm Prüflingshöhe</b>
	<b>3 m, vertikal</b>	<b>3 m, vertikal</b>
<b>[MHz]</b>	<b>[dB<math>\mu</math>V/m]</b>	<b>[dB<math>\mu</math>V/m]</b>
<b>135</b>	25,1	25,8
<b>140</b>	27,4	27,6
<b>145</b>	21,6	21,8
<b>150</b>	26,7	25,8
<b>155</b>	30,0	28,6
<b>160</b>	26,8	26,3
<b>165</b>	36,1	36,9
<b>170</b>	23,2	22,3

Abb. 69: Tabelle: Vergleich: 80 cm – 100 cm Prüflingshöhe, Realer Prüfling, vertikal, 3 m- Freifeld Reichl- EMV

## 7. Diskussion der Ergebnisse

### 7.1. Messplatzdämpfung

Alle untersuchten Freifeldmessplätze erfüllen das  $\pm 4$  dB- Kriterium. Die Eignung der Messplätze wurde mittels dreier Verfahren (Breitbandantennen, Präzisions- Dipole, Referenzstrahlungsquelle) überprüft; der jeweils zu betreibende Messaufwand ist deutlich unterschiedlich.

Die aufwendigste Methode ist die Verwendung von Präzisions- Dipolen. Bei jedem Frequenzschritt werden die Längen der Sende- und Empfangsantenne angepasst. Die Ergebnisse unterliegen den kleinsten messtechnischen Fehlern und sind damit sehr gut reproduzierbar.

Es kann im unteren Frequenzbereich bis etwa 100 MHz aufgrund der gestreckten Länge der Dipole zu Verkopplungen der Antennen mit der Groundplane kommen; der Hersteller gibt dafür zusätzliche Höhenkorrekturbeträge an.

Aus fertigungsbedingten bzw. mechanischen Gründen können sich die realen Antennenfaktoren von berechnenden Werten unterscheiden. Wegen des messtechnischen Aufwandes wird in der Regel ab 300 MHz die Messplatzdämpfung nur in 100 MHz- Intervallen gemessen, wobei mögliche Abweichungen in den dazwischen liegenden Bereichen unberücksichtigt bleiben.

Am schnellsten erhält man Ergebnisse mit der Referenzstrahlungsquelle. Der Aufwand zur Bereitstellung von Sendeantennen, Frequenzgenerator und entsprechender Kabel entfällt. Die Genauigkeit der Kalibrierdaten ist dabei für die Sicherheit der Ergebnisse von entscheidender Bedeutung. Wechselwirkungen mit dem Prüfaufbau sind wegen der geringen Abmessungen minimal. Dieses Verfahren ist sehr gut geeignet zur kurzfristigen Überprüfung des Messaufbaus. Die hier verwendete Referenzstrahlungsquelle ist auf Grund der begrenzten Sendeleistung nur auf 3 m- Messentfernung anzuwenden.

Das Verfahren mit Breitbandantennen ist als Kompromiss zur Feststellung der Eignung eines Freifeldmessplatzes gut geeignet. Es kann für alle Messentfernungen angewandt werden. Der gesamte zu prüfende Frequenzbereich lässt sich mit realisierbarem Aufwand und ausreichender Genauigkeit vermessen. Durch Fehlanpassung der Antennen in Bodennähe entstehende Fehler werden bei der Ermittlung der Antennenfaktoren berücksichtigt.

Der Einfluss der Groundplane auf die Messplatzdämpfung konnte messtechnisch nachvollzogen werden.

Am Beispiel der 3 m- Strecke in Altlandsberg kann gezeigt werden, dass sich ohne metallisierten Untergrund keine für die Messungen relevanten Bodenreflexionen bilden. Das kommt besonders bei horizontaler Antennenpolarisation zum Tragen. Ab etwa 100 MHz sind jeweils rund 6 dB weniger zu messen (s. Abb. 70:). Bei vertikaler Polarisation wurden hier Überlagerungen erst ab etwa 400 MHz wirksam (s. Abb. 71:).

Bei 3 m Messentfernung kann unter Umständen für abschätzende Messungen auf einen metallisierten Untergrund verzichtet werden und die fehlenden Beträge mittels einer erstellten Korrekturkurve nachträglich addiert werden.

Auf der 10 m- Strecke lagen bei fehlender Bodenreflexion viele Pegel unterhalb der Messdynamik des hier verwendeten Messsystems.

Die sorgfältige Durchführung des Höhengans hat sich als sehr wichtig herausgestellt. Besonders im oberen Frequenzbereich ab etwa 400 MHz liegen die Extrema sehr eng bei einander, kleinste Höhenänderungen hatten nennenswerte Pegeldifferenzen zur Folge.

Vergleich: mit Groundplane - ohne Groundplane,  
3 m- Freifeld Altlandsberg, horizontal, Referenzstrahler

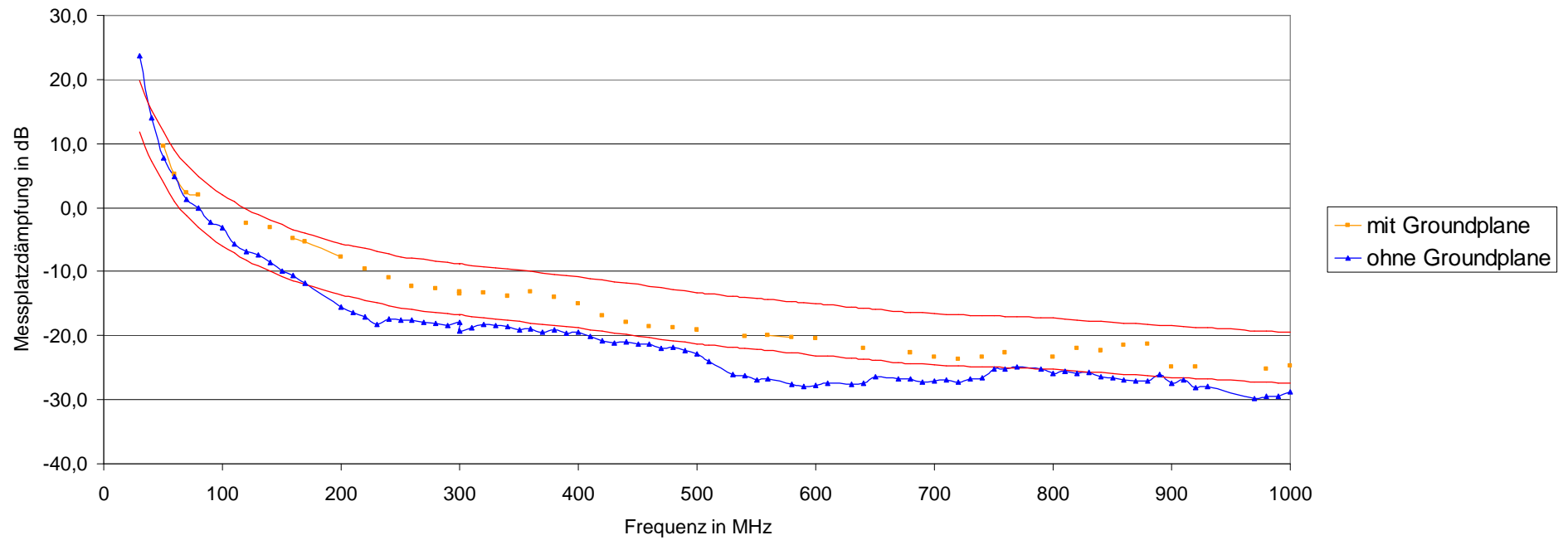


Abb. 70: Vergleich: Mit – Ohne Groundplane; 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, horizontal, Referenzstrahler

Vergleich: mit Groundplane - ohne Groundplane,  
3 m- Freifeld Altlandsberg, vertikal, Referenzstrahler

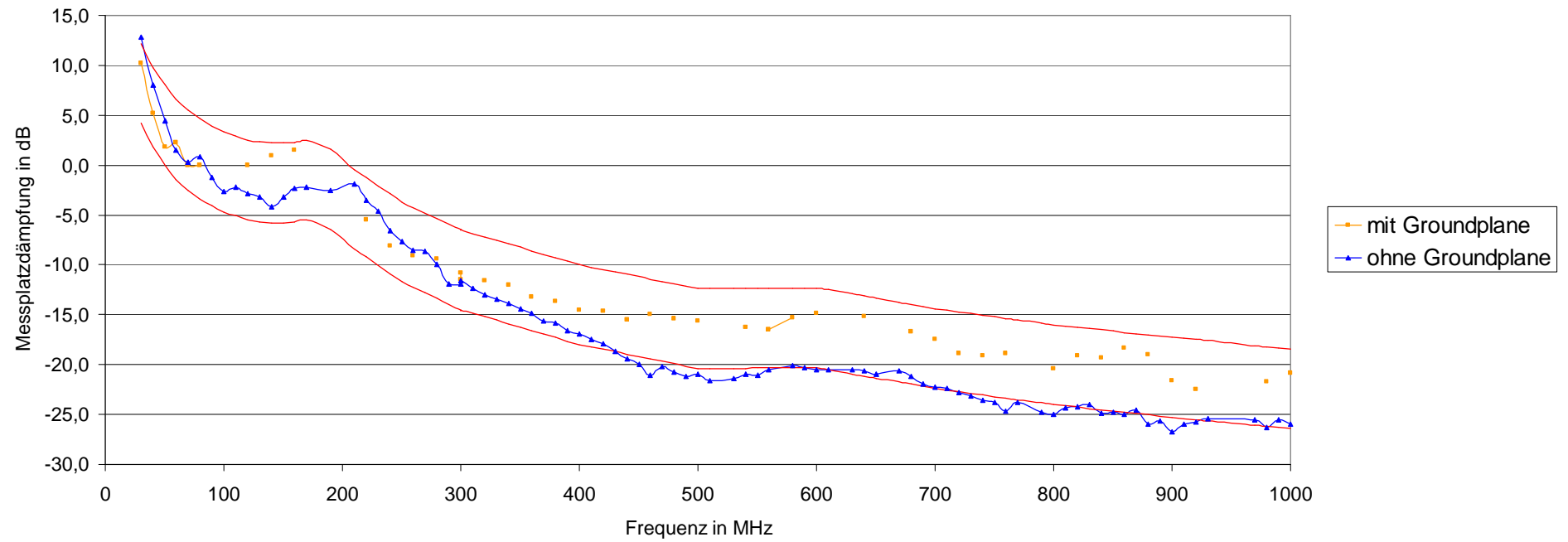


Abb. 71: Vergleich: Mit – Ohne Groundplane; 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, vertikal, Referenzstrahler

## 7.2. Realer Prüfling

Die Messergebnisse am realen Prüfling fallen sehr unterschiedlich aus. Die geringe Anzahl verfügbarer Ergebnisse lässt keine präzise Aussage über die Qualität der einzelnen Messplätze zu. (s. Kap. 6.2.)

Die Streuung der Messwerte auf einem Messplatzes lässt vermuten, dass es zu diversen, teilweise nicht nachvollziehbaren Beeinflussungen durch den Prüfling, den Messaufbau, die Umgebung und andere Faktoren kam. Konkret ließen sich nennenswerte Abweichungen bei 155 MHz nachweisen, die auf Resonanzen der herunterhängenden Leitungen mit der Groundplane zurückzuführen sein könnten. Dieses Verhalten trat bei den verschiedenen Messplätzen unterschiedlich deutlich auf. (s. Kap. 6.3.3.) Statistisch abgesicherte Untersuchungen dazu würden den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen.

Vorbereitende Messungen mit festen Antennenhöhen sind sinnvoll, um einen Überblick über das Störspektrum eines Prüflings zu erhalten. Eine sorgfältige Nachmessung einiger Pegel entsprechender Frequenz mit Höhenscans ist jedoch unverzichtbar. Es können besonders bei horizontaler Antennenpolarisation erhebliche Abweichungen auftreten (S. Kap. 6.3.).

### 7.3. Messplätze

#### 7.3.1. 10 m- Freifeldmessplatz

Der hier vermessene 10 m- Freifeldmessplatz erfüllt die Anforderungen als Referenzmessplatz; eine Nutzung für regelmäßige Konformitätsmessungen ist nur mit einigen Einschränkungen möglich.

Die Belegung des Frequenzbereichs zwischen 30 und 1000 MHz mit kommerziellen Signalen erschwert die Erfassung mancher vom Prüfling erzeugter Signale.

Die Verwendung von Antennen mit kleinem Antennenfaktor, Kabeln mit geringer Dämpfung und eines Empfängers mit niedrigem Grundrauschen sind Voraussetzung für eine ausreichend hohe Messdynamik.

Die normativ vorgegebene Nutzung der 10 m- Strecke ist nicht an allen Standorten sinnvoll.

#### 7.3.2. 3 m- Freifeldmessplatz

Das 3 m- Freifeld hat sich als brauchbarer Kompromiss zur 10 m- Strecke erwiesen. Die Belastung mit Umgebungssignalen ist vorhanden.

Nachteilig ist die gegenseitige Beeinflussung von Prüfling und Messaufbau bei großen Prüfobjekten.

Die Überlagerung des Direktsignals mit Bodenreflektionen ist nicht so ausgeprägt wie auf der 10 m- Strecke. Höhenänderungen der Empfangsantenne bis 4 m wurden nur selten benötigt.

In Kombination mit Vormessungen kann der 3 m- Freifeldmessplatz als Konformitätsmessplatz verwendet werden.

### 7.3.3. Absorberhalle

Messungen in einer Absorberhalle haben sehr zuverlässige Messergebnisse gebracht. Der gesamte Messbereich konnte ohne externe Störpegel durchgehend untersucht werden. Die aufwendige Messtechnik macht schnelle automatisierte Messungen möglich, deren Ergebnisse punktuell durch manuelle Messungen bestätigt werden konnten. 3 m-Absorberkammern sind optimale Einrichtungen für die Zertifizierungspraxis. Der finanzielle Aufwand wird jedoch erst durch häufigen Gebrauch rentabel.

### 7.3.4. GTEM- Zelle

Die Messung in der hier untersuchten GTEM- Zelle ergab von der Kalibrierung abweichende Ergebnisse. Die Pegel wurden im gesamten Messbereich durchschnittlich 4 dB zu hoch bewertet. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist zudem erschwert, weil die berechneten Feldstärkepegel unpolarisiert vorliegen und bei Antennenmessungen die Feldstärkepegel von der Antennenpolarisation abhängen.

Die GTEM- Zelle ist ein geeignetes Instrument zur Prüfung der Konformitätskriterien. Der Einsatz von GTEM- Zellen bietet hohen Messkomfort durch automatisierte Messabläufe bei überschaubarem wirtschaftlichem Aufwand.

Nachteilig ist die Einschränkung der Prüflingsgröße.



#### 7.4. Fehlerdiskussion

Normativ sind Messunsicherheiten im Teil 4-2 der CISPR 16 definiert. Es wird für Antennenmessungen eine Unsicherheit von 5,2 dB angegeben.

Im Vorhinein sind Unsicherheiten im Messaufbau durch verschiedene Maßnahmen minimiert worden, weshalb von kleineren Fehlern, als die in der Norm erwähnten ausgegangen werden kann:

- Der Signalgenerator wurde mit einer sehr kurzen verlustarmen Leitung mit dem Empfänger verbunden und die Abweichungen des Sende- und Empfangspegels als Korrekturkurve erfasst und während der Messungen korrigiert.
- Die Messunsicherheit der Empfänger wird mit  $\pm 1,0$  dB angenommen.
- Die Antennenfaktoren der Breitbandantennen lagen jeweils für 3 m und 10 m Messentfernung vor. Die Unsicherheit wird mit  $\pm 0,7$  dB angegeben.
- Die Unsicherheit der Antennenfaktoren der Präzisions- Dipole wird auf  $\pm 0,1$  dB geschätzt.
- Die Kabeldämpfung der verwendeten Kabel wurden über den gesamten Messbereich ermittelt; geschätzter Fehler  $\pm 0,05$  dB.
- Der Fehler bei der Abmessung der Messentfernung wird jeweils mit  $\pm 5$  cm angenommen. Das ergibt für die 10 m- Strecke einen Messfehler von 0,05% und für die 3 m- Strecke einen Fehler von 1,67%.
- Die Unsicherheit der Kalibrierung der Referenzstrahlungsquelle ist mit max.  $\pm 0,25$  dB angegeben

##### 7.4.1. Unsicherheit der Messplatzdämpfung mit Breitbandantennen

$$\begin{aligned}
 F_{NSA} &= F_{Us} + F_{Ue} + F_{Ks} + F_{Ks} + F_{AFe} + F_{AFs} \\
 &= (\pm 1,0 \text{ dB}) + (\pm 1,0 \text{ dB}) + (\pm 0,1 \text{ dB}) + (\pm 0,1 \text{ dB}) + (\pm 0,7 \text{ dB}) + (\pm 0,7 \text{ dB}) \\
 &= \pm 3,6 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

$F_{Ue/s}$ .....Unsicherheit des Messempfängers bzw. Generators

$F_{Ke/s}$ .....Unsicherheit Kabeldämpfung der Empfänger- bzw. Senderseite

$F_{AFe/s}$ .....Unsicherheit der Antennenfaktoren der Empfangs- bzw. Sendeantenne

#### 7.4.2. Unsicherheit der Messplatzdämpfung mit Präzisions- Dipolen

$$\begin{aligned}
 F_{NSA} &= F_{Us} + F_{Ue} + F_{Ke} + F_{Ks} + F_{AFe} + F_{AFs} \\
 &= (\pm 1,0 \text{ dB}) + (\pm 1,0 \text{ dB}) + (\pm 0,1 \text{ dB}) + (\pm 0,1 \text{ dB}) + (\pm 0,1 \text{ dB}) + (\pm 0,1 \text{ dB}) \\
 &= \pm 2,4 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

$F_{Ue/s}$ .....Unsicherheit des Messempfängers bzw. Generators

$F_{Ke/s}$ .....Unsicherheit Kabeldämpfung der Empfänger- bzw. Senderseite

$F_{AFe/s}$ .....Unsicherheit der Antennenfaktoren der Präzisions- Dipole

#### 7.4.3. Unsicherheit der Messplatzdämpfung mit Referenzstrahlungsquelle

$$\begin{aligned}
 F_{NSA} &= F_{Us} + F_{Ue} + F_{Ke} + F_{AFe} + F_{Ref} \\
 &= (\pm 1,0 \text{ dB}) + (\pm 1,0 \text{ dB}) + (\pm 0,1 \text{ dB}) + (\pm 0,25 \text{ dB}) \\
 &= \pm 2,35 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

$F_{Ue/s}$ .....Unsicherheit des Messempfängers

$F_{Ke/s}$ .....Unsicherheit Kabeldämpfung der Empfängerseite

$F_{AFe/s}$ .....Unsicherheit der Antennenfaktoren der Empfangsantenne

$F_{Ref}$ .....Unsicherheit der der Kalibrierung der Referenzstrahlungsquelle

#### 7.4.4. Unsicherheit der Messergebnisse des realen Prüflings

$$\begin{aligned}
 F_{NSA} &= F_{Us} + F_{Ue} + F_{Ke} + F_{AFe} + F_{Ref} \\
 &= (\pm 1,0 \text{ dB}) + (\pm 1,0 \text{ dB}) + (\pm 0,1 \text{ dB}) + (\pm 0,25 \text{ dB}) \\
 &= \pm 2,3 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

$F_{Ue/s}$ .....Unsicherheit des Messempfängers

$F_{Ke/s}$ .....Unsicherheit Kabeldämpfung der Empfängerseite

$F_{AFe/s}$ .....Unsicherheit der Antennenfaktoren der Empfangsantenne

## 8. Fazit

Ein Vergleich der verschiedenen normativen Methoden zur Funkstörstrahlungsmessung hat sich als schwierig herausgestellt. Jede Methode hat spezifische Eigenschaften, die die Ergebnisse auf ihre Weise beeinflussen. Da die Fehlerquellen der einzelnen Verfahren bekannt sind lassen sie sich in Grenzen korrigieren. Der Vergleich mit Ergebnissen anderer Verfahren beinhaltet jedoch so viele Unsicherheiten, dass sich eine direkte Korrelation der alternativen Methoden mit dem 10 m-Freifeldmessplatz als nicht praktikabel erwies.

Um reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten, sollten nur gleichartige Messplätze verwendet und miteinander verglichen werden. In den Normungsgremien wird die Einführung jeweils eigener Grenzwertkurven und Messabläufe diskutiert. Zudem sollten die Spezifikationen des Messaufbaus auf Praxistauglichkeit überprüft und vereinheitlicht werden.

Abschließend ist zu sagen, dass Feldstärkemessungen auf Freifeldmessplätzen nur durch erfahrenes Bedienpersonal vorgenommen werden sollten.

## 9. Anhang

### 9.1. Quellenverzeichnis

- [1] EMV- Richtlinie (89/336/EWG) bzw. (2004/108/EG)
- [2] EN 55016; 2004
- [3] EN 55022; 2006
- [4] A. J. Schwab, „Elektromagnetische Verträglichkeit“, 4. Auflage, Springer- Verlag 1996
- [5] Meinke, Gundlach, „Taschenbuch der Hochfrequenztechnik 1 + 2“, 4. Auflage, Springer-Verlag 1986
- [6] R. Mäusl, „Hochfrequenzmesstechnik, Meßverfahren und Meßgeräte“, Hüthig- Verlag, 1973
- [7] E. Stirner, „Antennen“ Band 1-3, 2. Auflage, Hüthig- Verlag
- [8] Rhode&Schwarz, Seminarskript: „EMV- Messtechnologie der 90er Jahre“
- [9] Dipl.-Ing. G. Schwarzbeck, „Felddämpfung einer 10 m- Dipol- Mess-Strecke“
- [10] Dipl.-Ing. G. Schwarzbeck, diverse Antennendokumentationen, [www.schwarzbeck.de](http://www.schwarzbeck.de)
- [11] Uwe Fischer, Diplomarbeit: „Entwicklung und Aufbau eines Messplatzes zur Aufnahme von Emissionsspektren (bis 40 GHz) in einer EMV-Absorberkammer“
- [12] Peter Mosshammer, Diplomarbeit: „Untersuchung der Einflüsse des Messzubehörs und der Umgebung auf die Messunsicherheit bei der Messung der Störfeldstärke auf Freifeldmessplätzen“, FHTW- Berlin, 2000
- [13] <http://www.apptech.philips.com>
- [14] [www.google.maps.de](http://www.google.maps.de)

## 9.2. Tabellen der Messergebnisse

## 9.2.1. Freifeldmessplatz Altlandsberg

## 9.2.1.1. Messplatzdämpfung mit Breitbandantennen

Frequenz	NSA_10 m	NSA_10 m	NSA_3 m	NSA_3 m
	Groundplane	Groundplane	Groundplane	Groundplane
	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
[MHz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
30	30,0	17,3	18,7	9,7
40	27,2	15,4	14,5	7,6
50	22,3	13,3	10,4	5,7
60	20,5	11,4	5,4	2,8
70	17,2	11,1	4,3	2,7
80	15,7	9,8	3,6	2,2
90	13,4	8,3	2,1	1,1
100	11,8	7,1	0,7	-0,5
110	9,6	5,7	-1,0	-2,2
120	8,5	5,2	-1,8	-1,7
130	6,2	4,4	-3,5	-2,9
140	5,2	3,1	-4,5	-2,3
150	3,3	3,0	-5,0	-1,0
160	2,4	3,2	-6,4	-0,5
170	1,6	3,1	-6,8	-0,7
180	1,6	3,2	-7,0	-1,1
190	1,4	2,4	-8,0	-2,0
200	-0,5	0,6	-7,8	-3,1
210	-0,1	0,5	-7,6	-3,3
220	-0,8	-0,2	-8,7	-4,8
230	-1,8	-1,4	-8,4	-4,7
240	-0,9	-1,5	-8,4	-5,0
250	-1,5	-2,4	-8,7	-5,0
260	-2,4	-2,6	-10,0	-5,9
270	-1,9	-3,2	-9,3	-6,0
280	-2,4	-3,3	-9,7	-7,2
290	-3,1	-3,6	-10,8	-7,4
300	-3,0	-3,6	-11,0	-8,5
300	-2,1	-3,7	-11,6	-8,9
310	-2,9	-2,7	-11,2	-8,9
320	-3,3	-2,7	-12,8	-9,3
330	-3,8	-2,9	-13,3	-9,9
340	-4,3	-3,5	-13,8	-10,8
350	-4,5	-3,6	-13,8	-11,4
360	-4,3	-2,7	-12,2	-11,8
370	-5,6	-2,9	-13,6	-11,9
380	-4,7	-2,8	-13,5	-12,1
390	-5,0	-2,9	-12,1	-12,4
400	-5,2	-2,8	-12,8	-13,0
410	-5,2	-2,7	-13,2	-13,3
420	-5,1	-2,7	-13,0	-13,3
430	-5,7	-3,2	-12,9	-13,4
440	-6,2	-3,9	-14,3	-13,6
450	-6,6	-4,7	-14,7	-14,0

460	-6,9	-4,9	-15,3	-14,4
470	-7,4	-4,8	-15,6	-14,5
480	-6,9	-4,4	-15,2	-14,6
490	-7,8	-5,4	-16,1	-15,1
500	-8,2	-5,7	-16,6	-15,5
510	-7,9	-5,5	-16,4	-15,3
520	-8,2	-5,8	-16,8	-15,8
530	-8,3	-6,2	-16,9	-15,9
540	-8,1	-6,2	-17,2	-16,2
550	-8,1	-6,4	-17,2	-16,3
560	-8,2	-6,8	-17,4	-16,6
570	-8,2	-6,7	-17,5	-17,0
580	-8,9	-7,5	-17,9	-16,8
590	-9,1	-8,0	-18,1	-17,0
600	-9,3	-8,1	-18,4	-17,5
610	-9,6	-8,4	-19,1	-17,8
620	-9,8	-8,5	-19,5	-18,1
630	-9,8	-8,8	-19,5	-17,9
640	-10,0	-8,9	-19,8	-18,0
650	-9,9	-8,9	-19,8	-17,6
660	-9,4	-8,5	-19,3	-17,3
670	-9,6	-8,7	-19,4	-17,3
680	-10,3	-9,4	-19,9	-18,2
690	-10,8	-9,8	-20,4	-18,6
700	-10,8	-9,9	-20,4	-18,7
710	-10,9	-9,8	-20,6	-18,8
720	-11,0	-9,9	-20,6	-19,1
730	-11,1	-10,0	-20,7	-19,3
740	-11,6	-10,1	-20,8	-19,6
750	-11,7	-10,4	-20,9	-19,2
760	-12,1	-10,6	-21,0	-20,1
770	-11,5	-10,0	-20,7	-20,1
780	-11,5	-10,3	-20,7	-19,6
790	-12,5	-11,0	-21,6	-20,0
800	-13,1	-11,2	-22,0	-20,5
810	-13,1	-11,5	-22,4	-20,8
820	-13,3	-11,6	-22,3	-20,8
830	-13,2	-11,6	-22,4	-20,7
840	-13,1	-11,6	-22,5	-20,9
850	-13,1	-11,7	-22,6	-21,0
860	-13,1	-11,7	-22,4	-21,0
870	-13,2	-11,5	-22,1	-21,0
880	-13,3	-11,6	-22,6	-21,0
890	-12,3	-11,0	-22,0	-20,7
900	-12,5	-10,7	-21,9	-20,9
910	-13,4	-11,6	-23,1	-21,4
920	-13,7	-11,7	-23,5	-21,7
930	-13,9	-11,9	-23,7	-21,7
940	-14,3	-12,6	-24,0	-21,9
950	-14,7	-12,9	-24,2	-22,0
960	-15,1	-13,2	-24,3	-21,9
970	-15,5	-13,5	-24,2	-22,0
980	-15,3	-13,6	-24,8	-22,2
990	-14,6	-13,3	-24,7	-22,2
1000	-14,0	-13,1	-24,4	-22,1

Abb. 72: Tabelle: Messplatzdämpfung Altlandsberg mit Breibandantennen

## 9.2.1.2. Messplatzdämpfung mit Präzisions- Dipolen

<b>Frequenz</b>	<b>NSA_10 m</b>	<b>NSA_10 m</b>	<b>NSA_3 m</b>	<b>NSA_3 m</b>
	<b>Groundplane</b>	<b>Groundplane</b>	<b>Groundplane</b>	<b>Groundplane</b>
	<b>horizontal</b>	<b>vertikal</b>	<b>horizontal</b>	<b>vertikal</b>
<b>[MHz]</b>	<b>[dB]</b>	<b>[dB]</b>	<b>[dB]</b>	<b>[dB]</b>
<b>30</b>	26,3			
<b>40</b>	21,7			
<b>50</b>	18,2			
<b>60</b>	15,9			
<b>70</b>	13,8			
<b>80</b>	11,8			
<b>90</b>	10,0			
<b>100</b>	8,7	7,2	-1,6	0,9
<b>125</b>	5,1	4,4	-3,1	-0,1
<b>150</b>	2,1	2,8	-5,1	-2,3
<b>170</b>	0,5	1,8	-7,1	-3,2
<b>195</b>	-1,2	1,0	-8,2	-5,3
<b>215</b>	-2,2	0,9	-9,7	-6,2
<b>240</b>	-3,2	-0,2	-10,9	-6,8
<b>270</b>	-4,2	-1,9	-12,5	-8,6
<b>300</b>	-4,9	-1,9	-13,7	-9,4
<b>300</b>	-4,9	-1,9	-13,0	-10,5
<b>350</b>	-7,0	-4,0	-15,4	-12,9
<b>400</b>	-8,0	-3,9	-15,8	-13,7
<b>500</b>	-10,4	-6,1	-19,5	-17,5
<b>600</b>	-10,6	-8,2	-20,3	-17,4
<b>700</b>	-11,9	-9,0	-20,8	-18,9
<b>800</b>	-11,9	-9,0	-23,2	-21,2
<b>900</b>	-13,7	-10,1	-24,4	-22,4
<b>1000</b>	-13,3	-11,1	-22,8	-20,8

Abb. 73: Tabelle: Messplatzdämpfung Altlandsberg mit Präz.- Dipolen

## 9.2.1.3. Messplatzdämpfung mit Referenzstrahlungsquelle;

Vergleich: mit Groundplane – ohne Groundplane

Frequenz	NSA_3 m	NSA_3 m	NSA_3 m	NSA_3 m
	Groundplane horizontal	Groundplane vertikal	Asphalt horizontal	Asphalt vertikal
[MHz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
30		10,2	23,8	12,9
40		5,2	14,0	8,0
50	9,6	1,8	7,7	4,5
60	5,2	2,3	4,8	1,5
70	2,3	-0,1	1,3	0,3
80	2,0	0,0	-0,1	0,9
90			-2,4	-1,3
100			-3,1	-2,7
110			-5,7	-2,2
120	-2,4	-0,1	-6,8	-2,9
130			-7,4	-3,2
140	-3,1	1,0	-8,6	-4,2
150			-10,0	-3,2
160	-4,8	1,5	-10,5	-2,3
170	-5,3		-11,8	-2,3
180				
190				-2,5
200	-7,7		-15,5	
210			-16,4	-1,9
220	-9,6	-5,5	-17,0	-3,5
230			-18,2	-4,6
240	-11,0	-8,1	-17,4	-6,6
250			-17,5	-7,6
260	-12,4	-9,0	-17,5	-8,5
270			-17,9	-8,7
280	-12,6	-9,4	-18,0	-9,9
290			-18,4	-11,9
300	-13,5	-11,5	-18,0	-11,9
300	-13,1	-10,8	-19,2	-11,6
310			-18,8	-12,3
320	-13,4	-11,6	-18,3	-13,0
330			-18,4	-13,4
340	-13,9	-12,0	-18,6	-13,8
350			-19,1	-14,4
360	-13,1	-13,2	-18,9	-14,9
370			-19,4	-15,6
380	-13,9	-13,6	-19,1	-15,8
390			-19,6	-16,6
400	-15,1	-14,6	-19,5	-17,0
410			-20,2	-17,5
420	-16,9	-14,7	-20,7	-17,9
430			-21,2	-18,7
440	-17,9	-15,5	-21,0	-19,4
450			-21,3	-19,9



460	-18,5	-15,0	-21,2	-21,1
470			-21,9	-20,2
480	-18,7	-15,4	-21,8	-20,7
490			-22,4	-21,2
500	-19,0	-15,6	-22,9	-21,0
510			-24,1	-21,6
520	-19,6	-16,3		
530			-26,0	-21,4
540	-20,2	-16,2	-26,2	-21,0
550			-26,9	-21,1
560	-19,9	-16,5	-26,8	-20,5
570				
580	-20,3	-15,2	-27,5	-20,1
590			-27,9	-20,3
600	-20,4	-14,8	-27,8	-20,5
610			-27,4	-20,5
620	-21,1	-14,4		
630			-27,6	-20,5
640	-21,9	-15,2	-27,5	-20,6
650			-26,4	-20,9
660	-21,1	-15,2		
670			-26,7	-20,7
680	-22,7	-16,7	-26,8	-21,2
690			-27,3	-21,9
700	-23,4	-17,5	-27,2	-22,3
710			-27,0	-22,4
720	-23,8	-18,8	-27,2	-22,8
730			-26,7	-23,1
740	-23,3	-19,1	-26,5	-23,6
750			-25,1	-23,8
760	-22,7	-18,9	-25,2	-24,6
770			-24,8	-23,8
780	-22,9	-18,7		
790			-25,3	-24,8
800	-23,3	-20,4	-25,8	-25,0
810			-25,5	-24,4
820	-22,0	-19,1	-25,9	-24,2
830			-25,7	-24,0
840	-22,3	-19,3	-26,4	-24,8
850			-26,6	-24,7
860	-21,5	-18,3	-26,9	-25,0
870			-27,1	-24,6
880	-21,2	-19,0	-27,2	-25,9
890			-26,1	-25,6
900	-24,9	-21,6	-27,5	-26,7
910			-26,9	-26,0
920	-24,8	-22,5	-28,1	-25,8
930			-27,9	-25,4
940	-25,1	-23,0		
950				
960	-25,5	-22,4		
970			-29,8	-25,5
980	-25,3	-21,7	-29,5	-26,3
990			-29,5	-25,6
1000	-24,7	-20,8	-28,8	-26,0

Abb. 74: Tabelle: Messplatzdämpfung Altlandsberg mit Referenzstrahler

## 9.2.2. Freifeldmessplatz Reichl- EMV

## 9.2.2.1. Messplatzdämpfung mit Breitbandantennen

<b>Frequenz</b>	<b>NSA_3 m</b>	<b>NSA_3 m</b>	<b>NSA_3 m</b>	<b>NSA_3 m</b>
	<b>Breitband</b>	<b>Breitband</b>	<b>KSQ</b>	<b>KSQ</b>
	<b>horizontal</b>	<b>vertikal</b>	<b>horizontal</b>	<b>vertikal</b>
<b>[MHz]</b>	<b>[dB]</b>	<b>[dB]</b>	<b>[dB]</b>	<b>[dB]</b>
30	18,7	6,6	14,7	10,9
40	10,3	2,4	15,2	10,2
50	6,7	2,8	13,2	9,8
60	5,0	1,0	9,0	9,2
70	1,6	-0,4	5,4	7,5
80	-0,2	0,4	4,3	4,4
90	-1,0	0,7		
100	-3,9	-1,6	5,0	6,4
110	-2,9	-3,7	-0,5	3,8
120	-6,0	-3,7	-3,5	0,6
130	-5,0	-4,2	-6,3	1,3
140	-6,8	-2,9	-2,7	-1,1
150	-8,9	-1,4	-2,0	-1,3
160	-6,6	-2,2	-7,3	4,0
170	-8,5	-4,5	-6,3	3,5
180	-8,0	-4,1		
190	-10,1	-1,7		
200	-9,1	-1,6		
210	-8,7	-1,8	-11,6	-3,2
220	-12,7	-3,8	-7,5	-2,3
230	-10,1	-3,8		
240	-12,6	-8,4	-11,3	-1,1
250	-12,3	-8,1	-10,0	-3,6
260	-14,1	-8,3	-8,7	-8,4
270	-11,9	-8,6	-10,9	-8,2
280	-14,8	-10,3	-9,0	-10,1
290	-14,7	-9,6	-12,5	-9,0
300	-14,4	-12,8	-13,4	-11,6
300	-9,5	-10,0	-14,7	-11,0
310	-10,1	-10,5	-12,2	-11,8
320	-10,9	-11,5	-12,9	-8,7
330	-10,2	-9,1	-11,9	-13,0
340	-11,6	-9,8	-13,0	-12,6
350	-11,9	-9,9	-9,5	-15,1
360	-10,8	-9,5	-11,6	-11,8
370	-12,5	-10,9	-11,9	-16,0
380	-12,6	-11,0	-12,7	-13,9
390	-13,3	-11,2	-13,0	-14,9
400	-13,7	-13,2	-14,9	-14,7
410	-13,7	-13,4	-18,5	-12,9
420	-13,9	-14,0	-14,5	-12,4
430	-12,7	-12,6	-14,6	-13,1
440	-14,7	-12,7	-15,1	-13,2
450	-13,4	-11,7	-16,8	-14,9

460	-15,2	-13,0	-16,3	-14,0
470	-16,1	-12,5	-15,1	-17,8
480	-14,9	-12,7	-14,3	-17,2
490	-15,6	-13,1	-15,5	-19,0
500	-15,9	-14,2	-15,3	-16,5
510	-17,1	-14,3	-15,7	-18,9
520	-16,1	-13,4		
530	-15,4	-14,1	-17,7	-14,4
540	-15,2	-15,2	-18,8	-14,9
550	-16,2	-14,8	-19,9	-12,5
560	-17,0	-15,3	-21,1	-13,0
570	-16,6	-17,2		
580	-17,2	-16,1	-20,3	-12,9
590	-17,3	-16,6	-19,3	-16,3
600	-18,8	-16,1	-20,6	-16,4
610	-18,9	-16,6	-20,4	-14,8
620	-19,3	-16,6		
630	-19,1	-15,0	-20,2	-13,9
640	-19,3	-15,2	-20,2	-14,1
650	-19,2	-18,9	-22,2	-15,8
660	-18,3	-16,2		
670	-19,3	-18,9	-20,4	-16,9
680	-18,7	-20,4	-19,9	-14,0
690	-20,6	-21,3	-20,3	-14,7
700	-20,3	-20,2	-19,8	-13,9
710	-19,8	-19,5	-22,0	-13,0
720	-18,7	-19,0	-20,3	-15,2
730	-19,8	-20,1	-20,9	-14,9
740	-19,4	-20,6	-19,3	-17,2
750	-19,6	-18,1	-22,0	-16,8
760	-19,1	-18,7	-20,6	-19,4
770	-19,2	-17,5	-20,3	-18,7
780	-20,8	-19,2		
790	-21,8	-18,9	-20,6	-21,3
800	-21,4	-18,1	-21,1	-20,9
810	-21,9	-18,8	-21,2	-17,4
820	-21,9	-19,9	-21,0	-18,9
830	-21,7	-20,7	-23,5	-21,4
840	-20,9	-22,5	-21,1	-17,3
850	-21,7	-23,6	-19,5	-17,6
860	-21,0	-23,4	-23,6	-14,7
870	-22,1	-23,1	-23,6	-15,2
880	-21,0	-22,0	-26,0	-18,6
890	-21,2	-19,2	-25,5	-18,6
900	-21,3	-19,1	-26,6	-22,6
910	-22,2	-21,1	-26,1	-23,4
920	-21,3	-19,2	-24,7	-24,4
930	-22,4	-19,9	-24,6	
940	-22,8	-18,8		
950	-23,1	-18,7		
960	-22,7	-21,3	-23,5	-23,4
970	-23,0	-22,1	-24,5	-21,9
980	-23,4	-22,0	-23,8	-20,5
990	-22,7	-22,4	-25,8	-17,7
1000	-22,2	-23,0	-22,7	-19,7

Abb. 75: Tabelle: Messplatzdämpfung Reichl- EMV mit Breibandantennen

## 9.2.2.2. Messplatzdämpfung mit Präzisions- Dipolen

Frequenz	NSA_3 m	
	Präzisions- Dipole	Präzisions- Dipole
	horizontal	vertikal
[MHz]	[dB]	[dB]
100	-2,8	-1,7
125	-2,9	-1,7
150	-6,5	-1,4
170	-6,2	-5,6
195	-11,1	-5,3
215	-10,1	-7,4
240	-11,7	-7,7
270	-11,7	-8,4
300	-13,8	-11,5
300	-13,0	-11,6
350	-15,0	-13,2
400	-14,5	-13,2
450	-16,5	-14,3
500	-18,2	-13,8
550	-19,3	-16,2
600	-18,8	-17,9
650	-19,6	-18,4
700	-20,1	-18,1
750	-21,9	-18,2
800	-22,7	-17,8
850	-22,6	-20,5
900	-23,6	-21,6
960	-21,3	-20,4
1000	-20,3	-16,8

Abb. 76: Tabelle: Messplatzdämpfung Reichl- EMV mit Präzisions- Dipolen

## 9.2.2.3. Messplatzdämpfung mit Referenzstrahlungsquelle

<b>Frequenz</b>	<b>NSA</b>	<b>NSA</b>
<b>f</b>	<b>vertikal</b>	<b>horizontal</b>
<b>[MHz]</b>	<b>[dB]</b>	<b>[dB]</b>
30	10,9	14,7
40	8,2	14,2
50	7,8	12,2
60	7,2	8,0
70	5,5	5,4
80	3,4	4,3
100	3,4	2,0
110	2,8	-0,5
120	0,6	-3,5
130	1,3	-6,3
140	-1,1	-2,7
150	-1,3	-4,0
160	0,0	-7,3
170	-0,5	-6,3
210	-3,2	-11,6
220	-2,3	-7,5
240	-3,1	-11,3
250	-5,6	-10,0
260	-8,4	-8,7
270	-8,2	-10,9
280	-10,1	-9,0
290	-9,0	-12,5
300	-11,6	-13,4
300	-11,0	-14,7
310	-11,8	-12,2
320	-8,7	-12,9
330	-13,0	-11,9
340	-12,6	-13,0
350	-15,1	-10,5
360	-11,8	-11,6
370	-16,0	-11,9
380	-13,9	-12,7
390	-14,9	-13,0
400	-14,7	-14,9
410	-12,9	-18,5
420	-12,4	-14,5
430	-13,1	-14,6
440	-13,2	-15,1
450	-14,9	-16,8
460	-14,0	-16,3
470	-17,8	-15,1
480	-17,2	-14,3
490	-19,0	-15,5
500	-16,5	-15,3
510	-18,9	-15,7
530	-14,4	-17,7
540	-14,9	-18,8
550	-12,5	-19,9
560	-13,0	-21,1
580	-12,9	-20,3
590	-16,3	-19,3
600	-16,4	-20,6
610	-14,8	-20,4
630	-13,9	-20,2
640	-14,1	-20,2
650	-15,8	-22,2
670	-16,9	-20,4
680	-14,0	-19,9
690	-14,7	-20,3
700	-14,9	-19,8
710	-15,0	-22,0
720	-15,2	-20,3
730	-14,9	-20,9
740	-17,2	-19,3
750	-16,8	-22,0
760	-19,4	-20,6
770	-18,7	-20,3
790	-21,3	-20,6
800	-20,9	-21,1
810	-17,4	-21,2
820	-18,9	-21,0
830	-21,4	-23,5
840	-17,3	-21,1
850	-17,6	-19,5
860	-17,7	-23,6
870	-17,2	-23,6
880	-18,6	-26,0
890	-18,6	-25,5
900	-22,6	-26,6
910	-23,4	-26,1
920	-24,4	-24,7
960	-23,4	-23,5
970	-21,9	-24,5
980	-20,5	-23,8
990	-19,7	-25,8
1000	-19,7	-27,5

Abb. 77: Tabelle: Messplatzdämpfung Reichl- EMV mit Referenzstrahlungsquelle

## 9.2.3. Absorberkammer Messlabor D

## 9.2.3.1. Messplatzdämpfung mit Breitbandantennen

Frequenz	NSA_3 m	NSA_3 m	Frequenz	NSA_3 m	NSA_3 m
	horizontal	vertikal		horizontal	vertikal
[MHz]	[dB]	[dB]	[MHz]	[dB]	[dB]
30	13,1	5,5	520	-17,5	-17,4
40	12,0	4,4	530	-18,1	-17,2
50	8,5	2,5	540	-18,6	-17,1
60	6,6	1,7	550	-18,5	-17,0
70	3,4	0,4	560	-18,0	-16,3
80	0,3	-0,3	570	-18,1	-16,5
90	-1,2	-1,2	580	-18,6	-15,9
100	-3,0	-1,2	590	-19,3	-16,4
110	-3,8	-1,8	600	-19,5	-16,0
120	-4,9	-2,1	610	-19,3	-16,4
130	-6,2	-2,2	620	-19,0	-16,5
140	-6,4	-1,4	630	-19,4	-16,6
150	-6,6	-0,2	640	-20,0	-17,7
160	-7,0	1,0	650	-19,7	-18,1
170	-8,3	0,2	660	-19,9	-19,1
180	-9,2	-1,5	670	-20,3	-18,9
190	-9,7	-1,6	680	-20,6	-18,3
200	-9,3	-3,1	690	-20,4	-17,5
210	-9,5	-4,3	700	-20,8	-17,0
220	-10,1	-5,9	710	-20,8	-17,9
230	-11,1	-6,7	720	-21,4	-18,3
240	-11,9	-7,8	730	-21,9	-19,4
250	-12,0	-8,3	740	-21,1	-19,9
260	-11,7	-9,1	750	-21,3	-20,4
270	-11,9	-9,4	760	-21,2	-20,2
280	-12,0	-10,0	770	-21,2	-19,8
290	-12,7	-10,0	780	-21,3	-19,9
300	-13,0	-10,5	790	-21,1	-19,6
310	-13,1	-10,7	800	-21,4	-20,0
320	-13,4	-10,9	810	-21,6	-19,9
330	-13,5	-11,6	820	-21,6	-20,2
340	-13,9	-11,7	830	-21,7	-20,8
350	-14,0	-12,1	840	-21,8	-20,9
360	-14,4	-12,7	850	-21,8	-20,5
370	-14,5	-13,4	860	-21,9	-20,2
380	-14,7	-13,8	870	-22,1	-20,8
390	-14,6	-14,1	880	-22,3	-21,8
400	-15,0	-14,3	890	-22,5	-21,9
410	-15,8	-14,6	900	-22,3	-22,3
420	-15,5	-14,6	910	-22,6	-22,1
430	-15,5	-14,8	920	-23,1	-22,0
440	-15,3	-14,8	930	-22,9	-21,5
450	-16,3	-15,0	940	-22,9	-21,0
460	-16,7	-15,4	950	-23,1	-20,9
470	-16,9	-15,4	960	-23,2	-21,6
480	-16,7	-15,7	970	-23,3	-22,4
490	-17,1	-16,0	980	-23,1	-22,9
500	-17,0	-16,7	990	-23,3	-22,8
510	-17,1	-16,8	1000	-23,1	-23,2

Abb. 78: Tabelle: Messplatzdämpfung Messlabor D mit Breitbandantennen

## 9.2.3.2. Messplatzdämpfung mit Referenzstrahlungsquelle

Frequenz	NSA_3 m horizontal	NSA_3 m vertikal	Frequenz	NSA_3 m horizontal	NSA_3 m vertikal
[MHz]	[dB]	[dB]	[MHz]	[dB]	[dB]
30	17,6	12,3	510	-20,3	-16,2
40	13,6	6,9	520	-19,9	-16,3
50	7,9	6,9	530	-20,0	-16,2
60	3,6	5,0	540	-19,7	-15,4
70	3,2	4,9	550	-20,8	-16,2
80	4,2	4,5	560	-20,9	-15,9
90	1,9	1,4	570	-20,4	-15,4
100	0,4	-2,3	580	-20,1	-14,1
110	0,2	-1,4	590	-19,7	-12,8
120	-1,4	-2,4	600	-20,4	-13,0
130	-3,6	-1,5	610	-21,3	-13,1
140	-4,4	-0,4	620	-21,9	-13,4
150	-4,1	1,4	630	-21,3	-13,7
160	-5,9	1,3	640	-21,3	-13,5
170	-6,1	1,5	650	-20,9	-13,5
180	-6,0	1,3	660	-21,8	-13,8
190	-7,3	-0,5	670	-23,0	-15,5
200	-9,1	-2,0	680	-23,6	-17,4
210	-9,6	-2,0	690	-23,3	-19,1
220	-9,7	-2,8	700	-22,7	-19,4
230	-10,0	-3,1	710	-21,8	-19,0
240	-10,3	-4,6	720	-22,1	-17,6
250	-10,6	-8,6	730	-21,7	-16,6
250	-10,2	-7,3	740	-22,0	-16,5
260	-11,4	-8,2	750	-20,4	-16,8
270	-12,1	-8,7	760	-20,2	-18,8
280	-12,3	-8,8	770	-19,9	-19,9
290	-11,6	-10,7	780	-21,6	-21,0
300	-11,6	-12,0	790	-22,5	-20,6
310	-12,3	-12,4	800	-23,0	-20,6
320	-12,8	-12,5	810	-23,3	-19,6
330	-13,4	-11,9	820	-22,5	-19,3
340	-13,4	-12,9	830	-22,5	-18,9
350	-12,6	-12,8	840	-22,5	-19,2
360	-12,5	-12,9	850	-21,9	-18,6
370	-13,4	-12,8	860	-21,1	-18,6
380	-14,6	-13,2	870	-21,0	-18,0
390	-15,5	-14,2	880	-20,9	-20,4
400	-15,0	-13,7	890	-22,2	-22,2
410	-15,0	-14,3	900	-25,1	-23,1
420	-15,4	-14,4	910	-25,9	-20,2
430	-16,2	-15,4	920	-26,7	-21,9
440	-16,8	-16,4	930	-24,7	-20,5
450	-18,6	-16,5	940	-26,3	-23,8
460	-18,3	-15,3	950	-25,4	-21,2
470	-18,5	-15,4	960	-27,0	-22,2
480	-18,3	-15,8	970	-25,4	-20,0
490	-18,9	-16,1	980	-26,5	-22,0
500	-19,4	-15,6	990	-24,1	-21,0
			1000	-25,0	-23,5

Abb. 79: Tabelle: Messplatzdämpfung Messlabor D mit Referenzstrahler

## 9.2.3.3. Vergleich: feste Höhen - Höhengscan

horizontal:

Frequenz	Feldstärkepegel Ant.-höhe: 1m	Feldstärkepegel Ant.-höhe: 1,6 m	Feldstärkepegel Ant.-höhe: 1 m + 1,6 m	Feldstärkepegel Höhenscan
[MHz]	[dB $\mu$ V/m]	[dB $\mu$ V/m]	[dB $\mu$ V/m]	[dB $\mu$ V/m]
250	66,28	64,57	66,28	66,65
260	65,52	65,02	65,52	66,15
270	65,63	65,69	65,63	66,04
280	66,35	65,87	66,35	65,95
290	67,85	65,10	67,85	67,51
300	67,92	64,24	67,92	67,63
310	67,86	63,83	67,86	67,64
320	66,99	61,75	66,99	67,04
330	67,20	58,78	67,20	67,24
340	67,31	58,44	67,31	67,22
350	68,22	60,67	68,22	68,30
360	68,48	59,96	68,48	68,41
370	68,46	58,25	68,46	68,40
380	67,47	54,07	67,47	67,58
390	67,75	49,50	67,75	67,71
400	68,89	55,40	68,89	68,63
410	69,58	58,79	69,59	69,47
420	69,47	59,53	69,47	69,56
430	68,64	56,99	68,64	69,27
440	67,33	55,62	67,33	68,93
450	65,05	62,00	65,05	67,53
460	65,22	66,25	66,25	68,26
470	64,81	67,29	67,29	68,29
480	63,46	66,86	66,86	68,61
490	62,30	64,86	64,86	67,79
500	60,95	65,21	65,21	67,99
510	57,64	66,34	66,34	67,29
520	57,64	68,35	68,35	68,25
530	58,72	68,70	68,70	68,32
540	59,20	68,92	68,92	68,74
550	56,37	67,83	67,83	67,22
560	52,01	68,01	68,01	67,44
570	39,07	68,44	68,44	67,82
580	49,66	69,26	69,26	68,63
590	51,74	69,20	69,20	68,83
600	51,03	68,38	68,38	68,31
610	54,23	67,28	67,28	67,25
620	57,44	67,08	67,08	67,14
630	58,32	65,60	65,60	67,19
640	61,50	64,53	64,53	67,55
650	62,77	63,40	63,40	67,11
660	62,64	63,90	63,90	66,81
670	60,30	63,18	63,18	65,65
680	60,21	61,05	61,05	65,48
690	62,73	57,81	62,73	65,72



<b>700</b>	66,19	54,88	66,19	66,62
<b>710</b>	66,85	52,51	66,85	67,03
<b>720</b>	66,37	50,62	66,37	67,15
<b>730</b>	65,11	46,56	65,11	66,54
<b>740</b>	65,48	51,92	65,48	66,42
<b>750</b>	65,95	54,31	65,95	66,37
<b>760</b>	66,93	54,98	66,93	66,93
<b>770</b>	66,49	53,30	66,49	66,26
<b>780</b>	65,66	51,48	65,66	65,13
<b>790</b>	64,39	56,65	64,39	63,75
<b>800</b>	63,06	59,41	63,06	63,30
<b>810</b>	62,25	59,73	62,25	61,84
<b>820</b>	62,45	58,10	62,45	62,26
<b>830</b>	61,55	57,50	61,55	61,41
<b>840</b>	60,33	58,15	60,33	61,03
<b>850</b>	59,02	60,24	60,24	60,47
<b>860</b>	58,51	60,88	60,88	60,40
<b>870</b>	58,93	59,79	59,79	59,59
<b>880</b>	59,00	57,83	59,00	58,93
<b>890</b>	58,57	55,32	58,57	58,39
<b>900</b>	57,19	54,32	57,19	57,25
<b>910</b>	54,43	54,83	54,83	56,29
<b>920</b>	53,65	55,29	55,29	56,33
<b>930</b>	55,50	57,13	57,13	57,67
<b>940</b>	55,48	56,91	56,91	57,33
<b>950</b>	55,58	56,72	56,72	57,18
<b>960</b>	54,21	55,28	55,28	56,73
<b>970</b>	51,84	56,10	56,10	57,40
<b>980</b>	47,85	55,05	55,05	56,89
<b>990</b>	51,70	55,37	55,37	57,90
<b>1000</b>	49,72	53,71	53,71	57,51

Abb. 80: Tabelle: Vergleich: feste Höhen – Höhenscan, horizontal, Messlabor D

vertikal:

Frequenz	Feldstärkepegel Ant.-höhe: 1m	Feldstärkepegel Ant.-höhe: 1,4 m	Feldstärkepegel Ant.-höhe: 1 m + 1,4 m	Feldstärkepegel Höhenscan
[MHz]	[dB $\mu$ V/m]	[dB $\mu$ V/m]	[dB $\mu$ V/m]	[dB $\mu$ V/m]
250	60,24	54,60	60,24	61,44
260	58,79	55,34	58,79	62,24
270	54,49	56,68	56,68	62,36
280	55,37	59,47	59,47	63,24
290	51,50	59,29	59,29	62,84
300	51,40	60,32	60,32	62,62
310	56,25	62,45	62,45	63,34
320	59,28	63,66	63,66	63,79
330	61,83	65,40	65,40	65,54
340	61,16	65,06	65,06	65,20
350	61,48	66,15	66,15	66,70
360	61,14	66,72	66,72	67,09
370	60,36	67,33	67,33	68,12
380	60,53	67,77	67,77	68,17
390	63,58	68,37	68,37	68,22
400	66,43	69,44	69,44	69,09
410	67,70	69,49	69,49	69,22
420	67,83	69,32	69,32	69,21
430	67,48	68,68	68,68	68,73
440	67,77	68,25	68,25	68,56
450	68,72	68,71	68,72	69,05
460	69,51	69,33	69,51	69,88
470	68,83	69,43	69,43	69,78
480	68,58	69,57	69,57	69,78
490	68,81	68,82	68,82	69,37
500	70,14	68,99	70,14	70,08
510	69,79	67,81	69,79	69,50
520	70,06	67,18	70,06	69,55
530	69,77	66,56	69,77	69,32
540	70,29	67,34	70,29	69,97
550	69,55	66,05	69,55	69,15
560	70,08	66,46	70,08	69,54
570	69,87	65,21	69,87	69,44
580	70,26	64,03	70,26	69,99
590	70,91	63,57	70,91	70,68
600	70,61	63,13	70,61	70,36
610	70,18	63,94	70,18	69,69
620	70,07	64,40	70,07	69,56
630	69,51	64,14	69,51	68,82
640	69,86	63,82	69,86	69,43
650	69,78	62,46	69,78	69,23
660	69,71	60,30	69,71	69,50
670	67,71	54,69	67,71	67,45
680	66,75	52,15	66,75	66,07
690	65,03	56,07	64,34	64,38

<b>700</b>	65,24	60,13	65,24	64,84
<b>710</b>	65,07	62,83	65,07	64,55
<b>720</b>	64,58	65,25	65,25	66,55
<b>730</b>	63,09	66,28	66,28	67,37
<b>740</b>	62,93	66,74	66,74	67,79
<b>750</b>	63,47	65,85	65,85	66,84
<b>760</b>	63,14	64,21	64,21	65,38
<b>770</b>	61,32	62,61	62,61	62,85
<b>780</b>	58,96	63,00	63,00	62,21
<b>790</b>	55,76	62,74	62,74	62,23
<b>800</b>	54,58	63,03	63,03	62,67
<b>810</b>	54,40	62,62	62,62	62,19
<b>820</b>	53,67	62,16	62,16	61,95
<b>830</b>	52,57	61,25	61,25	61,26
<b>840</b>	52,98	61,07	61,07	61,14
<b>850</b>	51,67	60,36	60,36	60,29
<b>860</b>	50,81	59,81	59,81	59,87
<b>870</b>	51,94	58,24	58,24	58,77
<b>880</b>	53,30	57,13	57,13	57,41
<b>890</b>	52,94	55,07	55,07	56,01
<b>900</b>	54,54	55,22	55,22	57,52
<b>910</b>	56,46	57,66	57,66	58,89
<b>920</b>	56,65	57,30	57,30	58,86
<b>930</b>	55,81	55,54	55,81	58,24
<b>940</b>	55,58	52,93	55,58	56,90
<b>950</b>	55,41	53,43	55,41	57,46
<b>960</b>	56,39	53,65	56,39	57,82
<b>970</b>	56,63	54,67	56,63	58,42
<b>980</b>	56,65	53,52	56,65	57,26
<b>990</b>	56,13	51,52	56,13	56,99
<b>1000</b>	53,68	48,68	53,68	55,27

Abb. 81: Tabelle: Vergleich: feste Höhen – Höhenscan, vertikal, Messlabor D

## 9.2.4. Absorberhalle Bundesnetzagentur

## 9.2.4.1. Messplatzdämpfung mit Breitbandantennen

Frequenz	10 m- Strecke	10 m- Strecke	3 m- Strecke	3 m- Strecke
	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
[MHz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
30	27,8	15,5	14,1	7,4
35	24,2	13,2	12,0	4,0
40	21,9	11,9	10,3	3,1
45	21,6	11,6	9,2	3,5
50	21,1	11,9	7,7	3,1
55	18,9	9,9	5,2	2,2
60	16,4	8,9	4,2	0,2
65	14,4	10,0	3,5	0,2
70	13,6	9,9	2,3	1,2
80	12,2	9,1	0,4	0,5
90	11,5	10,0	0,2	2,1
100	11,2	8,2	-0,5	-0,5
120	7,0	5,2	-4,3	-3,6
125	6,6	4,7	-4,6	-2,9
140	5,5	4,5	-6,7	-3,6
150	3,8	3,2	-7,8	-4,0
160	4,2	3,2	-7,5	-3,8
175	3,9	2,8	-7,5	-4,0
180	3,4	2,0	-7,9	-4,0
200	1,3	2,2	-9,2	-4,4
250	-1,1	-0,8	-11,0	-5,8
300	-2,8	-0,9	-12,1	-9,2
400	-5,6	-3,4	-13,0	-12,7
500	-7,7	-6,1	-15,5	-14,4
600	-9,6	-9,4	-17,7	-14,9
700	-10,7	-10,2	-18,9	-16,9
800	-11,9	-11,9	-19,7	-19,2
900	-12,5	-12,3	-20,5	-19,7
1000	-13,6	-13,8	-21,6	-19,8

Abb. 82: Tabelle: Messplatzdämpfung Bundesnetzagentur mit Breitbandantennen

## 9.2.5. GTEM- Zelle der FHTW- Berlin

## 9.2.5.1. Vergleich: Kalibrierung – GTEM- Zelle

Frequenz	GTEM- Zelle 3m- korrigiert	Referenzstrahler Strahler- Kalibrierung	
		3 m horizontal	3 m vertikal
[MHz]	[dB $\mu$ V/m]	[dB $\mu$ V/m]	[dB $\mu$ V/m]
40	40,48	30,9	36,9
50	43,70	35,2	39,1
60	44,23	37,3	39,5
70	46,38	39,8	40,4
80	45,71	40,9	41,6
90	44,91	43,2	44,0
100	51,63	45,1	46,5
110	50,21	46,6	47,0
120	54,96	48,4	48,5
130	53,16	49,9	50,0
140	53,81	51,6	51,1
150	54,99	53,1	51,2
160	58,47	54,5	51,8
170	62,52	56,1	52,9
180	62,77	57,2	53,5
190	62,70	59,2	54,5
200	60,89	60,5	54,2
210	69,25	62,5	55,3
220	65,83	63,0	57,0
230	65,90	64,0	58,7
240	68,71	64,5	59,9
250	71,81	65,1	61,0
260	69,05	65,6	62,2
270	69,38	66,0	62,2
280	70,69	65,9	62,7
290	68,82	66,5	63,6
300	68,63	66,4	64,1
310	68,32	66,9	64,9
320	68,96	66,6	65,1
330	70,98	67,2	65,9
340	69,52	67,0	66,2
350	69,90	67,1	67,2
360	70,77	66,9	67,4
370	71,90	67,6	68,0
380	72,79	67,8	68,1
390	73,32	68,6	68,8
400	73,72	68,8	68,8
410	72,09	69,4	69,3
420	71,81	69,7	69,1
430	70,57	69,9	69,4
440	70,01	69,9	70,0
450	66,43	70,1	70,3
460	68,23	70,3	69,7
470	70,13	70,2	69,5
480	71,13	70,1	69,7

490	71,62	69,6	69,3
500	72,17	70,1	69,3
510	71,69	70,1	69,3
520	72,31	70,5	69,5
530	71,35	70,5	69,1
540	69,44	70,4	69,0
550	69,11	69,8	69,0
560	70,98	70,0	69,1
570	71,61	69,7	68,5
580	71,78	70,0	67,8
590	69,06	69,6	67,2
600	70,49	69,6	67,1
610	71,30	69,3	66,3
620	70,58	69,6	66,2
630	69,87	68,9	65,6
640	70,77	69,1	65,8
650	70,40	68,2	65,4
660	70,80	68,6	65,7
670	69,10	68,5	65,2
680	68,47	68,8	65,5
690	68,49	68,6	65,3
700	67,97	68,7	65,8
710	65,24	68,2	65,0
720	65,23	68,5	65,4
730	67,33	67,4	65,1
740	68,28	67,5	65,2
750	67,23	65,8	64,4
760	66,69	66,1	64,8
770	64,92	65,1	63,2
780	63,37	65,6	63,5
790	62,05	65,0	63,0
800	63,10	65,0	63,3
810	62,56	63,7	61,7
820	63,75	63,2	61,0
830	63,75	62,2	59,8
840	63,43	61,7	59,8
850	62,45	60,5	58,2
860	61,72	59,5	57,7
870	60,51	58,4	55,9
880	61,03	57,6	56,8
890	59,42	58,2	57,0
900	61,67	59,8	59,3
910	63,34	59,6	57,7
920	64,20	60,3	59,2
930	61,90	59,6	57,1
940	62,11	60,7	59,0
950	62,15	59,6	56,8
960	61,00	60,6	58,1
970	61,42	59,6	56,3
980	63,91	60,1	57,1
990	63,33	58,6	55,7
1000	61,70	59	56,4

Abb. 83: Tabelle: Kalibrierung – GTEM- Zelle

## 9.2.6. Messlabor P

## 9.2.6.1. Vergleich: feste Höhe – Kalibrierung

Frequenz [MHz]	horizontal		vertikal	
	Feldstärkepegel [dB $\mu$ V/m]	Referenzstrahler- Kalibrierung [dB $\mu$ V/m]	Feldstärkepegel [dB $\mu$ V/m]	Referenzstrahler- Kalibrierung [dB $\mu$ V/m]
30	27,61	26,6	37,46	33,8
40	28,73	30,9	39,97	36,9
50	29,62	35,2	38,68	39,1
60	30,34	37,3	35,77	39,5
70	37,12	39,8	35,48	40,4
80	39,38	40,9	34,21	41,6
90	41,31	43,2	37,26	44,0
100	36,79	45,1	39,55	46,5
110	34,29	46,6	37,15	47,0
120	36,73	48,4	38,89	48,5
130	41,20	49,9	41,44	50,0
140	41,28	51,6	44,11	51,1
150	42,82	53,1	44,97	51,2
160	46,00	54,5	46,65	51,8
170	47,27	56,1	48,27	52,9
180	48,09	57,2	50,22	53,5
190	51,16	59,2	52,92	54,5
200	52,94	60,5	52,94	54,2
210	53,96	62,5	54,35	55,3
220	55,53	63,0	56,41	57,0
230	56,49	64,0	58,69	58,7
240	57,38	64,5	59,11	59,9
250	57,99	65,1	58,78	61,0
260	57,57	65,6	57,39	62,2
270	57,91	66,0	59,12	62,2
280	56,01	65,9	58,28	62,7
290	55,91	66,5	58,94	63,6
300	54,70	66,4	57,59	64,1
310	55,50	66,9	58,34	64,9
320	53,97	66,6	58,22	65,1
330	54,77	67,2	59,71	65,9
340	52,40	67,0	60,42	66,2
350	54,58	67,1	60,49	67,2
360	55,46	66,9	59,36	67,4
370	57,75	67,6	59,79	68,0
380	59,17	67,8	60,67	68,1
390	60,51	68,6	61,88	68,8
400	61,47	68,8	61,59	68,8
410	63,61	69,4	61,67	69,3
420	63,50	69,7	60,40	69,1
430	65,28	69,9	62,28	69,4
440	65,01	69,9	62,35	70,0
450	65,94	70,1	62,42	70,3
460	65,97	70,3	61,51	69,7
470	66,00	70,2	60,42	69,5
480	67,07	70,1	61,14	69,7

490	67,05	69,6	61,39	69,3
500	66,04	70,1	60,66	69,3
510	65,47	70,1	58,09	69,3
520	66,66	70,5	58,36	69,5
530	65,89	70,5	58,23	69,1
540	65,76	70,4	58,63	69,0
550	64,86	69,8	59,49	69,0
560	64,86	70,0	59,82	69,1
570	63,44	69,7	59,75	68,5
580	61,09	70,0	60,48	67,8
590	57,84	69,6	60,60	67,2
600	53,15	69,6	61,33	67,1
610	47,67	69,3	60,78	66,3
620	44,43	69,6	62,96	66,2
630	53,44	68,9	62,75	65,6
640	56,91	69,1	62,93	65,8
650	58,58	68,2	61,20	65,4
660	61,65	68,6	60,17	65,7
670	61,94	68,5	60,46	65,2
680	63,22	68,8	62,71	65,5
690	63,63	68,6	63,00	65,3
700	64,29	68,7	61,81	65,8
710	64,55	68,2	59,86	65,0
720	64,25	68,5	57,51	65,4
730	64,17	67,4	58,67	65,1
740	64,41	67,5	60,23	65,2
750	63,07	65,8	59,08	64,4
760	62,91	66,1	57,19	64,8
770	61,25	65,1	56,27	63,2
780	60,43	65,6	57,71	63,5
790	59,51	65,0	58,41	63,0
800	58,85	65,0	57,14	63,3
810	56,70	63,7	54,98	61,7
820	54,56	63,2	52,97	61,0
830	54,37	62,2	54,63	59,8
840	54,04	61,7	54,44	59,8
850	54,38	60,5	54,64	58,2
860	53,25	59,5	52,60	57,7
870	51,96	58,4	51,72	55,9
880	51,30	57,6	51,67	56,8
890	50,87	58,2	50,24	57,0
900	49,68	59,8	50,31	59,3
910	49,48	59,6	47,86	57,7
920	49,67	60,3	47,92	59,2
930	49,98	59,6	48,99	57,1
940	47,10	60,7	49,66	59,0
950	43,31	59,6	49,60	56,8
960	39,32	60,6	47,33	58,1
970	38,44	59,6	50,44	56,3
980	40,29	60,1	50,62	57,1
990	34,43	58,6	51,56	55,7
1000	43,11	59,0	49,87	56,4

Abb. 84: Tabelle: Vergleich: feste Höhen – Kalibrierung



## 9.3. Verwendete Messmittel

## 10 m- Freifeld Altlandsberg:

Messempfänger	Rhode&Schwarz ESPC
Frequenzgenerator	Rhode&Schwarz SMT 03
Sendeantennen	Schwarzbeck VHA 9103 mit BBA 9106
	Schwarzbeck UHALP 9107
Empfangsantennen	Schwarzbeck VHBB 9124 mit BBA 9106
	Schwarzbeck VULP 9118 - A
Präzisions- Dipole	Schwarzbeck VHAP
	Schwarzbeck UHAP
Groundplane	Aluminiumfolie

## 3 m- Freifeld Altlandsberg:

Messempfänger	Rhode&Schwarz ESPC
Frequenzgenerator	Rhode&Schwarz SMT 03
Sendeantennen	Schwarzbeck VHA 9103 mit BBA 9106
	Schwarzbeck UHALP 9107
Empfangsantennen	Schwarzbeck VHBB 9124 mit BBA 9106
	Schwarzbeck VULP 9118 - A
Präzisions- Dipole	Schwarzbeck VHAP
	Schwarzbeck UHAP
Referenzstrahlungsquelle	Schaffner KSQ (30...1000 MHz)
Groundplane	Aluminiumfolie

## 3 m- Freifeld Reichl- EMV:

Messempfänger	Schaffner SMR 4518
Frequenzgenerator	Rhode&Schwarz SMT 03
Sendeantenne	Schwarzbeck VHA 9103 mit BBA 9106
	Schwarzbeck UHALP 9107
Empfangsantenne	Schwarzbeck VHBB 9124 mit BBA 9106
	Schwarzbeck VULP 9118 - A
Präzisions- Dipole	Schwarzbeck VHAP
	Schwarzbeck UHAP
Referenzstrahlungsquelle	Schaffner KSQ (30...1000 MHz)
Groundplane	1 mm Stahlplatten (1 x 2 m <sup>2</sup> ) mit Alufolienfugen

## 9.4. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Hindernisfreier Bereich eines Messplatzes mit Drehtisch [1].....	9
Abb. 2: Exemplarisches Spektrogramm von Fremdsignalen .....	12
Abb. 3: Zusammenhang zwischen Schaltzeiten und Oberwellen .....	14
Abb. 4: Vereinfachtes Blockschaltbild eines Messempfängers [4] .....	16
Abb. 5: Spitzenwertdetektor [4].....	17
Abb. 6: Quasi- Spitzenwertdetektor [4] .....	18
Abb. 7: Mittelwertdetektor [4] .....	19
Abb. 8: a) symmetrischer Dipol; b) bikonische Breitbandantenne [4].....	21
Abb. 9: Logarithmisch- periodische Breitbandantenne .....	21
Abb. 10: Bikonische- Logarithmisch- Periodische Antenne .....	22
Abb. 11: Tabelle: Transmissionsdämpfung verwendeter Kabel .....	23
Abb. 12: Mindestmasse der metallischen Massefläche [3].....	25
Abb. 13: Beispiele für die normierte Streckendämpfung [2] .....	28
Abb. 14: Netzwerkmodell zur Bestimmung der Messplatzdämpfung [2] .....	29
Abb. 15: Messung der Messplatzdämpfung [4] .....	30
Abb. 16: Foto: Referenzstrahlungsquelle .....	31
Abb. 17: Direkte und reflektierte Strahlung a) Freifeld, b) Schirmraum [4].....	36
Abb. 18: Typischer Versuchsaufbau in einer Absorberkammer [4] .....	37
Abb. 19: Foto, 3 m- Absorberhalle mit Drehtisch.....	37
Abb. 20: Fotos: 3 m- Vollabsorberkammer der Bundesnetzagentur .....	38
Abb. 21: Aufbau einer TEM- Zelle [4] .....	39
Abb. 22: Störung des TEM- Modus .....	40
Abb. 23: Emissionsmessung in GTEM-Zelle [4] .....	40
Abb. 24: Modenverwirbelungskammer [13] .....	41
Abb. 25: Luftaufnahme Freifeldmessplatzes Altlandsberg [14] .....	42
Abb. 26: Foto: 3 m- Absorberkammer Messlabor D .....	43
Abb. 27: Foto: 3 m- Absorberhalle Messlabor P mit realem Prüfling .....	44
Abb. 28: Foto; 10 m- Absorberhalle Bundesnetzagentur Kolberg .....	45
Abb. 29: Foto: GTEM- Zelle FHTW Berlin .....	46
Abb. 30: Foto: Messaufbau Messplatzdämpfung, 10 m- Strecke Altlandsberg .....	48
Abb. 31: Foto: Messaufbau Messplatzdämpfung, 3 m- Strecke Altlandsberg.....	49
Abb. 32: Messplatzdämpfung 10 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, horizontal, mit Breitbandantennen.....	50
Abb. 33: Messplatzdämpfung 10 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, vertikal, mit Breitbandantennen.....	51
Abb. 34: Fotos: Messung mit Präzisions- Dipolen, Altlandsberg.....	52
Abb. 35: Messplatzdämpfung 10 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, horizontal, mit Präzisions- Dipolen .....	53

Abb. 36: Messplatzdämpfung 10 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, vertikal, mit Präzisions-Dipolen.....	54
Abb. 37: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, horizontal, mit Breitbandantennen.....	55
Abb. 38: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, vertikal, mit Breitbandantennen.....	56
Abb. 39: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, horizontal, mit Präzisions- Dipolen .....	57
Abb. 40: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, vertikal, mit Präzisions-Dipolen.....	58
Abb. 41: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, horizontal, mit Referenzstrahlungsquelle, ohne Groundplane .....	59
Abb. 42: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, vertikal, mit Referenzstrahlungsquelle, ohne Groundplane .....	60
Abb. 43: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, horizontal, mit Referenzstrahlungsquelle, mit Groundplane .....	61
Abb. 44: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, vertikal, mit Referenzstrahlungsquelle, mit Groundplane .....	62
Abb. 45: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Reichl- EMV, horizontal, mit Breitbandantennen.....	63
Abb. 46: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Reichl- EMV, vertikal, mit Breitbandantennen.....	64
Abb. 47: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Reichl- EMV, horizontal, mit Präzisions- Dipolen .....	65
Abb. 48: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz Reichl- EMV, vertikal, mit Präzisions-Dipolen.....	66
Abb. 49: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz, Reichl- EMV, horizontal, mit Referenzstrahlungsquelle .....	67
Abb. 50: Messplatzdämpfung 3 m- Freifeldmessplatz, Reichl- EMV, vertikal, mit Referenzstrahlungsquelle .....	68
Abb. 51: Messplatzdämpfung 3 m- Absorberhalle, horizontal, mit Breitbandantennen .....	69
Abb. 52: Messplatzdämpfung 3 m- Absorberhalle, vertikal, mit Breitbandantennen.....	70
Abb. 53: Messplatzdämpfung 3 m- Absorberhalle Messlabor D, horizontal, mit Referenzstrahlungsquelle .....	71
Abb. 54: Messplatzdämpfung 3 m- Absorberhalle Messlabor D, vertikal, mit Referenzstrahlungsquelle .....	72
Abb. 55: Messplatzdämpfung 3 m- Absorberhalle, horizontal, mit Breitbandantennen .....	73
Abb. 56: Messplatzdämpfung 3 m- Absorberhalle, vertikal, mit Breitbandantennen.....	74
Abb. 57: Messplatzdämpfung 10 m- Absorberhalle, horizontal, mit Breitbandantennen .....	75
Abb. 58: Messplatzdämpfung 10 m- Absorberhalle, vertikal, mit Breitbandantennen.....	76

Abb. 59: Vergleich: GTEM- Zelle mit Kalibrierung, Referenzstrahlungsquelle, horizontal, 3 m korrigiert .....	77
Abb. 60: Vergleich: GTEM- Zelle mit Kalibrierung, Referenzstrahlungsquelle, vertikal, 3 m korrigiert .....	78
Abb. 61: Fotos: Realer Prüfling auf Holzkonstruktion .....	80
Abb. 62: Vorbereitende Messung mit der Absorptionsmesswandlerzange .....	81
Abb. 63: Tabelle: Messergebnisse Realer Prüfling, horizontal .....	82
Abb. 64: Vergleich: Kalibrierung – feste Höhen, horizontal, Messlabor P .....	85
Abb. 65: Vergleich: Kalibrierung – feste Höhen, vertikal, Messlabor P .....	86
Abb. 66: Vergleich: Höhenscan – feste Höhen, horizontal, Messlabor D .....	87
Abb. 67: Vergleich: Höhenscan – feste Höhen, vertikal, Messlabor D .....	88
Abb. 68: Tabelle: Vergleich: 80 cm – 100 cm Prüflingshöhe, Realer Prüfling, vertikal, 3 m- Freifeld Altlandsberg .....	89
Abb. 69: Tabelle: Vergleich: 80 cm – 100 cm Prüflingshöhe, Realer Prüfling, vertikal, 3 m- Freifeld Reichl- EMV .....	89
Abb. 70: Vergleich: Mit – Ohne Groundplane; 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, horizontal, Referenzstrahler .....	92
Abb. 71: Vergleich: Mit – Ohne Groundplane; 3 m- Freifeldmessplatz Altlandsberg, vertikal, Referenzstrahler .....	93
Abb. 72: Tabelle: Messplatzdämpfung Altlandsberg mit Breibandantennen .....	102
Abb. 73: Tabelle: Messplatzdämpfung Altlandsberg mit Präz.- Dipolen .....	103
Abb. 74: Tabelle: Messplatzdämpfung Altlandsberg mit Referenzstrahler .....	105
Abb. 75: Tabelle: Messplatzdämpfung Reichl- EMV mit Breibandantennen .....	107
Abb. 76: Tabelle: Messplatzdämpfung Reichl- EMV mit Präzisions- Dipolen .....	108
Abb. 77: Tabelle: Messplatzdämpfung Reichl- EMV mit Referenzstrahlungsquelle .....	109
Abb. 78: Tabelle: Messplatzdämpfung Messlabor D mit Breibandantennen .....	110
Abb. 79: Tabelle: Messplatzdämpfung Messlabor D mit Referenzstrahler .....	111
Abb. 80: Tabelle: Vergleich: feste Höhen – Höhenscan, horizontal, Messlabor D .....	113
Abb. 81: Tabelle: Vergleich: feste Höhen – Höhenscan, vertikal, Messlabor D .....	115
Abb. 82: Tabelle: Messplatzdämpfung Bundesnetzagentur mit Breibandantennen .....	116
Abb. 83: Tabelle: Kalibrierung – GTEM- Zelle .....	118
Abb. 84: Tabelle: Vergleich: feste Höhen – Kalibrierung .....	120

## 9.5. Danksagung

Ich möchte ganz herzlich meinen Eltern für die nicht nur finanzielle Unterstützung vor und während des Studiums danken.

Besonders möchte ich mich bei Herrn Dipl.- Ing. Günter Reichl für die interessante Aufgabenstellung, insbesondere aber auch für die Förderung und intensive Betreuung während der Arbeit bedanken. Die fachlichen und motivierenden Gespräche haben wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Zudem danke ich allen Mitarbeitern des Messlabor D, Messlabor P und der Bundesnetzagentur, sowie Herrn Pilatzek von der FHTW Berlin für die freundliche Unterstützung.

9.6. Erklärung zur Diplomarbeit

**Erklärung zur Diplomarbeit**

Ich versichere, dass ich meine Diplomarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Berlin , den \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Henning Richter