



REICHL

Elektromagnetische Verträglichkeit

Diplomarbeit

an der Technischen Fachhochschule Berlin
Fachbereich Elektrotechnik / Feinwerktechnik
Studiengang Kommunikationstechnik

und

in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Reichl-EMV

Leitungsgeführte Übertragung von Audio- und Videosignalen in einer
elektromagnetischen Umgebung mit hohen Feldstärken

von

Adnan Tuç

Matrikelnummer s700473

August 2004

Inhaltsverzeichnis

1	Thema.....	8
2	Einleitung	8
2.1	Materialien.....	8
2.2	Ablauf der Prüfung	8
3	Problemdarstellung	9
4	Ziel	9
5	Grundlagen / Theorie	10
5.1	Normen	10
5.1.1	Überblick.....	10
5.1.2	EN 55022 Störaussendung (Funkstörfeldstärke)	11
5.1.3	EN 61000-4-3 Störfestigkeit (Feldbeeinflussung).....	13
5.2	EMV-Grundlagen	14
5.2.1	Überblick.....	14
5.2.2	Störquellen.....	18
5.2.3	Störsenken.....	19
5.2.4	Kopplungsarten und Gegenmaßnahmen	22
5.2.5	Gehäuseaufbau	33
6	EMV-Equipment.....	37
6.1	Antennen.....	37
6.2	Reverberation Chamber (Modenverwirbelungskammer).....	37
6.3	TEM-Zelle.....	39
6.4	Metallisiertes Gewebe.....	41
6.4.1	Gewebe mit unterschiedlichen Dämpfungen.....	41
	EMV-Klebeband.....	43
7	Objektbeschreibung	44
7.1	Bidirektionale Audio-Verbindung	44
7.2	Unidirektionale Video-Verbindung.....	45
8	Vorwort zu den Messungen	46
9	Messung der maximalen Feldstärke (2MHz–1GHz)	46
9.1	Messergebnisse	48
9.1.1	Leistungsverläufe der Verstärker	48
9.1.2	Feldstärkenverläufe der Verstärker	49
10	Videopfad (Kamera im Feld, visuelle Überprüfung einer Testvorlage).....	54
10.1	Empfindlichkeitsprüfung	54
10.2	Auswertung zur Empfindlichkeit der Kamera 1	56
10.3	Auswertung der Empfindlichkeit der Kamera 2	56
10.3.1	Empfindlichkeitsprüfung	59
10.3.2	Bildbeeinflussung.....	59
10.3.3	Aufnahme der maximalen Bildstörungen	60
11	Audiopfad (Störabstand).....	63

11.1 Festlegung des Störabstands des Lautsprecherverstärkers	63
11.2 Empfindlichkeitsprüfung des Lautsprecherverstärkers	66
11.2.1 Auswertung der Empfindlichkeit des Hifi-Verstärkers	67
11.2.2 Entstörung des Verstärkers.....	67
11.3 Wirkung von Entstörkomponenten (Kondensatoren).....	68
11.4 Auswertung am Oszilloskop	68
11.4.1 Lautsprecherverstärker unentstört	69
11.4.2 Lautsprecherverstärker entstört	71
11.5 Mikrofonverstärker (SMD-Bausatz)	72
11.6 Mikrofonverstärker (Eigenkonstruktion).....	73
11.7 Mikrofon und Lautsprecher.....	74
11.8 Zusammenfassung der Ergebnisse der Empfindlichkeitsprüfungen.....	75
12 Schirmgehäuse	76
12.1 Einleitung	76
12.2 Berechnung der benötigten Dämpfung bei einer vorgegebenen Feldstärke von 200V/m	76
12.3 Berechnung für den Lautsprecherverstärker	76
12.4 Berechnung für die Kamera	77
12.5 Gehäuse aus Karton	79
12.6 Dämpfungsmessung in der TEM-Zelle.....	81
12.6.1 Messung der durch metallisiertes Gewebe gedämpften Feldstärke.....	82
12.6.2 Berechnung der Dämpfung bei 5MHz.....	82
12.6.3 Dämpfungsverlauf.....	83
12.6.4 Berechnung bei doppelter Schirmung bei 5MHz.....	83
12.6.5 Dämpfungsverlauf.....	84
12.6.6 Gehäuse 2	84
12.6.7 Auswertung (Gehäuse 1 und Gehäuse 2).....	85
12.7 Ersatzantennenmethode (300MHz–3GHz)	86
12.7.1 Messablauf Ersatzantennenmethode.....	86
12.7.2 Problem.....	87
12.7.3 Lösung	88
12.7.4 Ermittlung der Dämpfung	88
12.7.5 Verlauf der Dämpfung der Ersatzantennenmessung	89
12.7.6 Auswertung der Ersatzantennenmessung	90
12.8 Referenzstrahlermethode (300MHz–1GHz).....	91
12.8.1 Messablauf Referenzstrahlermethode	91
12.8.2 Auswertung Referenzstrahlermethode.....	94
12.8.3 Auswertung der benötigten Dämpfung.....	95
12.9 Kamera im Gehäuse	96
12.9.1 Auswertung Betrieb der Kamera im Gehäuse bei hohen Feldstärken	97
12.9.2 Beide Verstärker im Gehäuse	98
12.10 Zusammenbau des geschirmten Gehäuses	99
12.10.1 Videopfad im Gehäuse	99
12.10.2 Steckeranschlüsse für das Gehäuse (Video).....	100
12.10.3 Audio-Bereich im Gehäuse	102
12.10.4 Steckeranschlüsse für das Gehäuse (Audio).....	103
12.10.5 Einbau Lautsprecher- und Mikrofonverstärker und Lautsprecher	103
12.11 Zusammenbau des ungeschirmten Gehäuses	106
12.11.1 Gehäuseansicht.....	106

13	Aufstellung der Einheiten am Betriebsort.....	108
14	Zusammenfassung	111
15	Anlagen.....	112
15.1	Tabellen	112
15.2	Technische Daten	125
15.3	Geräteliste.....	127
15.4	Literaturverzeichnis	130
16	Danksagung.....	131

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: TEM-Zelle	39
Abbildung 2: 50- Ω -Abschlusswiderstand	40
Abbildung 3: Messaufbau	46
Abbildung 4: E-Feldsonde in der TEM-Zelle	47
Abbildung 5: Leistungsverlauf im Bereich 2MHz–250MHz	48
Abbildung 6: Leistungsverlauf im Bereich 200MHz–400MHz	48
Abbildung 7: Leistungsverlauf im Bereich 400MHz–1GHz	49
Abbildung 8: Feldstärkenverlauf im Bereich 2MHz–250MHz	49
Abbildung 9: Feldstärkenverlauf im Bereich 200MHz–400MHz	50
Abbildung 10: Feldstärkenverlauf im Bereich 400MHz–1GHz	50
Abbildung 11: Feldstärkengesamtverlaufverlauf 2MHz–1GHz	51
Abbildung 12: Maximale Prüflingsgröße bei der TEM-Zelle	52
Abbildung 13: Kamera-Vorderansicht	54
Abbildung 14: Kamera-Hinteransicht	55
Abbildung 15: Kamera-Seitenansicht	55
Abbildung 16: Kamera 2-Vorderansicht	56
Abbildung 17: Kamera 2-Hinteransicht	57
Abbildung 18: Kamera 2-Seitenansicht	57
Abbildung 19: Kamera am Kunststoffständer montiert Vorderansicht	58
Abbildung 20: Kameraständer-Hinteransicht	58
Abbildung 21: Kamera mit Kunststoffständer-Draufsicht	58
Abbildung 22: Kamera 2 im Streifenleiter	59
Abbildung 23: Verlauf der Empfindlichkeit der Kamera	59
Abbildung 24: Testbild ohne Störung	60
Abbildung 25: Testbildstörung bei 17,3MHz	60
Abbildung 26: Testbildstörung bei 98,3MHz	61
Abbildung 27: Testbildstörung bei 156MHz	61
Abbildung 28: Testbildstörung bei 257MHz	61
Abbildung 29: Testbildstörung bei 374MHz	62
Abbildung 30: Messaufbau	63
Abbildung 31: Lautsprecherverstärker	63
Abbildung 32: Schaltbild des Lautsprecherverstärkers	64
Abbildung 33: Verlauf der Lautsprecherverstärkung	66
Abbildung 34: Überbrückung der Basis-Emitter-Strecke an den Transistoren	68
Abbildung 35: Oszilloskopaufnahme ohne Feld	69
Abbildung 36: gleichgerichtetes NF-Signal	69
Abbildung 37: Einweggleichrichtung	70
Abbildung 38: Signal ohne Gleichrichtung	71
Abbildung 39: NF-Signal nach Pegelerhöhung	71
Abbildung 40: SMD-Mikrofonverstärker (Vorderansicht)	72
Abbildung 41: SMD-Mikrofonverstärker (Hinteransicht)	72
Abbildung 42: Mikrofonverstärker (Eigenbau)	73
Abbildung 43: Schaltplan (Eigenbau) des Mikrofonverstärkers	73
Abbildung 44: Mikrofon	74
Abbildung 45: Lautsprecher (Vorderansicht)	74
Abbildung 46: Lautsprecher (Rückansicht)	74
Abbildung 47: externer Lautsprecher	75
Abbildung 48: Minimal erforderliche Dämpfung für die Verstärker	77
Abbildung 49: Minimal erforderliche Dämpfung für die Kamera	78
Abbildung 50: Karton mit 9,5cm Seitenlänge ausgeschnitten	79
Abbildung 51: Metallisiertes Gewebe	79
Abbildung 52: Karton mit metallisiertem Gewebe überdeckt	80
Abbildung 53: Gehäuse	80
Abbildung 54: Sonde im Karton	81
Abbildung 55: Maximale Feldstärke und gedämpfte Feldstärke im Überblick	82
Abbildung 56: Berechnete Dämpfung	83
Diplomarbeit	5

Abbildung 57: beide Dämpfungsverläufe	84
Abbildung 58: Gehäuse 2 (Dämpfung)	84
Abbildung 59: Messaufbau	86
Abbildung 60: Kurzer Monopol im Gehäuse	87
Abbildung 61: T-Stück.....	87
Abbildung 62: Dämpfungsverlauf der Ersatzantennenmethode	89
Abbildung 63: Messaufbau	91
Abbildung 64: Kugelstrahler im Stahlgehäuse.....	92
Abbildung 65: Stahlblech mit metallisiertem Gewebe abgedeckt.....	92
Abbildung 66: Feldstärkenverlauf Referenzstrahlermethode	93
Abbildung 67: Dämpfungsverlauf Referenzstrahlermethode	93
Abbildung 68: Innenansicht des Gehäuses	96
Abbildung 69: Kamera im Gehäuse	97
Abbildung 70: Kameragehäuse aus Kunststoff	99
Abbildung 71: Kameragehäuse mit metallisiertem Gewebe verkleidet	99
Abbildung 72: a) Nylonschrauben; b) Polklemmen	100
Abbildung 73: BNC-Buchse	100
Abbildung 74: a) Kamera im Gehäuse eingebaut; b) Anschlüsse am Gehäuse	101
Abbildung 75: Kunststoffgehäuse für Lautsprecher und Mikrofonverstärker und Lautsprecher	102
Abbildung 76: Gehäuse mit metallisiertem Gewebe verkleidet	102
Abbildung 77: a) Klinkenbuchse; b) Cinchbuchse; c) Hohlstecker	103
Abbildung 78: Gehäuse inneres	103
Abbildung 79: Buchsen mit Beschriftung	104
Abbildung 80: Beide Verstärker mit Lautsprecher im Gehäuse eingebaut.....	105
Abbildung 81: Ungeschirmtes Gehäuse in zwei Positionen	106
Abbildung 82: Innenansicht und Deckel	106
Abbildung 83: Buchsen mit Beschriftung	107
Abbildung 84: Gehäuse Innenansicht.....	107
Abbildung 85: Ungeschirmtes Gehäuse zusammengebaut	107
Abbildung 86: Bedienplatz mit Monitor des Steuerrechners.....	108
Abbildung 87: Kabinenfilter	109
Abbildung 88: Geschirmter Verstärker in der Kammer.....	109
Abbildung 89: Mikrofon in der Kammer	110
Abbildung 90: Kamera in der Kammer.....	110

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: ITE der Klasse A	12
Tabelle 2: ITE der Klasse B	12
Tabelle 3: Prüfschärfegrad nach EN 61000-4-3	13
Tabelle 4: Zuordnung von Testfällen zu Störquellen	19
Tabelle 5: Dämpfung für die Verstärker	77
Tabelle 6: Dämpfung für die Kamera	78
Tabelle 7: zur Abbildung 5	112
Tabelle 8: zur Abbildung 6	113
Tabelle 9: zur Abbildung 7	114
Tabelle 10: zur Abbildung 8	114
Tabelle 11: zur Abbildung 9	115
Tabelle 12: zur Abbildung 10	116
Tabelle 13: zur Abbildung 55	118
Tabelle 15: zur Abbildung 58	120
Tabelle 16: zur Abbildung 66	121
Tabelle 17: zur Abbildung 67	122
Tabelle 18: zur Abbildung 23	123
Tabelle 19: zur Abbildung 33	124

1 Thema

Thema dieser Diplomarbeit ist die leitungsgeführte Übertragung von Audio- und Videosignalen in einer elektromagnetischen Umgebung mit hohen Feldstärken.

2 Einleitung

Für den Einsatz in einer Modenverwirbelungskammer ist eine unidirektionale Video- und eine bidirektionale Audio-Verbindung notwendig.

Es soll damit die Reaktion des Prüflings während der Beaufschlagung geprüft werden.

Einige wenige Prüflinge bedürfen einer Aktivierung durch einen Schallpegel, z.B. (Freisprecheinrichtung), sodass auch diese Möglichkeit störungsfrei bereitgestellt werden muss.

Prüfungen an Geräten für eine Industrieumgebung werden mit 10V/m, solche an Medizingeräten mit 20V/m durchgeführt. In Extremfällen wurden bereits Prüfungen mit Feldstärken von 100V/m durchgeführt, sodass die Forderung der Störfestigkeit gegenüber einer Feldstärke von 200V/m festgesetzt wird.

2.1 Materialien

Aus ökonomischen Gründen sollen einfache Gehäuse, Strukturen und moderne Materialien Anwendung finden.

Es wird daher auf günstig zu kaufende Kunststoffgehäuse und metallische Gewebe zurückgegriffen.

2.2 Ablauf der Prüfung

Ermittelt wird die Schirmdämpfung von Gehäusen in der benötigten Größenordnung, die dann mit der tatsächlich benötigten Feldabsenkung verglichen wird.

Unter der Voraussetzung, dass die tatsächliche Dämpfung die benötigte Dämpfung überschreitet, werden dann die Schirmgehäusen realisiert und messtechnisch überprüft.

3 Problemdarstellung

Das größte Problem ist, dass man während der Prüfung, z.B. in einer Modenverwirbelungskammer (Reverberation Chamber), diese nicht mit einer ungeschützten Kamera beobachten kann.

Es treten elektromagnetische Felder auf, die das Bild stören, sodass man den Prüfling in Extremfällen nicht mehr beobachten kann.

Außerdem werden die Lautsprecher und Mikrofonverstärker gestört, es treten Demodulationen auf.

4 Ziel

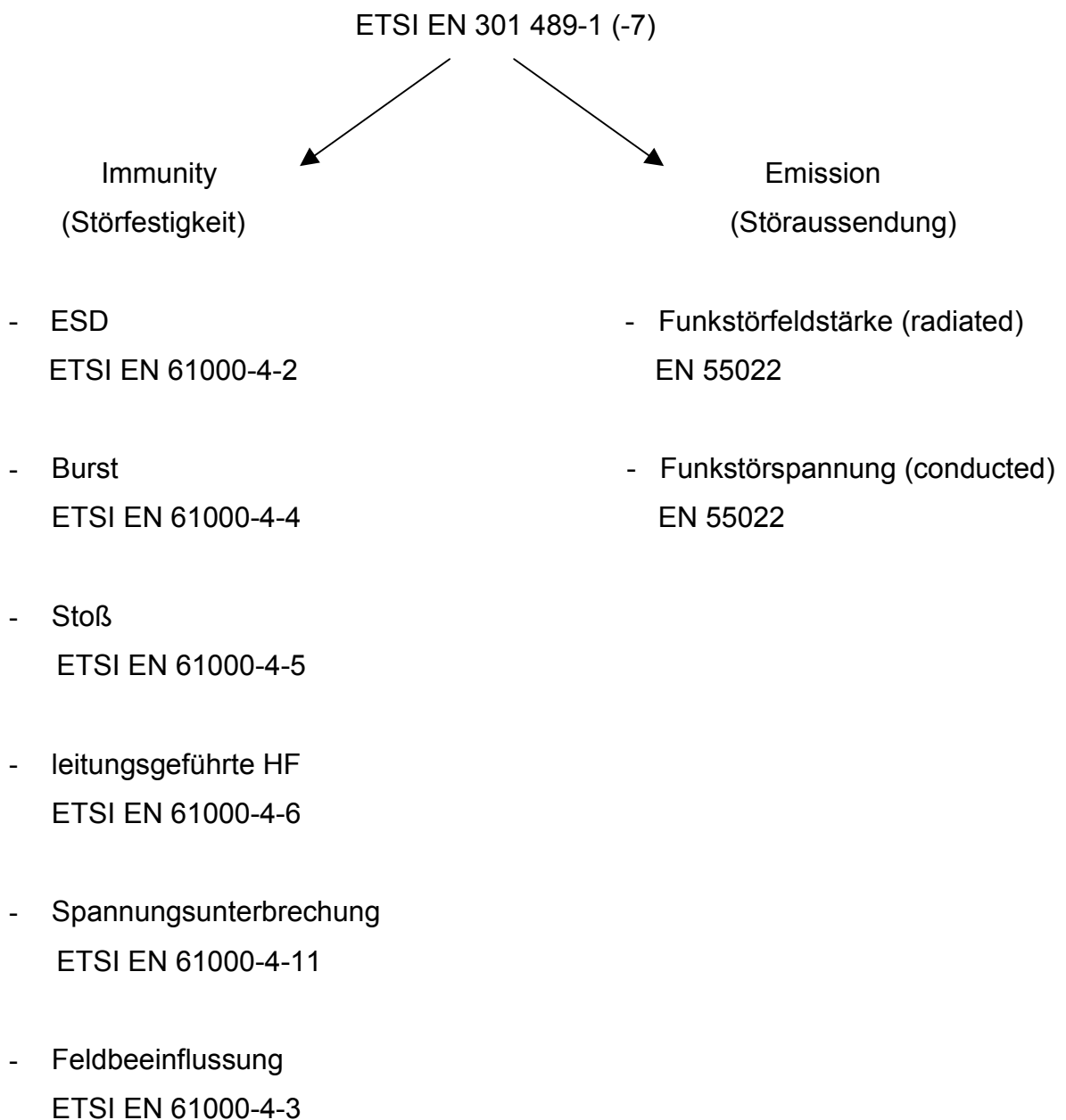
Als Ziel ist eine störungsfreie Bild- und Tonübertragung bei HF-Feldern von etwa 200V/m gedacht.

5 Grundlagen / Theorie

5.1 Normen

5.1.1 Überblick

Gemäß den Produkteigenschaften gilt für ein Erzeugnis eine entsprechende Produktgruppennorm. Gibt es für ein Erzeugnis keine Produktgruppennorm, muss der Hersteller auf die jeweils übergeordnete Produktnorm zurückgreifen.



5.1.2 EN 55022 Störaussendung (Funkstörfeldstärke)

Festlegungen:

- Begrenzung der hochfrequenten Störaussendung von Einrichtungen der Informationstechnik
- Vorgabe der Messverfahren zur Störaussendung von 9kHz–400GHz
- Grenzwerte sind nur für einen eingeschränkten, als ausreichend angesehenen Frequenzbereich definiert
- wenn kein Grenzfrequenz definiert ist, sind keine Messungen notwendig
- als ausreichend wird der Frequenzbereich $30\text{MHz} \leq f \leq 1\text{GHz}$ angesehen
- Prüfungen finden in der Verkaufkonfiguration statt

Diese Norm hat Bestand für Geräte:

- deren Hauptzweck im Empfang, Speichern, Ausgeben, Übertragen oder Überwachen von Daten besteht
- die eine oder mehrere Anschlüsse für die Informationsübertragung haben
- deren Nennwert der Versorgungsspannung weniger als 600V beträgt

Die Norm unterscheidet nach ITE der Klasse A und ITE der Klasse B.

Klasse B:

- Einsatzort hauptsächlich im Wohnbereich oder ohne festen Betriebsort

Klasse A:

- alle anderen Einsatzorte

Die Messung erfolgt nach der Quasispitzenwert-Messmethode. Das heißt, dass stochastische Pegelüberschreitungen toleriert werden können. Folgende Grenzwerte der abgestrahlten Störgrößen (Messentfernung 10m) sind definiert.

Frequenzbereich (in MHz)	Quasispitzenwert (in dB [μ V/m])
30–230	40
230–1000	47

Tabelle 1: ITE der Klasse A

Frequenzbereich (in MHz)	Quasispitzenwert (in dB [μ V/m])
30–230	30
230–1000	37

Tabelle 2: ITE der Klasse B

5.1.3 EN 61000-4-3 Störfestigkeit (Feldbeeinflussung)

Festlegung:

- allgemeiner Bezug für das Betriebsverhalten von elektronischen und elektrischen Geräten bei der Beeinflussung durch hochfrequente elektromagnetische Felder
- Prüfverfahren
- Prüfung im Frequenzbereich 80MHz

Folgende Prüfschärfegrade sind festgelegt:

Prüfschärfegrad	Feldstärke (in V/m)
1	1
2	3
3	10
X ¹⁾	besondere Festlegung

Tabelle 3: Prüfschärfegrad nach EN 61000-4-3

1)

- offener Prüfschärfegrad
- kann in der Produktspezifikation angegeben werden

5.2 EMV-Grundlagen

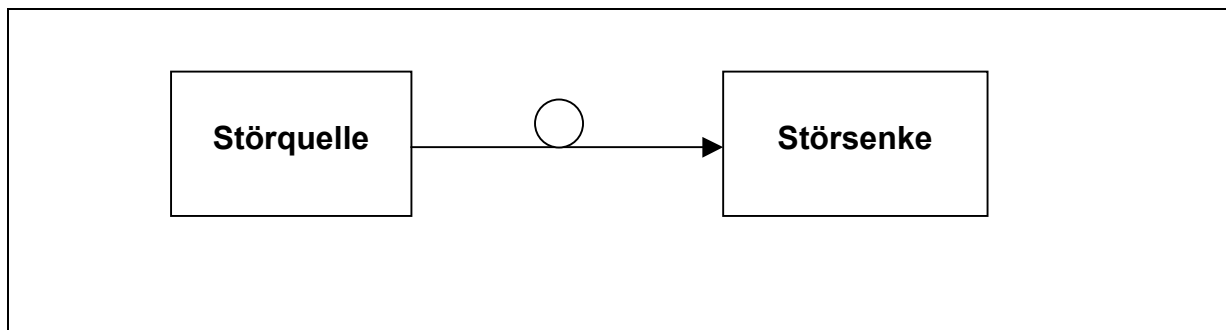
5.2.1 Überblick

Definition:

Die EMV kennzeichnet die Fähigkeit einer Einrichtung, in seiner Umgebung zufrieden stellend zu funktionieren, ohne dabei andere Einrichtungen unzulässig zu beeinflussen.

Daraus geht hervor, dass durch die EMV-Problematik die Störempfindlichkeit eines Gerätes beschrieben wird. Außerdem wird erläutert, wie ein elektronisches oder elektrisches Gerät andere Geräte beeinflussen kann.

Die grundsätzliche Beeinflussungstrecke sieht wie folgt aus:



Bei der Entwicklung eines elektronischen oder elektrischen Gerätes muss die EMV-Problematik von Anfang an berücksichtigt werden. Da die praktischen Ergebnisse oft andere Erkenntnisse liefern als die Theorie, muss die EMV-Entwicklung aus der Analyse und aus Praxistests bestehen. Dabei müssen alle Teilkomponenten berücksichtigt werden. Außerdem ist zu beachten, dass es interne und äußere Störeinflüsse gibt.

Begriffe:

Störgröße

Eine Störgröße ist eine elektromagnetische Größe. Sie ist ein unerwünschter Effekt. Sie kann periodisch oder unperiodisch auftreten. Die Übertragung kann leitend oder strahlend erfolgen.

Störgrößen können in Form von

$U \Rightarrow$ Störspannung

$I \Rightarrow$ Störstrom

$E \Rightarrow$ Störung durch elektrische Felder

$H \Rightarrow$ Störung durch magnetische Felder

auftreten.

Störquelle

Eine Störquelle ist der Ursprung einer Störung. Es gibt geräteigene (interne) Störquellen und Störquellen anderer Geräte (externe). Die internen Störquellen sind bei der Entwicklung eines Gerätes zu bekämpfen. Gegen die externen Störquellen kann man sein Gerät nur schützen.

Störsenke

Eine Störsenke ist ein gestörtes Gerät oder eine gestörte Funktionseinheit. Durch EMV-Maßnahmen muss sie vor einer oder mehreren Störquellen geschützt werden.

Störfestigkeit

Wenn sich eine Störsenke durch eine Störgröße bis zu einer Störschwelle nicht beeinflussen lässt, ist die Störsenke bis zu dieser Störschwelle störfest.

Störschwelle

Die Störschwelle stellt einen Grenzwert dar. Wenn durch eine Störgröße die Störschwelle überschritten wird, reagiert eine Störsenke mit einer Funktionsstörung.

Funktionsstörung

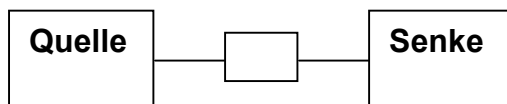
Eine Funktionsstörung ist eine dauerhafte oder zeitweilige Funktionsbeeinträchtigung einer Störsenke. Eine zeitweilige Funktionsbeeinträchtigung ist z.B. ein Übertragungsfehler.

Zerstörfestigkeit

Wenn durch eine Störgröße dieser Grenzwert überschritten wird, wird die Funktion einer Störsenke dauerhaft gestört.

Koppelmechanismus

Der Koppelmechanismus ist der Mechanismus, durch den eine Störquelle eine Störsenke beeinflussen kann. Der Koppelmechanismus kann als Impedanz dargestellt werden:

 Z_K mit $Z_K = R_K + j\omega L_K + 1/j\omega C_K$

Ziel der EMV-Entwicklung

- Die Einrichtung muss sich optimal in der vorgesehenen Umgebung einfügen.
- Bewertung nach:
 - Unterdrückung der Störquelle
 - Optimierung des Übertragungswertes
 - Störfestigkeit
- möglichst kleiner Entwicklungsaufwand,
- geringe Entwicklungskosten

5.2.2 Störquellen

Störquellen sind in der Umwelt immer vorhanden. Es gibt natürliche und künstliche Störquellen. Zu den natürlichen Störquellen zählen Blitze und elektrostatische Entladungen. Künstliche Störquellen sind z.B. TV-Sendeanlagen und Mobiltelefone. Aber auch durch Schaltnetzteile verursachte Schaltflanken zählen dazu.

Störsignale können zeitlich und räumlich verändert auftreten. Sie können leitungs- oder feldgebunden sein. Feldgebunden werden sie ohne spezielle Leiter übertragen. Leitungsgebunden werden die Störsignale über die Daten- oder die Versorgungsleitung eingekoppelt.

Bei den Störquellen müssen Breitbandstörquellen und Schmalbandstörquellen unterschieden werden.

Breitbandquellen haben ein Frequenzspektrum, das sich über einen größeren Frequenzbereich erstreckt. Die Schmalbandstörquellen senden in einem bestimmten Frequenzbereich zeitlich schmale Störimpulse in regelmäßigen Abständen aus.

Beispiele für interne Störquellen:

- Potenzialänderungen
- Induktivitäten (bei steilen Störflanken)
- Gleichrichter (bei steilen Störflanken)
- Taktgeneratoren
- Reflexionserscheinungen

Beispiele für externe Störquellen:

- elektrische Maschinen (z.B. Relais)
- Blitze
- Hochspannungseinrichtungen
- Kontaktentladungen
- HF-Sender
- elektronische Geräte

Für EMV-Messungen müssen diese Störquellen im Labor nachgebildet werden. Dafür gibt es folgende Testfälle:

Störquelle	Testfall
elektrische Maschinen	Burst
Blitze	Surge
Hochspannungseinrichtungen	Surge
HF-Sender	leitungsgebundene HF
elektronische Geräte	Felder
Kontaktentladung	ESD

Tabelle 4: Zuordnung von Testfällen zu Störquellen

5.2.3 Störsenken

Jedes elektrische oder elektronische System stellt eine Störsenke dar. Es gilt nun, die Widerstandsfähigkeit der Störsenken zu erhöhen. Es gibt einige Grundregeln, die von Anfang an beachtet werden müssen:

- Schaltung so auslegen, dass der benötigte Frequenzbereich durchgelassen wird
 - Störsignale in anderen Frequenzbereichen werden geblockt
- Anpassen
 - verhindert Reflexionen (zusätzliche Signale)
- symmetrische Signalübertragung
 - Unterdrückung von Gleichtaktstörungen
- Anschlussleitungen vor Überspannung schützen
 - Überspannung kann die Schaltung zerstören

analoge Systeme:

Es gibt bei analogen Systemen keine Störschwelle. Jede Störung wirkt sich direkt auf die Störsenke aus. Im Frequenzbereich des Nutzsignals sind diese Auswirkungen am größten. Darum können Störungen nur begrenzt zugelassen werden. Ein aus der Anwendung resultierendes Mindestverhältnis (Störabstand = a_n) muss eingehalten werden.

Es berechnet sich zu:

$$a_n = 20 \log \left| \frac{U_a}{\Delta U_a} \right|$$

a_n = Störabstand

U_a = Ausgangsspannung

ΔU_a = zulässige Änderung der Ausgangsspannung durch ein Störsignal

Maßnahme für analoge Systeme:

möglichst an der Signalquelle AD wandeln (AD => von analog auf digital)

bei gemischten Schaltungen den Analog- und Digitalteil örtlich trennen und ggf. einzeln schirmen

bei schwachen Signalen an der Signalquelle einen Verstärker platzieren

digitale Systeme:

Während sich in analogen Systemen jedes Störsignal in der Störsenke auswirkt, haben Störsignale in digitalen Systemen erst erhebliche Auswirkungen, wenn ein bestimmter Schwellwert überschritten wird. Die Störung wirkt sich in der Änderung des logischen Signalzustandes (Bitfehler) aus.

Es wird zwischen statischer und dynamischer Störfestigkeit unterschieden.

statische Störfestigkeit:

wenn die Einwirkzeit der Störungen auf die Störsenke größer ist, als die Schaltzeit (Dauer des Pegelwechsels) des Systems

dynamische Störfestigkeit:

wenn die Einwirkzeit der Störung auf die Störsenke kleiner ist, als die Schaltzeit des Systems folgt:

höherer Störsignalpegel für Bitfehlerverursachung notwendig

Maßnahme für digitale Systeme:

- Schaltkreisfamilie nicht mischen
- Entprellung für mechanische Schalter
- keine langen parallelen Leitungen
- unbenutzte Eingänge auf definiertes Potenzial legen
- Abblockkondensatoren induktionsarm anschließen
- nur so schnelle Schaltkreise einsetzen, wie zur Funktion der elektronischen Anordnung notwendig

5.2.4 Kopplungsarten und Gegenmaßnahmen

Die EMV-Problematik kann nur beherrscht werden, wenn einige Grundlagen von Anfang an bei der Entwicklung eines elektrischen oder elektronischen Gerätes beachtet werden. Voraussetzung für die Beherrschung ist die Kenntnis, wo sich Störquellen und Störsenken befinden.

Es müsse zwei Stellen unterschieden werden:

Wenn die Wellenlänge (λ) des Störsignals sehr viel kleiner als die Leiterlänge ist, gibt es keine Unterschiede der Störsignalamplitude auf dem Leiter. Es kann von stationären Verhältnisse ausgegangen werden. Dann treten folgende Kopplungsarten auf:

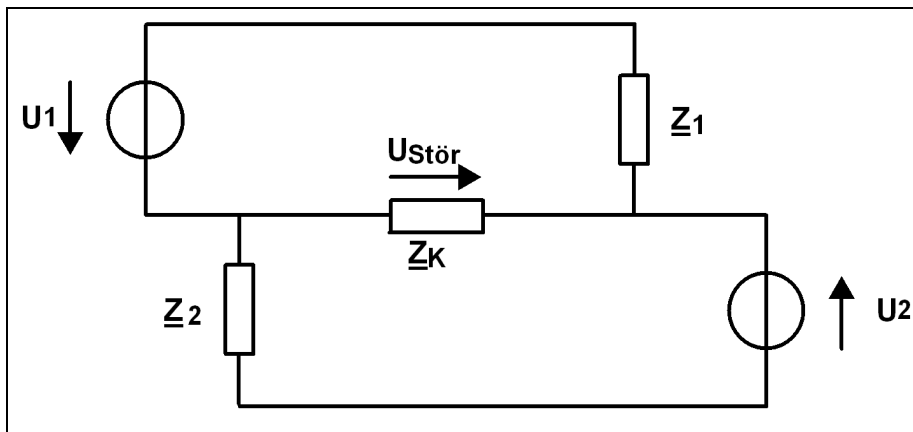
- galvanische Kopplung
- kapazitive Kopplung
- induktive Kopplung

Wenn die Wellenlänge (λ) des Störsignals größer oder gleich der Leitungslänge ist, tritt eine dynamische Störsignalverteilung auf. Dann wirken:

- Wellenkopplung
- Strahlungskopplung

5.2.4.1 Galvanische Kopplung

Galvanische Kopplung tritt immer dann auf, wenn zwei oder mehr Stromkreise einen gemeinsamen Leiter haben oder über ein niederohmiges Bauteil miteinander verbunden sind.



Prinzip der galvanischen Kopplung

Durch eine Stromaufnahme in Stromkreis 1 folgt:

Wegen Widerständen (R) und Induktivitäten (L) überlagert sich eine Störspannung $U_{ST\ 1}$ der Nutzspannung $U_{Nutz\ 2}$ des Kreises 2.

Es gilt:

$$\Delta U_R = R * \Delta I \qquad U_L = L * \frac{di}{dt}$$

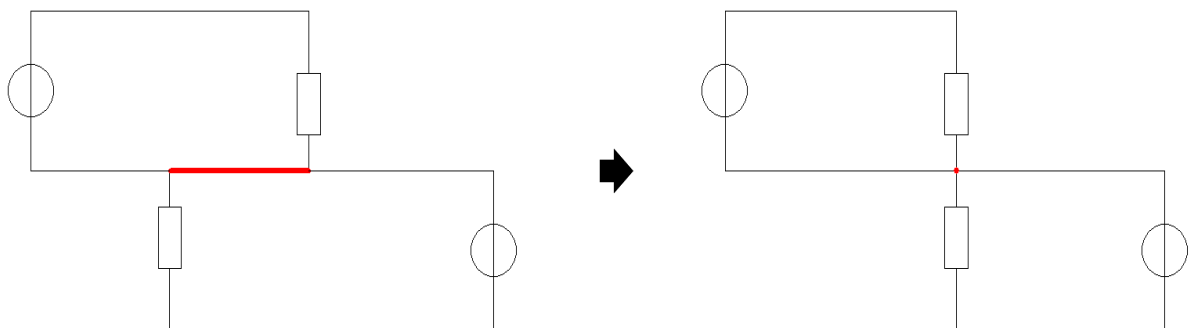
Abschirmrahmen:

Die über einen Abschirmrahmen fließenden Ausgleichströme verursachen eine Potenzialdifferenz, die sich auf alle Kreise auswirkt.

Gegenmaßnahmen:

- in Versorgungsleitungen $\frac{di}{dt}$ durch Stützkondensatoren verkleinern
- bei gegebenen $\frac{di}{dt}$ müssen R und L verkleinert werden
- Verkleinerung von R und L kann durch kurze, dicke Leiter erreicht werden
- flächige Ausführung von GND bei $f > 10\text{kHz}$
- für jede Datenleitung einen eigenen Rückleiter vorsehen
- Signal- und Leistungskreise trennen
- sternförmige Masseführung bei $f < 10\text{kHz}$
- Differenzverstärker einsetzen
- keine Verbindung von Kreisen, die getrennt sein sollten

Prinzip:



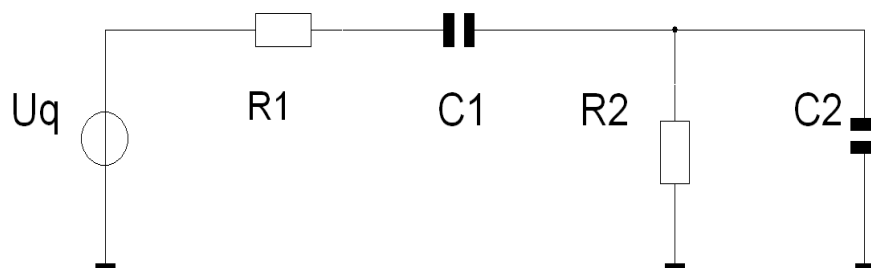
5.2.4.2 Kapazitive Kopplung

Die kapazitive Kopplung entsteht durch parasitäre Kapazitäten. Sie ist die häufigste Kopplungsart. Ein Signal koppelt dabei auf einen parallel geführten Nachbarleiter über.

Hervorgerufen wird die kapazitive Kopplung (Kapazität im pF-Bereich) durch eine Spannungsänderung $\frac{du}{dt}$ in Kreis 1, die auf Kreis 2 überkoppelt.

Zu beachten ist, dass sich die kapazitive Kopplung frequenzabhängig verhält.

Ausgangsschaltbild:

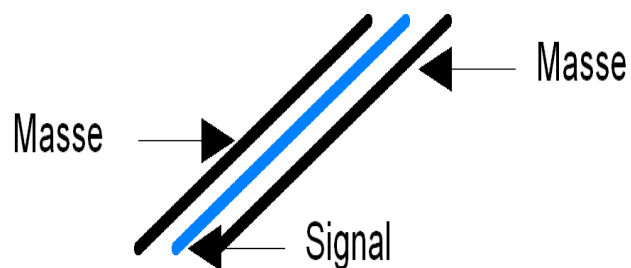


tiefere Frequenzen => Hochpassverhalten (C_2 wirkt nicht)

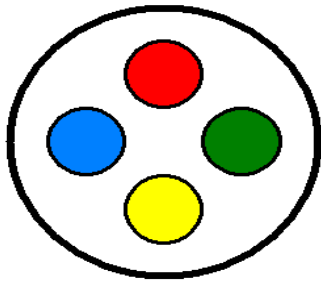
höhere Frequenzen => kapazitiver Spannungsteiler (R_2 wirkt nicht)

Gegenmaßnahmen:

- kurze Leitungslängen
- kleine Durchmesser
- große Abstände der Leiter zueinander
- kleine Dielektrizitätskonstante
- Verdrillen der Signalleiter (wenn Signale durch Drähte geführt werden)
- Bezugspotenzial auf freie Leiter legen
- Arbeitsgeschwindigkeit nur so hoch wie nötig wählen
- niederohmig abschirmen (Bleche, Gehäusebeschichtungen, GND-Flächen)
- Einbetten der Signalleiter in Masse:

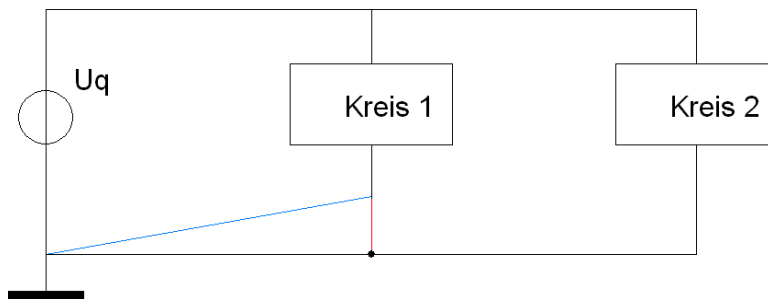


- Sternviererordnung im Kabel (wirkt wie eine abgegliche Brücke):



rot	=>	Hinleiter Kreis 1
gelb	=>	Rückleiter Kreis 1
blau	=>	Hinleiter Kreis 2
grün	=>	Rückleiter Kreis 2

- Bezugsleiter (Masse) quellseitig verbinden:



— Anbindung richtig

— Anbindung falsch

5.2.4.3 Induktive Kopplung

Durch induktive Kopplungen wird bei einer Stromänderung in Stromkreis 1 in Stromkreis 2 eine Spannung induziert. Folgende Ursachen können verantwortlich sein.

- transformatorische Kopplungen
- hohe oder schnelle Schaltströme
- Blitzeinschlag

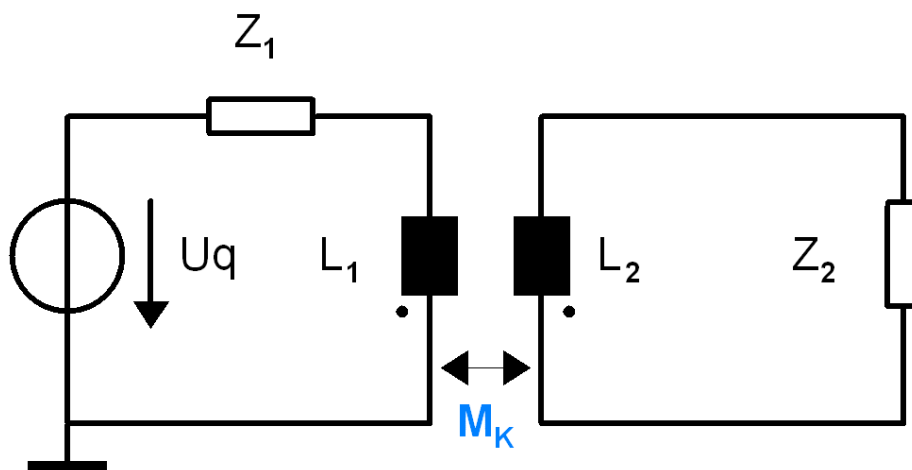
Dabei wird der Kreis 2 von dem magnetischen Fluss Φ durchsetzt. Die zugehörige Formel lautet:

$$U_{\text{stör}} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = M_k * \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Die Gegeninduktivität M_k hängt von der Anordnung der Bauteile und von der Leiterführung ab. In der folgenden Schaltung ist M_k als Größe von Spulen dargestellt.

Es gilt aber: 1mm Leiterlänge hat eine Induktivität von ca. 1 nH.

Darum ist dieses Ersatzschaltbild immer für zwei Leiter gültig.



Ersatzschaltbild für induktive Kopplung

Gegenmaßnahmen

- M_k verkleinern, d.h. Leiterlänge verkleinern
- Abstand von Signal- und Datenleitungen vergrößern
- die Fläche, die von einem Störleiter umschlossen wird, klein halten
- Flussänderungsgeschwindigkeit $\frac{d\Phi}{dt}$ durch Kurzschlusschleife herabsetzen
- Hin- und Rückleitungen in Kabeln verdrillen
- Leitungen auf Leiterplatten nicht parallel führen
- mit ferromagnetischen Materialien schirmen (Mumetall)
 - gut leitende Verbindung zwischen Schirm und Bezugspotenzial herstellen (sonst kapazitive Kopplung)

5.2.4.4 Wellenkopplung

Wenn die Wellenlänge eines Störsignals nicht wesentlich kleiner als die Leiterlänge ist, ist der Leiter elektrisch lang. Dann tritt Wellenkopplung auf.

Die Verteilung von Spannung und Strom ist auf dem Leiter nicht konstant. Es entsteht eine leitungsgebundene, fortschreitende, elektromagnetische Welle. Sie wird von einem elektromagnetischen Feld begleitet, welches auf benachbarte Leiter überkoppelt.

Die Leitung stellt für das Störsignal einen ohmschen Widerstand, den Wellewiderstand (Z_0), dar.

$$L' = \frac{L}{l}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{M_K}{C_K}}$$

$$C' = \frac{C}{l}$$

Der Wellenwiderstand (Z_K) zwischen zwei Leitern ergibt sich aus der Gegeninduktivität (M_K) und der Koppelkapazität (C_K).

$$Z_K = \sqrt{\frac{M_K}{C_K}}$$

Gegenmaßnahmen:

- kurze Leitungen
- Wellenwiderstand der Störsenke niedrig auslegen (wenn dadurch das Nutzsignal nicht beeinträchtigt wird)
- bei symmetrischen Signalen die Leitungen verdrillen
- räumliche Trennung von Störquelle und Störsenke
- Störquelle und / oder Störsenke schirmen

5.2.4.5 Strahlungskopplung

Jede elektrische Einrichtung, die elektrische oder magnetische Energie aufnehmen kann, ist bei der Strahlungskopplung eine Störsenke. Störquellen sind unter anderem:

- HF-Sender
- Blitze

Während in den vorigen Kapiteln elektrische und magnetische Störungen als eigenständige Probleme betrachtet wurden, was im Nahfeld zulässig ist, treten im Fernfeld beide Störungen in Abhängigkeit voneinander auf.

Der Wellenwiderstand im Fernfeld ergibt sich zu:

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit entspricht der Lichtgeschwindigkeit.

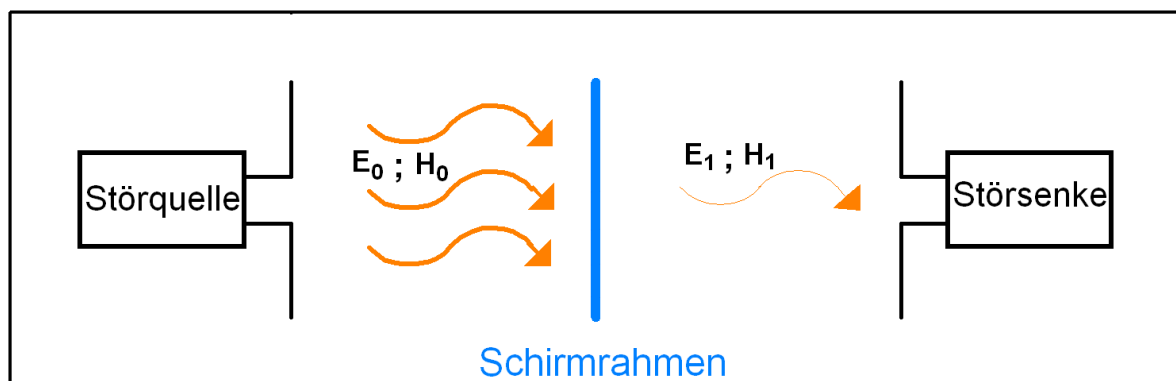
Daraus ergibt sich die Wellenlänge:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Gegenmaßnahmen:

- niedrige Wellenwiderstände von Sender und Empfänger
- Verdrillen der Leitungen
- Leiterlänge $\ll \frac{\lambda}{4}$,
- Schirmen:
 - im niederfrequenten Bereich: ferromagnetische Materialien
 - im hochfrequenten Bereich: unmagnetische Schirmmaterialien

Prinzip der Schirmdämpfung:

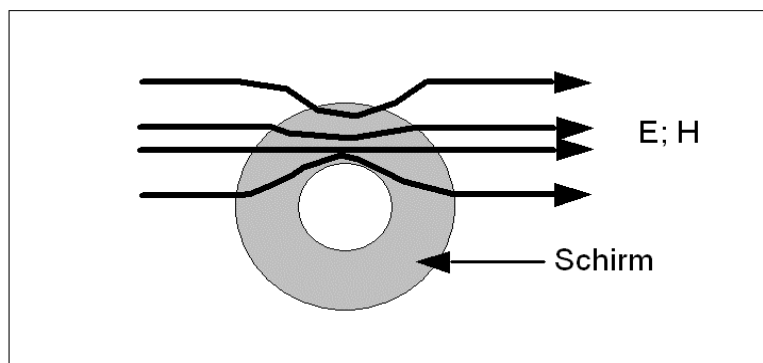


5.2.5 Gehäuseaufbau

Bei einigen elektrischen oder elektronischen Betriebsmitteln kann es erforderlich sein, dass

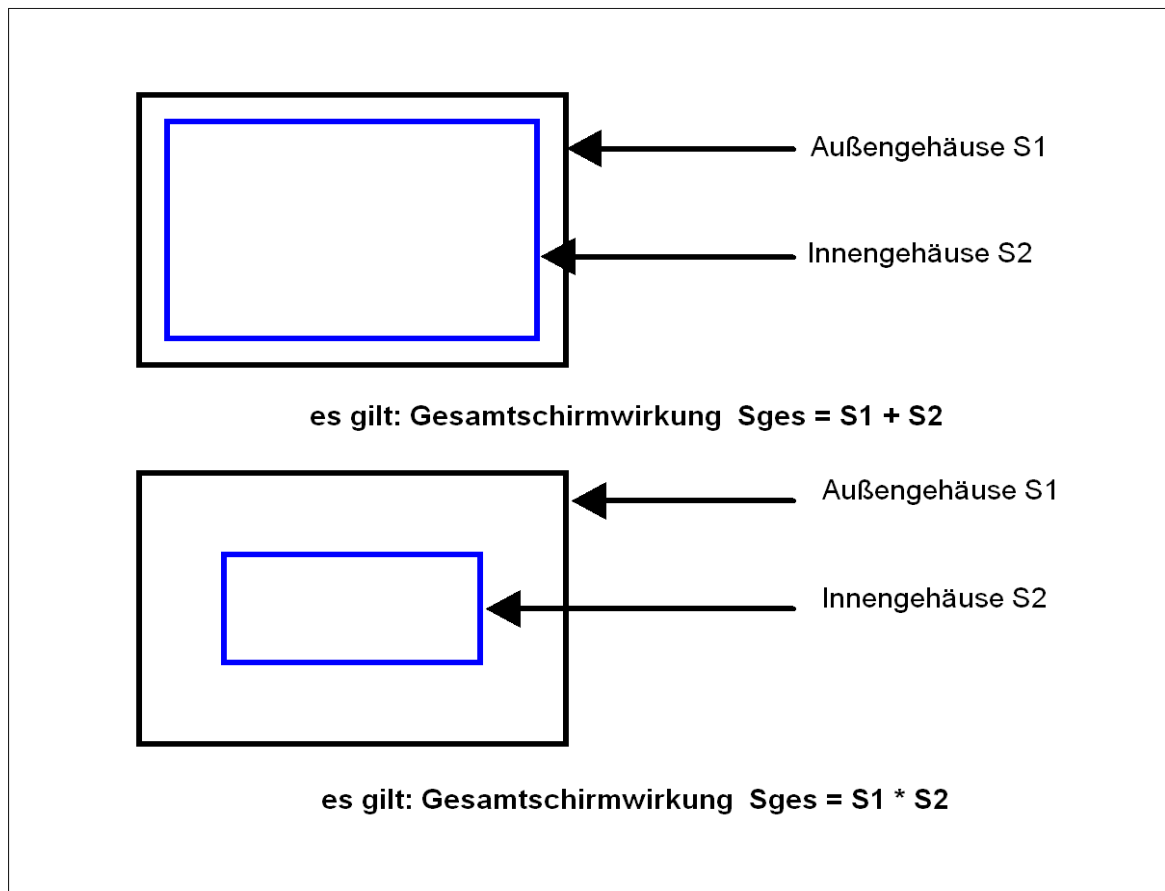
- das gesamte Gerät vor elektromagnetischen Feldern geschützt wird,
- eine besonders empfindliche Umgebung gegen die Beeinflussung durch das Betriebsmittel geschützt wird.

Das Prinzip, wie auch bei der Schirmung von Teilkomponenten, funktioniert, weil die elektrischen oder / und magnetischen Wellen den Weg des geringsten Widerstandes gehen. Darum ist es wichtig, ein für die jeweiligen Wellen niederohmiges Schirmmaterial zu wählen.



Beeinflussung der Felder durch Schirmung

In diesen Fällen muss ein elektrisch oder ferromagnetisch leitendes Gehäuse gewählt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Schirmwirkung mit wachsender Wandstärke steigt. Wenn teure und schwere Gehäuse vermieden werden sollen, können Doppelgehäuse verwendet werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass das innere Gehäuse nur den halben Durchmesser des äußeren Gehäuses haben darf.



Aufbau eines Doppelgehäuses

Des Weiteren ist zu beachten:

Schirmung funktioniert nur da, wo Strom fließen kann!

Dabei ergibt sich folgendes Problem: Ein Gehäuse ist nie zu 100% aus einem Stück gefertigt. Diverse Gehäusespalten und -öffnungen müssen abgedichtet werden. Denn nach dem Babinet'schen Prinzip wirkt ein von Metall umschlossener Luftspalt genauso wie ein Metallstab mit gleicher Länge.

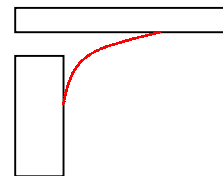
Für die Abdichtung von Gehäusespalten gibt es folgende Möglichkeiten:

1.)

Gehäusespalten verschweißen oder verlöten (optimal)

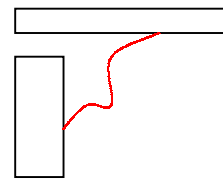
2.)

EMV-Klebebänder
(Klebebänder mit Metallanteilen)



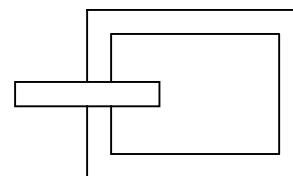
3.)

Kontaktfederleisten



Problem: Kabel

Lösung:

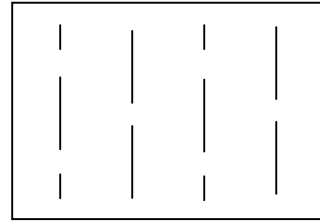


- Durchführungsfilter
- metallisierte Kabel – Durchführung
- Metallschutzschlauch (mit Gehäuse verbunden)

Problem: Lüftungen

Lösung: Wabengitter (ggf. mehrfach versetzt)

$$\text{Durchmesser} \leq \frac{\lambda}{2o}$$



Problem: Sichtscheiben

Lösung:

- Schirmgewebe
- leitfähig beschichten

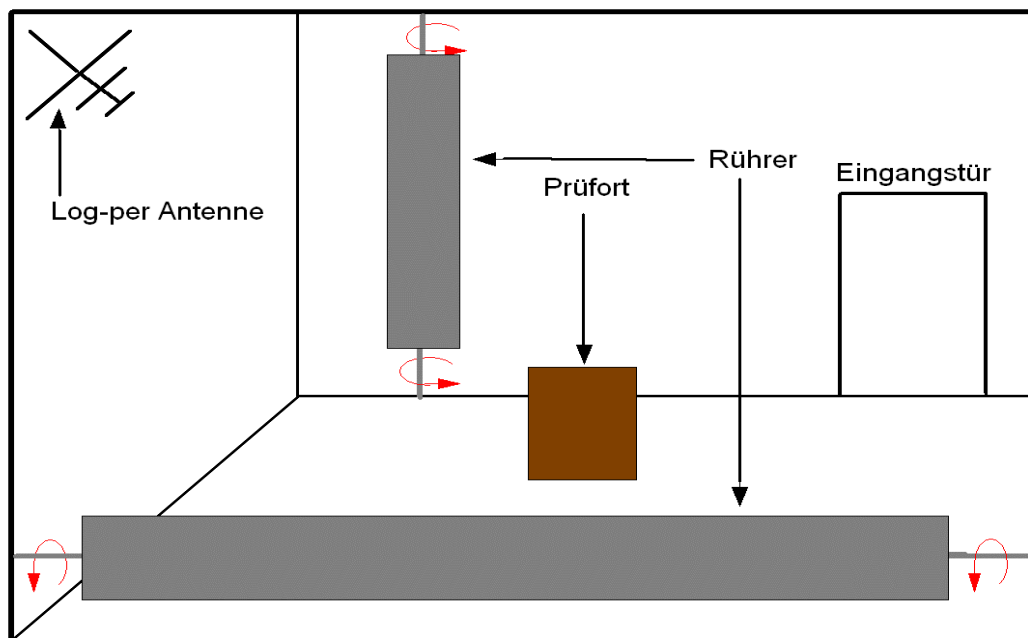
6 EMV-Equipment

6.1 Antennen

Für die Ersatzantennenmethode und Referenzstrahlermethode werden folgende Antennen verwendet:

- Log P (logarithmisch periodische Antenne) für den Frequenzbereich 300MHz–1GHz
- Horn (Hornantenne) für den Frequenzbereich 1GHz–3GHz

6.2 Reverberation Chamber (Modenverwirbelungskammer)



Prinzip:

Modenverwirbelungskammern werden für Störfestigkeitsprüfungen genutzt.

Mit einer Antenne, die für den Frequenzbereich vorgesehen ist, wird in den Raum gestrahlt, es bilden sich dort Muster stehender Wellen aus. Wird die Frequenz erhöht, dann bilden sich mehrere Moden bei niedrigen Frequenzen, gibt es eine entsprechend kleinere Anzahl von Moden.

Durch Einbringen einer Stellwand hat man eine andere Modenverteilung im Raum, weil die Randbedingung für das elektromagnetische Feld sich geändert hat.

Die angebrachten metallischen Rührer (Stirrer) bewirken durch Rotation, dass es eine andere Energieverteilung im Raum gibt, und zwar eine sich ständig ändernde.

Durch die Rotation der Rührer ergibt sich ein quasi homogenes Feld.

Vorteil:

- schon bei kleinen Leistungen erzielt man hohe Feldstärken
- auf Absorber kann man verzichten

Nachteil:

- lange Prüfdauer aufgrund der notwendigen Integrationszeit erforderlich
- fehlender Feldgradient

6.3 TEM-Zelle



Abbildung 1: TEM-Zelle

Streifenleiter werden benutzt, um Feldsonden zu kalibrieren oder hohe Feldstärken mit geringem Leistungsaufwand zu erzielen.

Es handelt sich dabei um Leitungssysteme, die aufgrund ihrer mechanischen Beschaffenheit zulassen, dass das sich zwischen Innen- und Außenleiter aufbauende elektrische Feld bzw. das sich um den Innenleiter herumbildende magnetische Feld für Prüfzwecke verwendet werden kann.

Die Impedanz dieses Systems berechnet sich aus $\sqrt{L/C}$ diese Größen ergeben sich aus den festgelegten mechanischen Abmessungen der Zelle.

Probleme sind im Übergangsbereich vom einspeisenden Kabel zum „geraden Bereich“ der Zelle sowie im Übergang von diesem Bereich zur einer Koaxialen Terminierung zu erwarten.

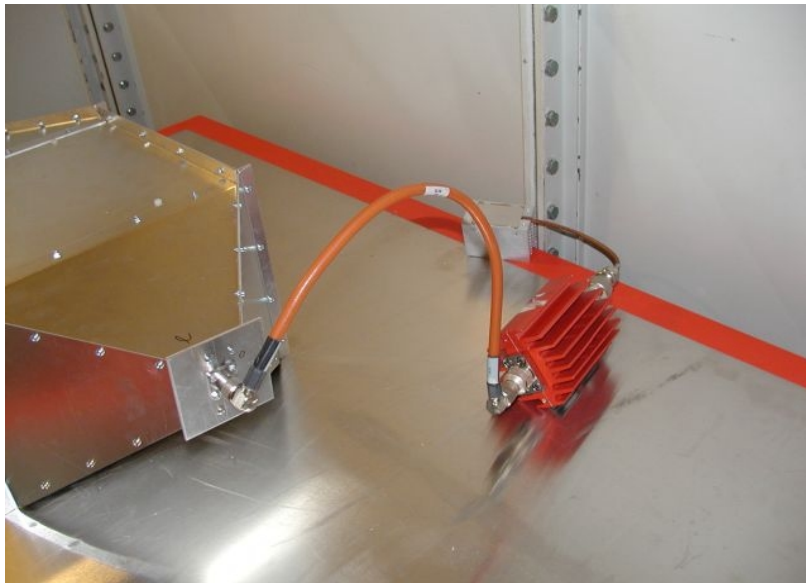


Abbildung 2: 50-Ω-Abschlusswiderstand

Auf mit ihrer Nennimpedanz terminierte Leitungen erfolgt der Energiefluss immer nur in einer Richtung, sodass sich keine stehenden Wellen ausbilden (keine Reflexionen), demzufolge ist die Feldverteilung homogen (theoretisch).

In der Praxis gibt es Abweichungen von der gewünschten Nennimpedanz von 50Ω.

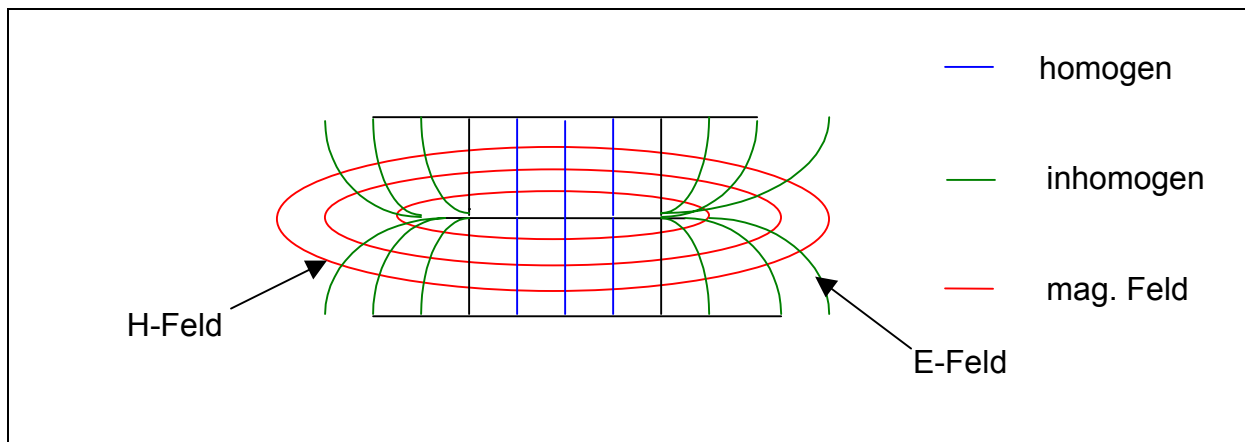
In dieser Zelle stehen die E- und H-Felder senkrecht zueinander.

In der Zelle können sich Halbwellenresonanzen ausbilden, die den nutzbaren Frequenzbereich einschränken.

Frequenzbereich und Prüflingsgröße stehen antiproportional zueinander, sodass realisierte Zellen stets einen Kompromiss darstellen.

Eine Ausnahme bildet die so genannte „GTEM-Zelle“ (Handelsname) mit divergierenden Flächen und hybrider Terminierung.

Darstellung der H-Felder und E-Felder in einer TEM-Zelle im Querschnitt



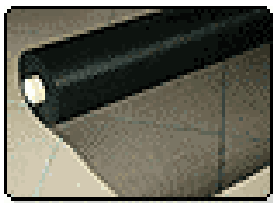
6.4 Metallisiertes Gewebe

6.4.1 Gewebe mit unterschiedlichen Dämpfungen

Im folgendem Text wird das Trägermaterial wie üblich Gewebe genannt, unabhängig von der tatsächlichen Herstellungsart (eigentliches Gewebe mit Leinenstruktur oder aus Fasern verpresstes Vlies).

Die von Herstellern angegebenen Dämpfungswerte werden mit Labormethoden ermittelt und lassen sich beim tatsächlichen Einsatz nicht immer reproduzieren.

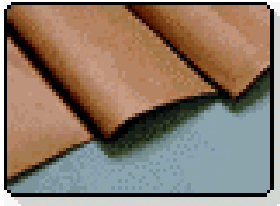
Hier einige Gewebe mit ihren Dämpfungen:



Gewebe mit 20dB Dämpfung (1–10 GHz)



Gewebe mit 50dB Dämpfung (1–10 GHz)



Gewebe mit über 100dB Dämpfung (1–10 GHz)

Es handelt sich dabei um Herstellerangaben.

Die nächste Abbildung zeigt Angaben über das Gewebe, welches bei der Diplomarbeit geprüft wird.

Die Angaben werden vom Hersteller (Schirmung 2000) gemacht.



Material mit Vliesstruktur

Substrat	Polyamid Spunbond Vlies, chemisch gebunden
Gewicht	40 g/m ²
Dicke	0,15 mm
Reißfestigkeit	> 150%
Schrumpfung	< 0,9%
Beschichtung	Kupfer, Nickel, Phosphor
Halogenanteil	halogenfrei
Schutzschicht	Korrosionsschutzschicht gegen Umwelteinflüsse
Flächenwiderstand	< 5,5 mΩ
Schirmdämpfung	bis 120dB *

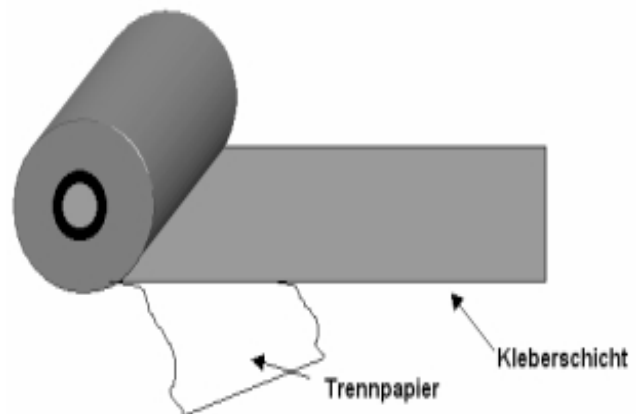
*Frequenz zu der Dämpfung wird nicht angegeben.

Natürlich wird bei dieser Diplomarbeit nach Messung mit verschiedenen Methoden die Schirmung in dB im Frequenzbereich von 2MHz–3GHz festgelegt.

Einsatzmöglichkeiten:

- Raumschirmung / Auskleidung von Räumen und Anlagen
- EMV-Schutzanzüge zum Schutz vor EM-Strahlung

EMV-Klebeband



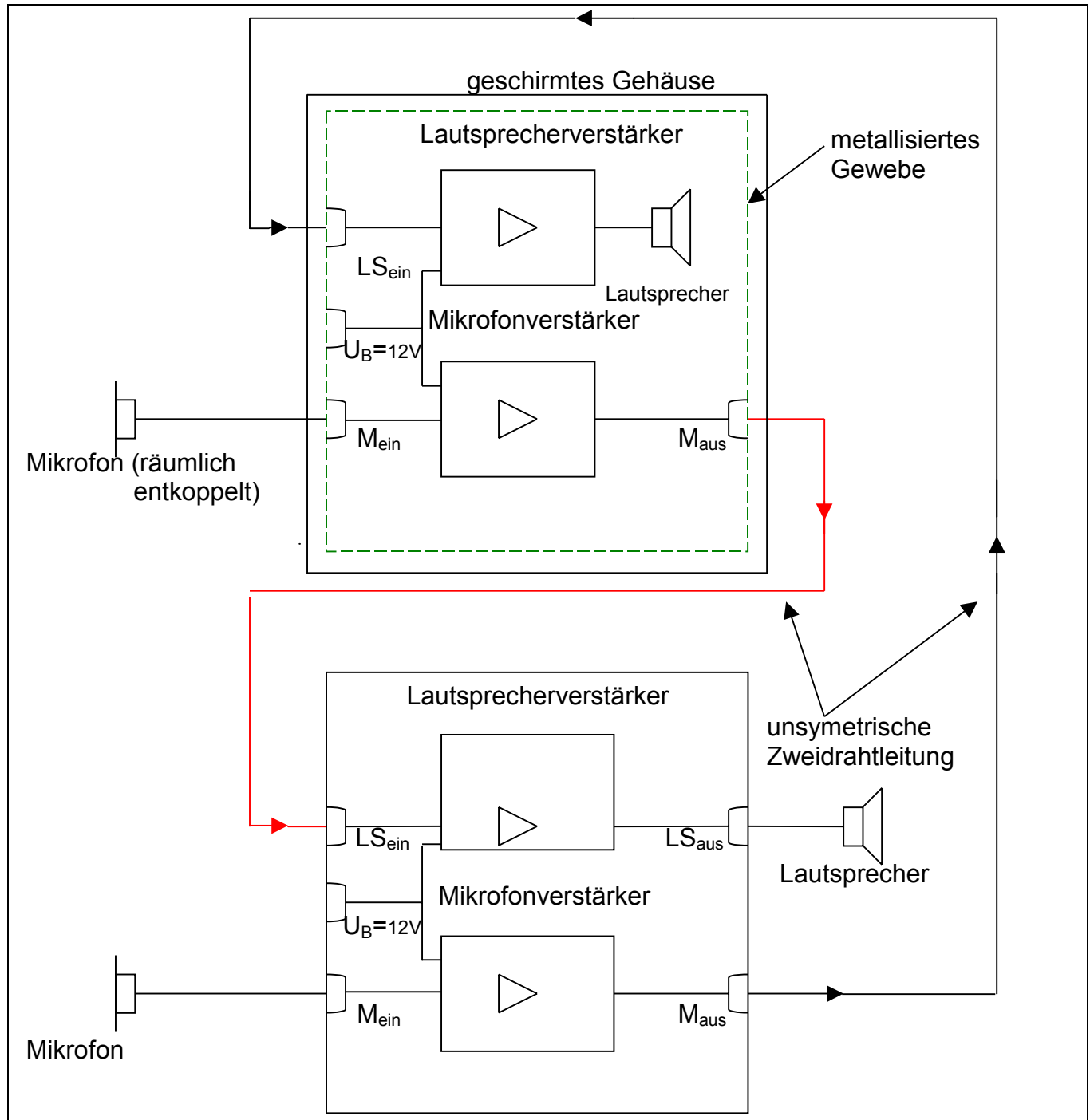
Das elektrisch leitfähige Klebeband der neuen Generation, mit einem stromtragfähigen neu entwickelten Klebstoff.

Einsatzmöglichkeiten:

- Masseanbindung
- Korrosionsschutzgrundlage
- Überbrückung von Gehäuseöffnungen, um HF- Abstrahlung zu verhindern
- Kabelschirmung

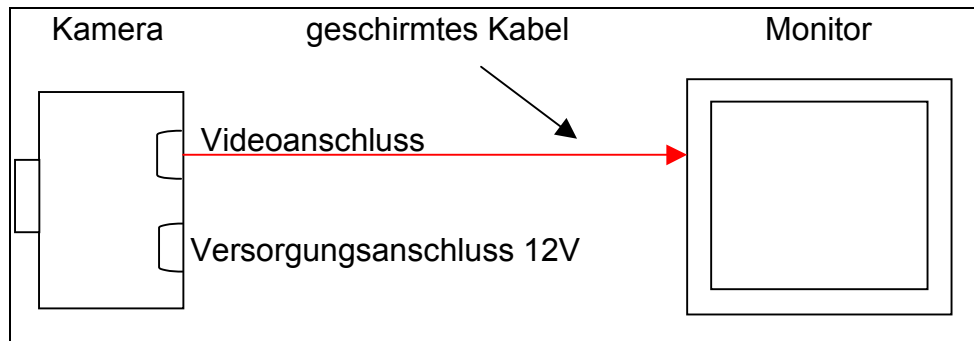
7 Objektbeschreibung

7.1 Bidirektionale Audio-Verbindung



LS_{ein} = Lautsprecherverstärker (Eingang)
 LS_{aus} = Lautsprecherverstärker (Ausgang)
 M_{ein} = Mikrofonverstärker (Eingang)
 M_{aus} = Mikrofonverstärker (Ausgang)
 U_B = Versorgungsspannung

7.2 Unidirektionale Video-Verbindung



8 Vorwort zu den Messungen

Die folgenden Messungen dienen der Ermittlung der in diesem Labor maximal erreichbaren Feldstärken, der Erfindlichkeitsschwelle der zu untersuchenden analogen Einheiten und der Schirmwirkung des vorgesehenen Materials.

9 Messung der maximalen Feldstärke (2MHz–1GHz)

Zur Ermittlung der maximalen Feldstärke E ist folgender Messaufbau in einem Schirmraum vorbereitet worden, siehe Abbildung 3 nach EN 61000-4-20.

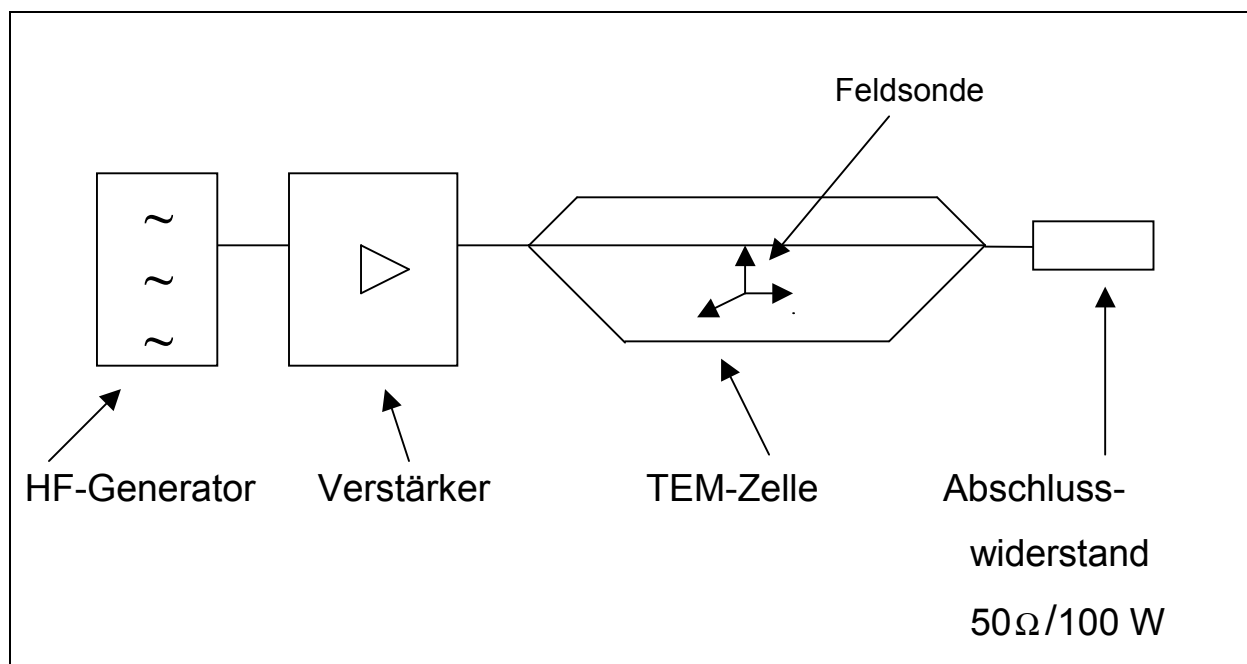


Abbildung 3: Messaufbau

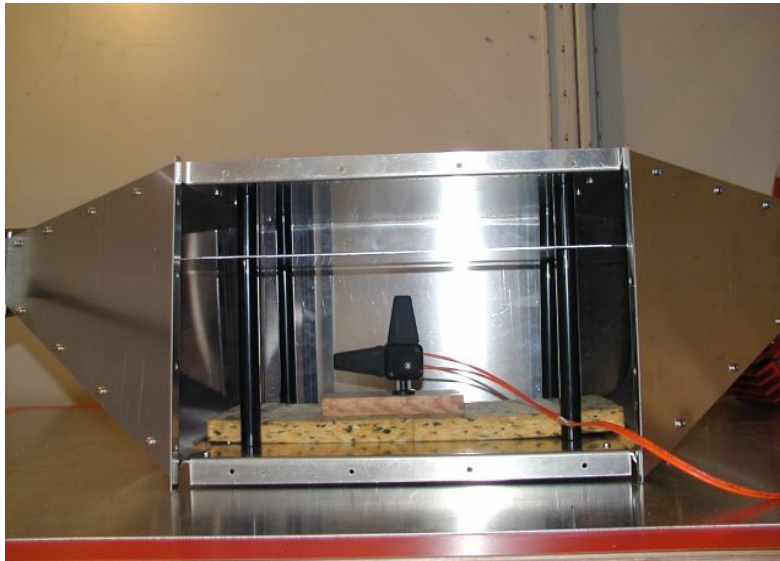


Abbildung 4: E-Feldsonde in der TEM-Zelle

Um die Feldstärke zu messen, wird eine dreidimensional messende E-Feldsonde mit optischer Übertragung benutzt.

Die Übertragung der Feldstärkenmessung wird nur leicht beeinflusst, da die Übertragung mit einem Lichtwellenleiter (siehe Abbildung 4 (rotes Kabel)) durchgeführt wird. Die Auswertung erfolgt am PC mit dazugehöriger Software.

Verstärker werden benutzt, um die hohen Feldstärken zu realisieren.

Dafür werden drei unterschiedliche Verstärker benutzt, die jeweils einen Bereich des Frequenzspektrums abdecken.

Verstärker 1 2MHz–250MHz

Verstärker 2 200MHz–400MHz

Verstärker 3 400MHz–1GHz

9.1 Messergebnisse

9.1.1 Leistungsverläufe der Verstärker

9.1.1.1 Leistungsverlauf des Verstärkers 1

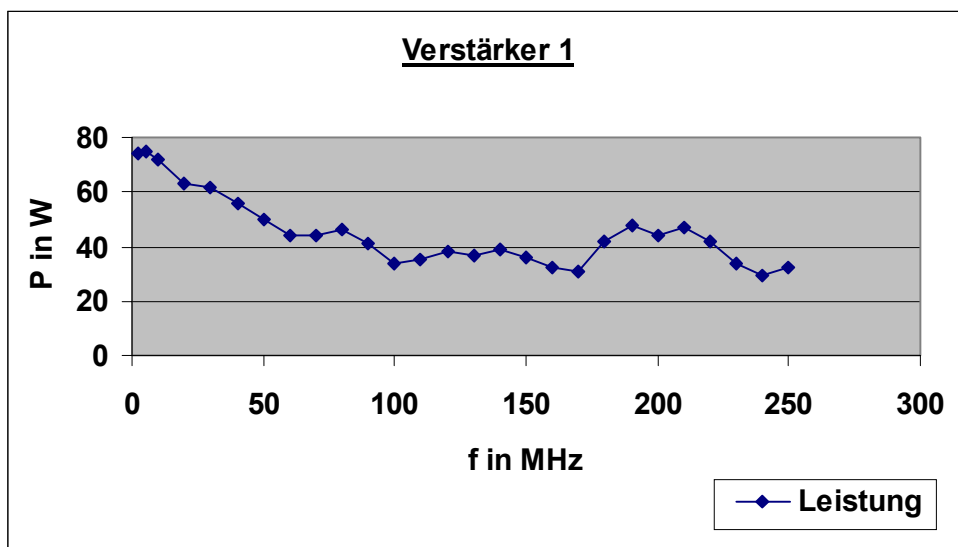


Abbildung 5: Leistungsverlauf im Bereich 2MHz–250MHz

9.1.1.2 Leistungsverlauf des Verstärkers 2

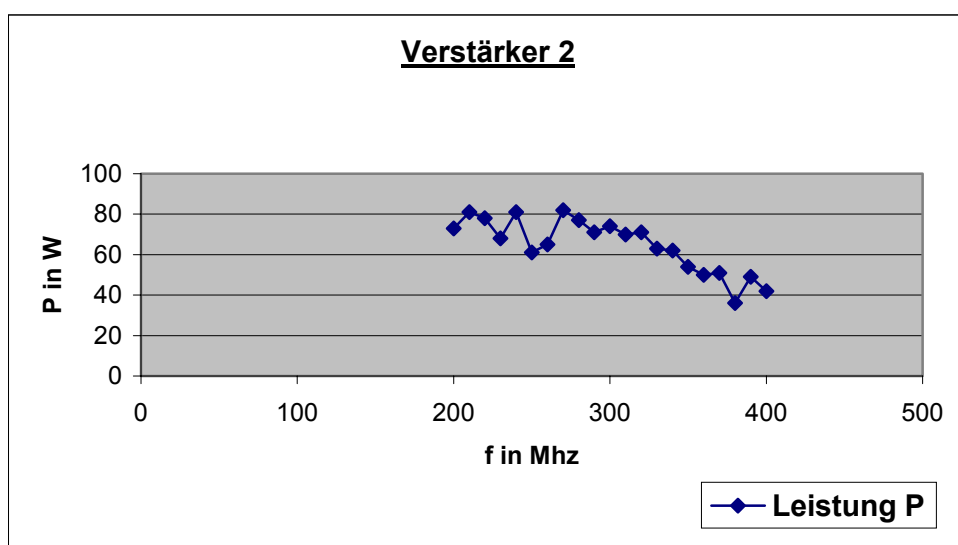


Abbildung 6: Leistungsverlauf im Bereich 200MHz–400MHz
Diplomarbeit

9.1.1.3 Leistungsverlauf des Verstärkers 3

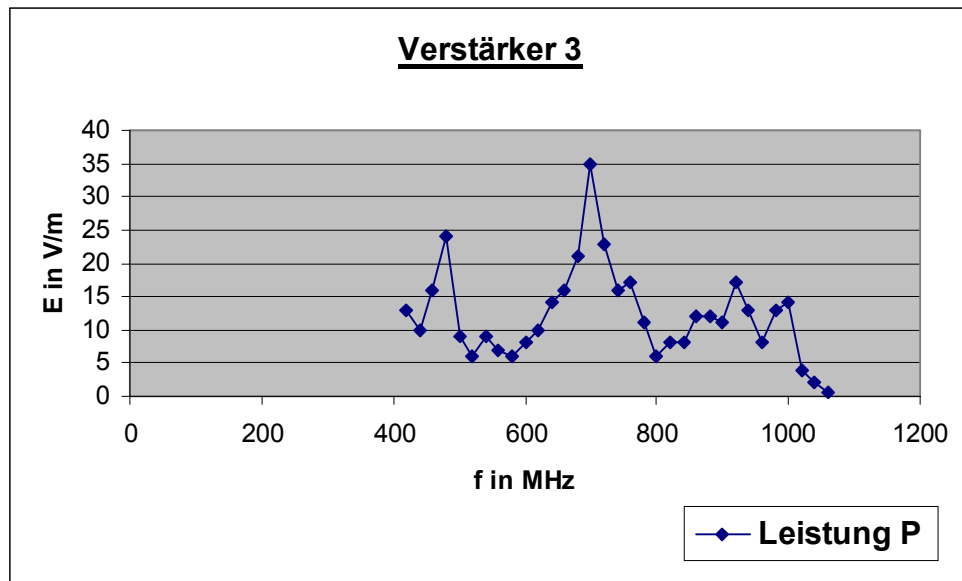


Abbildung 7: Leistungsverlauf im Bereich 400MHz–1GHz

9.1.2 Feldstärkenverläufe der Verstärker

9.1.2.1 Feldstärkenverlauf des Verstärkers 1

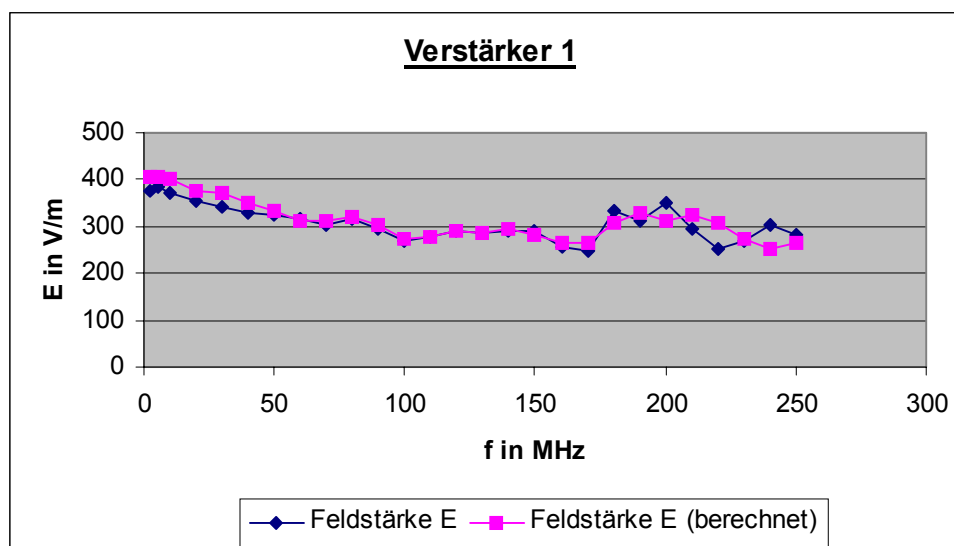


Abbildung 8: Feldstärkenverlauf im Bereich 2MHz–250MHz

9.1.2.2 Feldstärkenverlauf des Verstärkers 2

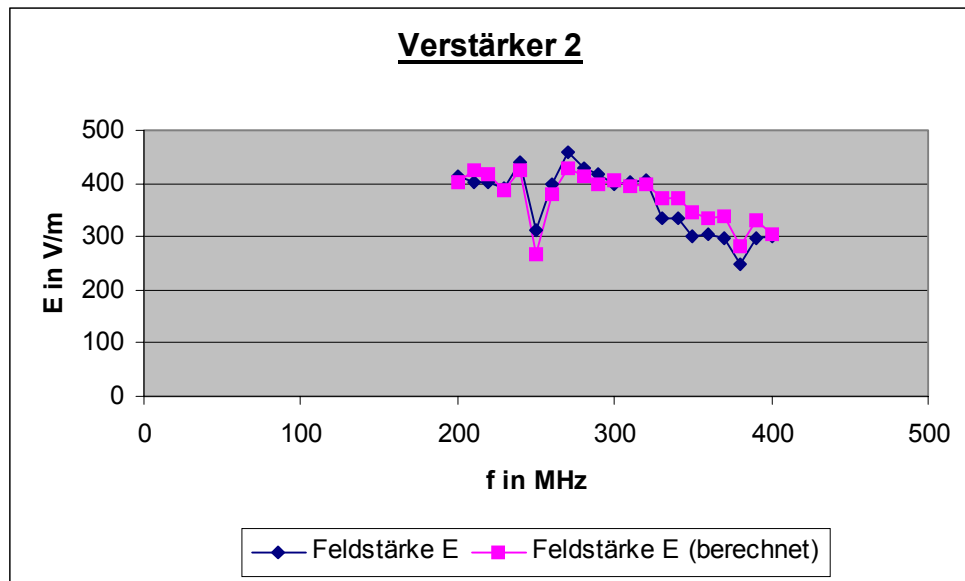


Abbildung 9: Feldstärkenverlauf im Bereich 200MHz–400MHz

9.1.2.3 Feldstärkenverlauf des Verstärkers 3

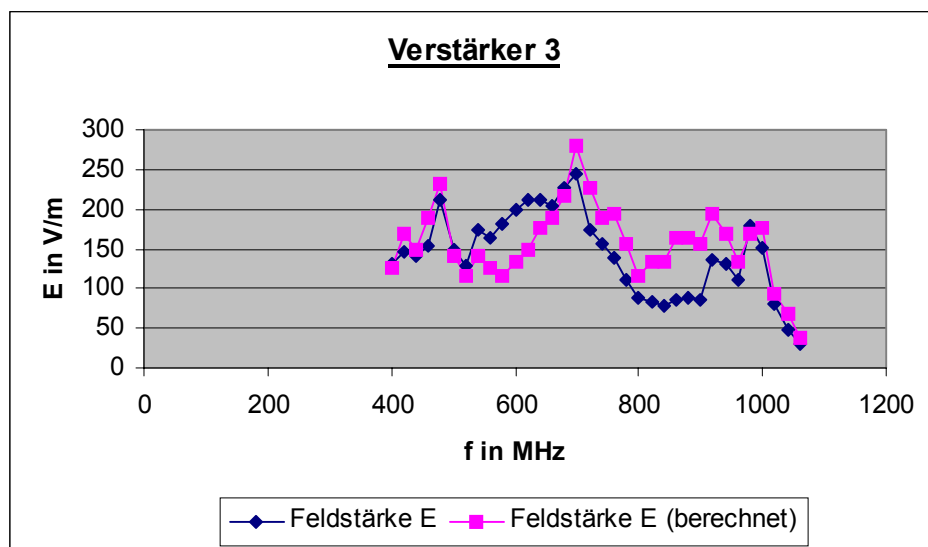


Abbildung 10: Feldstärkenverlauf im Bereich 400MHz–1GHz

9.1.2.4 Gesamtfeldstärkeverlauf der Verstärker

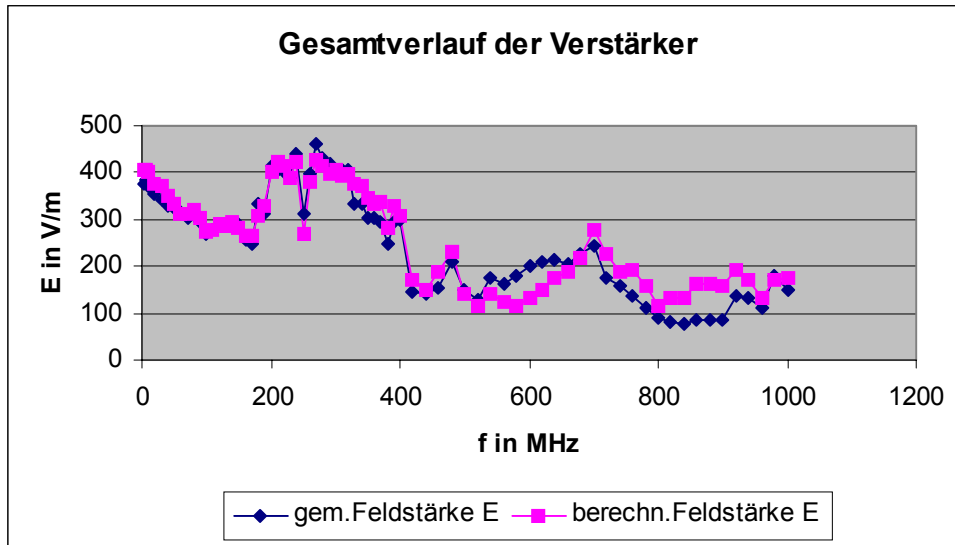


Abbildung 11: Feldstärkengesamtverlaufverlauf 2MHz–1GHz

9.1.2.5 Berechnung der maximalen Feldstärke bei 270MHz

$$U = \sqrt{P \cdot R} \quad R = 50\Omega \quad , \text{ da Abschlusswiderstand } (50\Omega)$$

$$U = \sqrt{82W \cdot 50\Omega} = \underline{\underline{64,03V}}$$

Aufgrund des Plattenabstands von 0,15m resultiert die angelegte Spannung normiert auf 1m in dem in der Tabelle dargestellten Betrag der Feldstärke (berechnete Feldstärke).

$$E = U \cdot \frac{1,00}{0,15m}$$

$$E = 64,03V \cdot \frac{1,00}{0,15m} = \underline{\underline{426,87V / m}}$$

Zur gemessenen Feldstärke verweise ich an dieser Stelle auf die Anlage Tabelle10/11/12,

9.1.2.6 Auswertung der maximalen Feldstärke

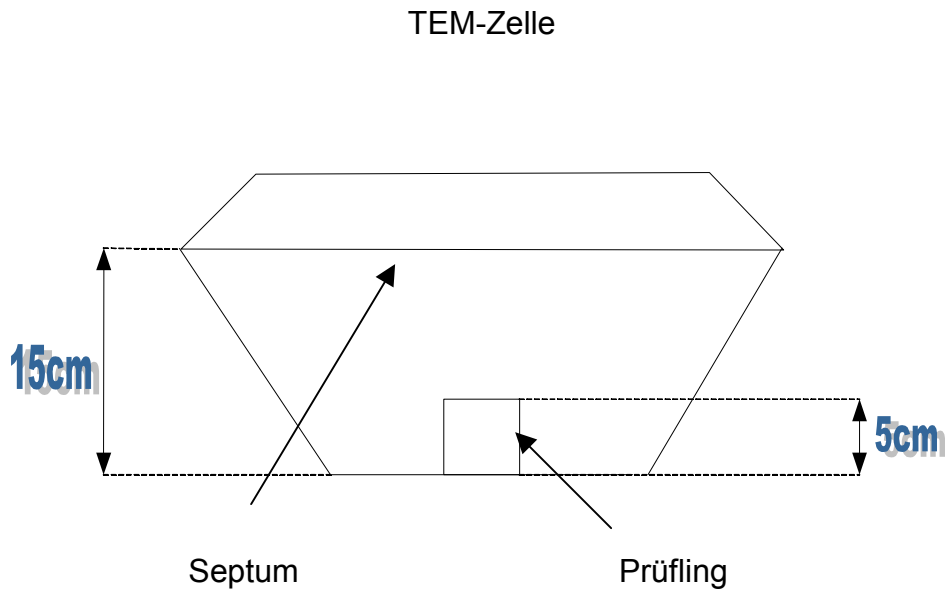


Abbildung 12: Maximale Prüflingsgröße bei der TEM-Zelle

Die Messung wird ständig mit dem gleichen Messaufbau durchgeführt, unter etwa konstanten Bedingungen.

Dadurch dass die TEM-Zelle zur einer Seite geöffnet ist, kommt es zu Feldverzerrungen.

Diese Verzerrungen sind aber unkritisch, da sämtliche Messungen unter gleichen Bedingungen durchgeführt werden.

Die gemessene maximale Feldstärke E liegt bei 448V/m, die berechnete Feldstärke liegt bei 426,87V/m. Beide Feldstärken wurden bei 270MHz ermittelt (siehe Tabelle 11: Verstärker 2).

Die gemessene und berechnete Feldstärke dient zur Plausibilitätskontrolle.

An vielen Stellen der Diagramme liegen die gemessenen und berechneten Feldstärken nah zusammen.

In der TEM-Zelle gibt es Schwankungen zwischen den Feldstärken, zur Seite hin nimmt die Feldstärke ab, im Zentrum auf einer etwa postkartengroßen Fläche habe ich während meines Praktikums eine Genauigkeit von 1dB gemessen.

Nach Norm EN 61000-4-3 bei Bestrahlungsprüfplätzen ist eine Erhöhung um 6dB zulässig.

Aufgrund der mit der Frequenz variierenden Ausgangsleistung der Verstärker erhalten wir die schwankenden Feldstärkewerte im letzten Bereich der Diagramme (siehe Abbildung 11).

Ein weiterer Grund für die Schwankungen ist, dass nur Prüflinge mit maximaler Größe von 5cm geprüft werden sollen, da die Größe der Feldsonde 8,5cm beträgt wird der Plattenabstand verändert, was zu Inhomogenitäten und möglichen Reflexionen führt.

Die maximale Prüflingsgröße bei Streifenleitern ist 1/3 des Plattenabstands (Septum) (siehe Abbildung 12).

Es gibt im Labor noch einen größeren Streifenleiter mit einem Plattenabstand von 30cm, maximale Prüflingsgröße 10cm.

Der Nachteil ist, dass keine hohen Feldstärken erreicht werden können.

Der Frequenzbereich liegt bei 2MHz–500MHz, was für unsere Messungen nicht ausreicht, da wir im Bereich von 2MHz–1GHz messen.

Der verwendete Richtkoppler hat eine nominelle Koppeldämpfung von 40dB, die tatsächliche Koppeldämpfung variiert aber frequenzabhängig zwischen 38,9dB und 41,3dB (siehe Anhang Seite 129), sodass der abgelesene Betrag der Leistung nicht mit dem tatsächlichen übereinstimmt.

10 Videopfad (Kamera im Feld, visuelle Überprüfung einer Testvorlage)

10.1 Empfindlichkeitsprüfung

Der Messaufbau ist der Abbildung 3 zu entnehmen.

Zunächst wird Kamera 1 in den Streifenleiter gelegt und unter der Vorlage eines Testbildes nach Empfindlichkeit getestet.

Die Kamera wird an ihrem Video-Ausgang durch eine geschirmte Leitung und durch einem N-Stecker an einem außerhalb der Kabine stehenden Fernseher angeschlossen.

N-Stecker bewirkt, dass keine Hochfrequenz ausdringt und den Fernseher beeinflusst.

Somit ist sichergestellt, dass nur die Kamera getestet wird.

Die Empfindlichkeit wird folgendermaßen aufgenommen:

Der Frequenzbereich wird durchlaufen.

Die Verstärker werden mit dem für Maximalaussteuerung notwendigen Pegel angesteuert (Verstärker 1 und 3: 0dBm; Verstärker 2: 10dBm).

Treten Störungen wird der Ansteuerpegel bis zum verschwinden der Störungen abgesenkt. Auf diese Art wird der Empfindlichkeitsverlauf der Baugruppen ermittelt.



Abbildung 13: Kamera-Vorderansicht

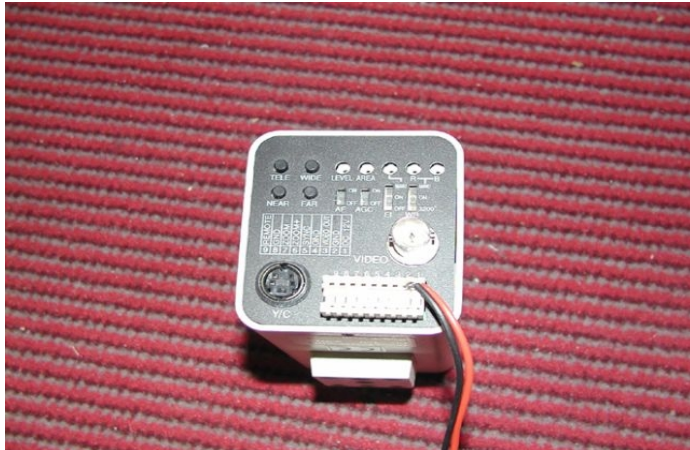


Abbildung 14: Kamera-Hinteransicht



Abbildung 15: Kamera-Seitenansicht

Nähere Infos zur Kamera 1 siehe Anlage.

10.2 Auswertung zur Empfindlichkeit der Kamera 1

Es gibt im gesamten Frequenzbereich von 2MHz–1GHz keine nennenswerte Beeinflussung des Bildes durch die hohen Feldstärken.

Offensichtlich ist die Abschirmung der Kameragehäuse so stark, dass die Feldstärken bis zu $E = 480\text{V/m}$ dem Kamerabild nichts ausmachen.

Da die Kamera nicht beeinflusst wird, ist sie für meine Messungen nicht geeignet, weil das Gehäuse der Kamera schon ausreicht, um Bildbeeinflussungen zu vermeiden. Es erübrigt sich die Verwendung des Gehäuses mit dem metallisierten Gewebe.

Aus dem Grund wird eine zweite Kamera benutzt.

10.3 Auswertung der Empfindlichkeit der Kamera 2

Messaufbau siehe Abbildung 3

Es wird die gleiche Messung wie bei Kamera 1 durchgeführt.



Abbildung 16: Kamera 2-Vorderansicht

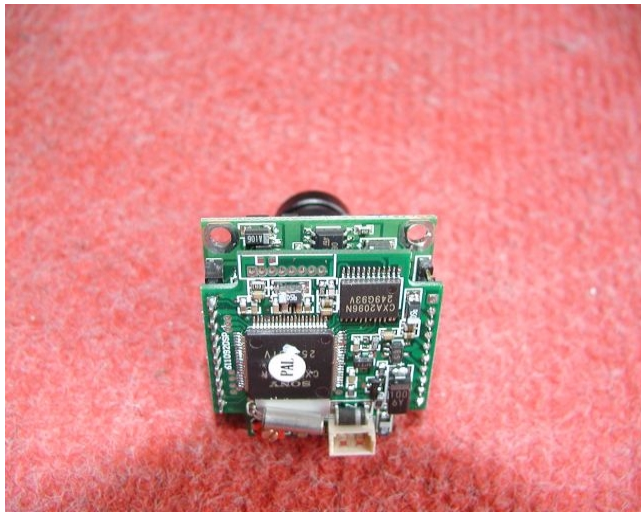


Abbildung 17: Kamera 2-Hinteransicht



Abbildung 18: Kamera 2-Seitenansicht

Nähere Infos zur Kamera 2 siehe Anlage

Da die Kamera kein Stativ hat, wird provisorisch ein Kunststoffständer für die Kamera hergestellt.



Abbildung 19: Kamera am Kunststoffständer montiert Vorderansicht

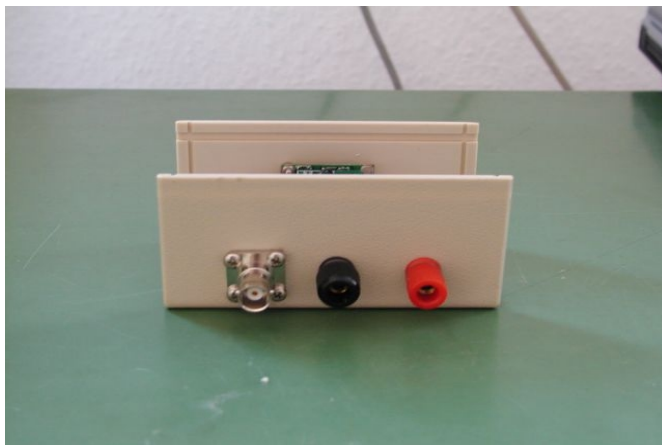


Abbildung 20: Kameraständer-Hinteransicht

In der Hinteransicht des Ständer sieht man die angebrachte Versorgungsstecker ((schwarz/rot) rechts und BNC-Stecker Video links).

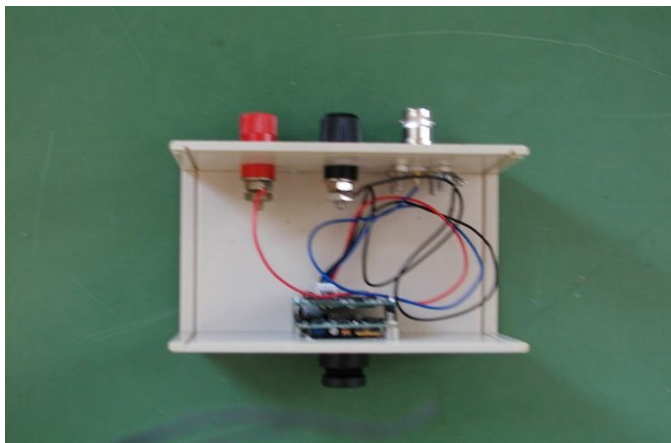


Abbildung 21: Kamera mit Kunststoffständer-Draufsicht

Die Kamera 2 ist für die Messung bestens geeignet, da sie kein Gehäuse besitzt und an allen Seiten geöffnet ist.

Man sieht an Abbildung 17 die Platine mit den Bauelementen, die leicht durch Felder zu beeinflussen ist.

10.3.1 Empfindlichkeitsprüfung

Ablauf siehe oben

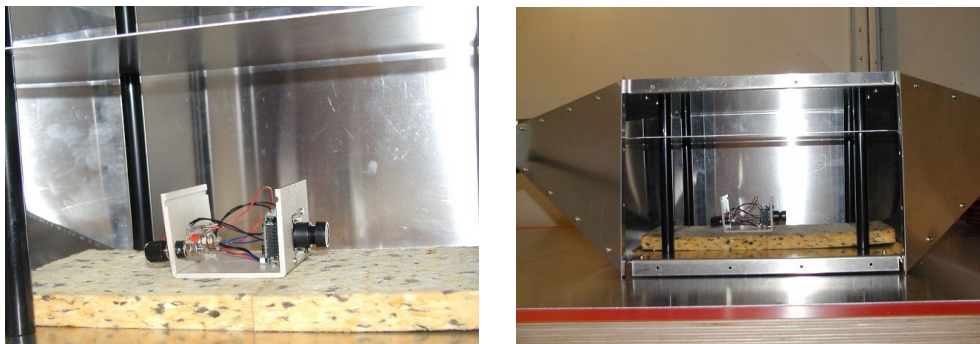


Abbildung 22: Kamera 2 im Streifenleiter

10.3.2 Bildbeeinflussung

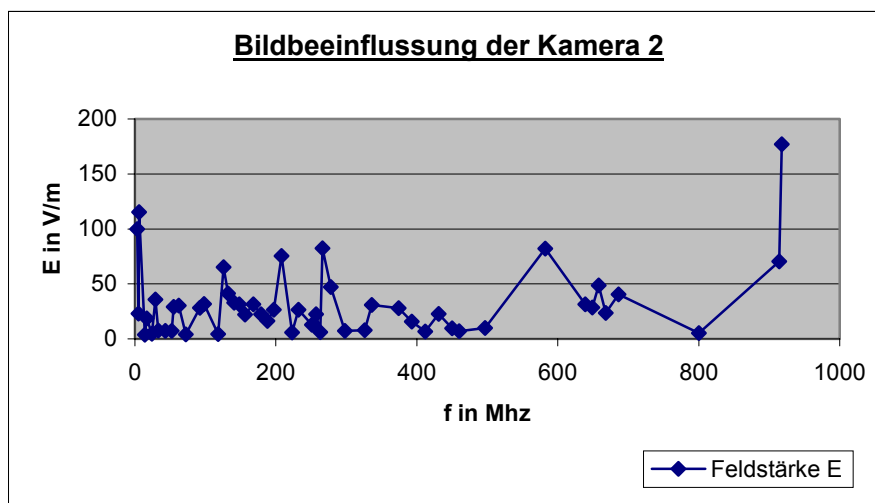


Abbildung 23: Verlauf der Empfindlichkeit der Kamera

10.3.3 Aufnahme der maximalen Bildstörungen

Abbildung 24 zeigt das unbeeinflusste Testbild.



Abbildung 24: Testbild ohne Störung



Abbildung 25: Testbildstörung bei 17,3MHz



Abbildung 26: Testbildstörung bei 98,3MHz



Abbildung 27: Testbildstörung bei 156MHz



Abbildung 28: Testbildstörung bei 257MHz



Abbildung 29: Testbildstörung bei 374MHz

Auf eine Entstörung der Kamera 2 wurde verzichtet, da keine Schaltunterlagen verfügbar waren und die geringen Abmessungen der SMD-Bauteile einen Eingriff nicht ermöglicht haben.

11 Audiopfad (Störabstand)

11.1 Festlegung des Störabstands des Lautsprecherverstärkers

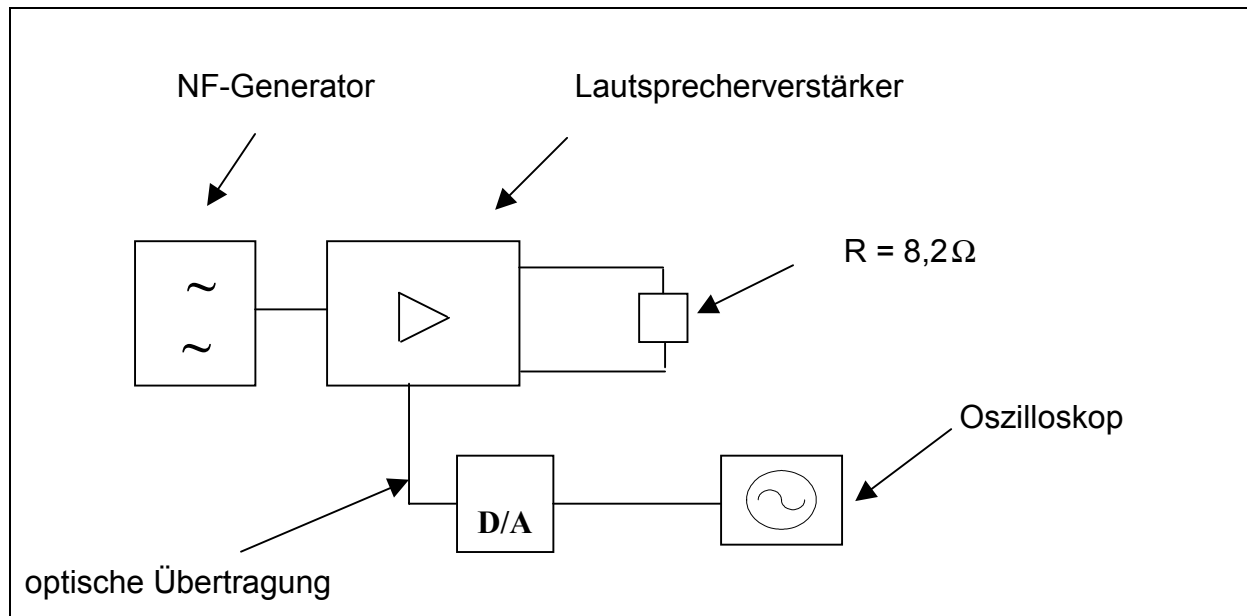


Abbildung 30: Messaufbau



Abbildung 31: Lautsprecherverstärker

Der Verstärker erschien von seinen Spezifikationen her als gut geeignet für den Einsatz.

Es ist ein als Bausatz verfügbarer Kleinleistungsverstärker.

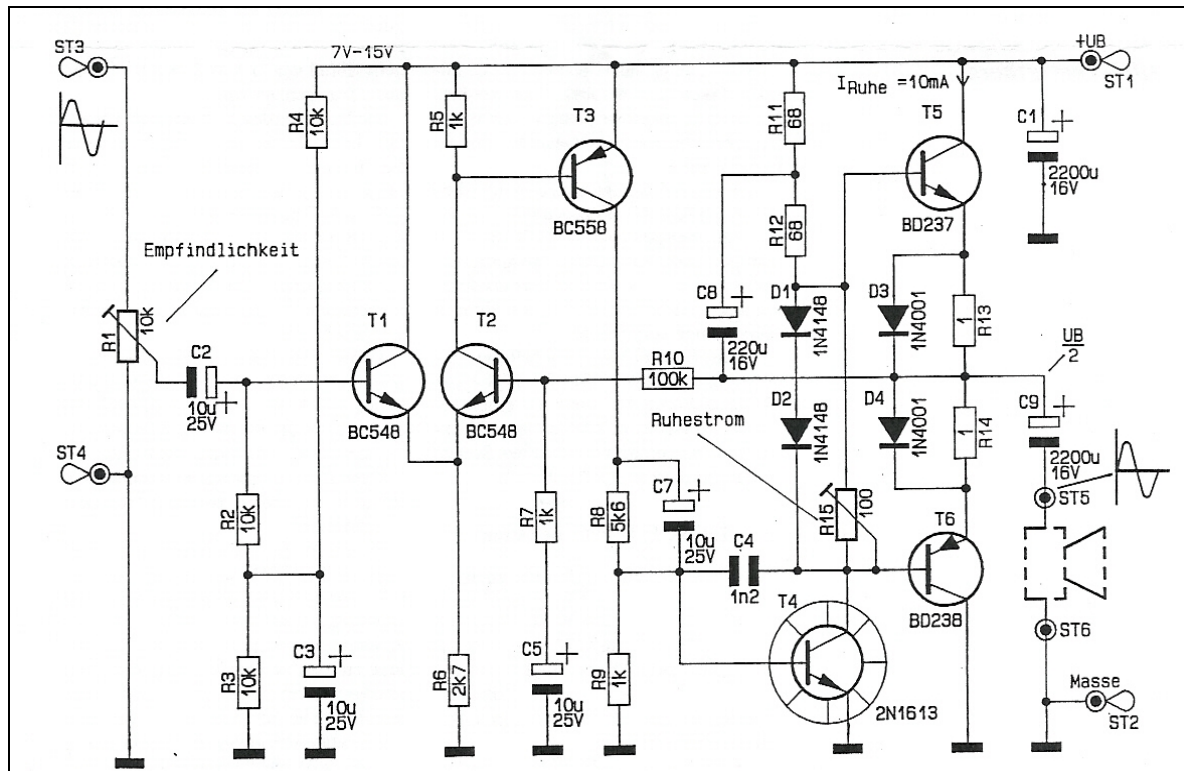


Abbildung 32: Schaltbild des Lautsprecherverstärkers

Bevor die Empfindlichkeit des Verstärker aufgenommen wird, legen wir den Störabstand des Verstärkers mit 60dB (Praxiswert) fest.

60dB wird zur Unterscheidung von Nutz- und Störsignal gewählt.

Es wird ein 1-kHz-Signal eingespeist und mit einem Oszilloskop an einem am Ausgang (ST5-ST6, siehe Abbildung 32) des Verstärkers angeschlossenen 8-Ω-Widerstand (8,2Ω aus der Standardwertreihe) gemessen.

1kHz, da es gemäß Bewertungskurve a die höchste Lautstärkeempfindlichkeit ist.

Es wird eine Spitzenspannung von 5,12V gemessen, daraus ergibt sich eine Effektivspannung von 3,62V, demnach eine Leistung von 1,6W.

Dieser Wert von 1,6W stellt die verzerrungsfreie Ausgangsleistung dar.

Danach wird der Pegel am Eingang des Verstärkers reduziert bis am Ausgang des Verstärkers 3,6mV erreicht wird.

Nachdem diese Spannung erreicht ist, wird der Widerstand von 8,2Ω durch den zu verwendenden Lautsprecher ersetzt.

Da das Oszilloskop für die 3,6mV nicht empfindlich genug ist, wird die Spannung von 3,6mV mit einem NF-Pegel Messgerät aufgenommen (Wandel-und-Goltermann) (siehe Geräteliste).

Es wird subjektiv noch ein leiser 1-kHz-Ton erfasst.

Wenn kein Signal mehr zu hören ist, haben wir einen Störabstand von größer 60dB erreicht.

Die Prüfung des Verstärkers erfolgt ohne Einspeisung eines so genannten Nutzsignals, das z.B. durch die Beeinflussung der Verstärkerstufen verzerrt werden kann.

Bei dem gewünschten Abstand von 60dB zwischen Nutz- und Störsignal kann das Störsignal messtechnisch nicht erfasst werden (üblicherweise werden NF-Signale von 1kHz für Prüfzwecke verwendet).

Bei phasengleicher Addition des Nutzsignals mit dem Störsignal ergibt sich eine messtechnisch nicht erfassbare Erhöhung.

11.2 Empfindlichkeitsprüfung des Lautsprecherverstärkers

Zunächst wird der Lautsprecherverstärker (HiFi-Verstärker) im Streifenleiter auf Empfindlichkeit getestet.

Der Lautsprecherverstärker ist als Bausatz gekauft.

Zum Messaufbau siehe Abbildung 3.

Am Verstärkerausgang (ST5–ST6, siehe Abbildung 32) wird ein Lautsprecher angeschlossen, damit die Demodulation in Form eines lauten Pfeifens gehört wird.

Der Lautsprecher wird außerhalb des Schirmraumes gelegt, die Durchführung erfolgt über einen kommerziellen Leitungsfiter. Zur Entkopplung der Leitung wird das Kabel am Schirmgehäuse mehrmals durch ein Klappferrit geführt.

Damit ist sichergestellt, dass nur der Verstärker geprüft wird.

Ablauf der Aufnahme der Empfindlichkeitswerte siehe oben (Video-Bereich).

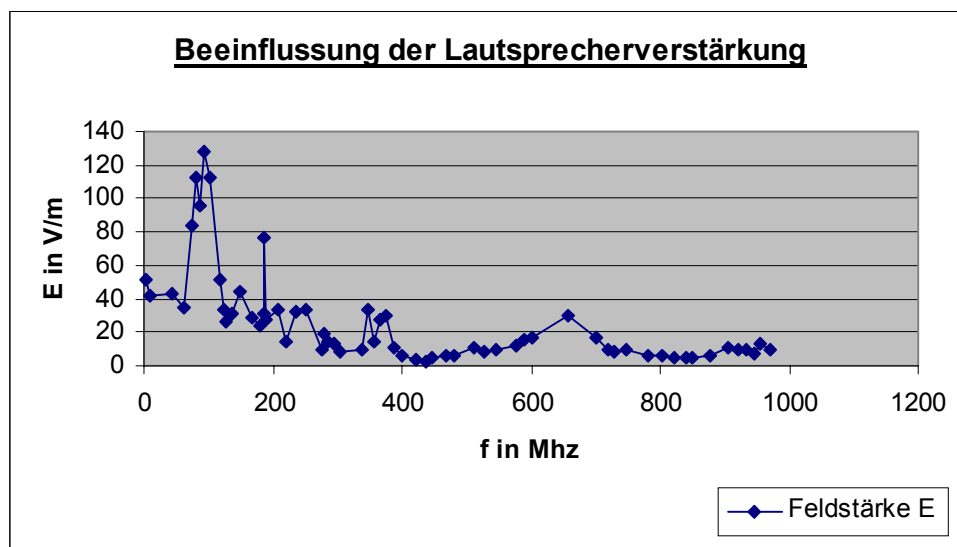


Abbildung 33: Verlauf der Lautsprecherverstärkung

11.2.1 Auswertung der Empfindlichkeit des Hifi-Verstärkers

Es wird eine sehr starke Empfindlichkeit des Verstärkers festgestellt, im gesamten Frequenzspektrum (siehe Abbildung 33) von 2MHz–1GHz gibt es Demodulationen, die in Form eines 1-kHz-Tones zu hören sind.

Es wurden Bemühungen unternommen, diese Empfindlichkeit zu vermindern.

11.2.2 Entstörung des Verstärkers

Experimentell wird eine erhebliche Empfindlichkeit des Eingangsdifferenzenverstärker festgestellt.

Bereits eine kapazitive Ankopplung durch Annähern der Hand an den Eingangsbereich (ST3–ST4, siehe Abbildung 32) ergibt eine Demodulation eines benachbarten Mittelwellensenders (990kHz).

Als Lösung wird versuchsweise (siehe Abbildung 34) die Basis von Transistor T1 und die Basis von Transistor T2 mit einem Keramik-Kondensator mit 1nF (Überbrückung der Basis-Emitter-Strecke) auf die bestimmte Masse bei Widerstand R6 gelegt.

Nach der Überbrückung der Basis-Emitter-Strecke ist die HF-Empfindlichkeit des Verstärkers reduziert.

Der eingelötete Kondensator überbrückt die Basis-Emitter-Strecke und verhindert damit eine Demodulation; die Stelle wurde experimentell ermittelt.

Es wird empirisch ermittelt: Zuerst wurde ein kleiner Kondensator von 100pF eingelötet, aber erst die Verwendung eines Kondensators mit 1nF ergab die gewünschte Wirkung.

Die Anschlussdrähte der Kondensatoren wurden mit Streifen aus dünnem Kupferblech verlängert, damit die Induktivität gering bleibt.

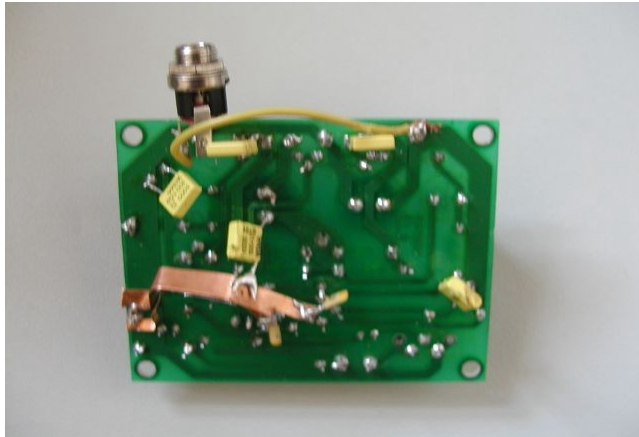


Abbildung 34: Überbrückung der Basis-Emitter-Strecke an den Transistoren

11.3 Wirkung von Entstörkomponenten (Kondensatoren)

An Stelle des Widerstandes ist der Lautsprecher angeschlossen (Messaufbau siehe Abbildung 30).

Um am Oszilloskop relativ ungestört zu empfangen, wird ein spezielles Voltmeter, das vom Prüfling (Lautsprecherverstärker) versorgt wird, verwendet.

Die Übertragung findet über einen Opto-Link statt. Die Umwandlung erfolgt durch einen D/A-Wandler, der an ein räumlich abgesetztes Oszilloskop führt.

Da der Transistor T6 (siehe Abbildung 32) leicht zugänglich ist, wird die Basis-Emitter-Überbrückung mit dem 1nF-Kondensator dort untersucht.

Der Lautsprecherverstärker liegt in der TEM-Zelle im Feld.

Die Frequenz liegt bei 305MHz bei 8V/m (zuvor als Empfindlichkeitsbereich ermittelt, siehe Anlage Tabelle 19).

Das Modulationssignal beträgt 1kHz.

Die Eingangstransistoren (T1, T2, T3) sind durch 1nF-Kondensatoren teilentstört (siehe Abbildung 34).

Es wird am Transistor T6 (siehe Abbildung 32) in der Endstufe gemessen.

Die Überbrückung der Basis-Emitter-Strecken der eigentlichen Endstufentransistoren haben keine wesentliche Verbesserung gebracht.

11.4 Auswertung am Oszilloskop

Anmerkung:

Bei 1kHz stimmt das Bildschirmraster des Oszilloskops mit der Frequenz nicht überein, da es einen genau 20%igen Fehler (Rechenfehler bei der Bildaufbereitung) im Zeitbereich gibt.

11.4.1 Lautsprecherverstärker unentstört

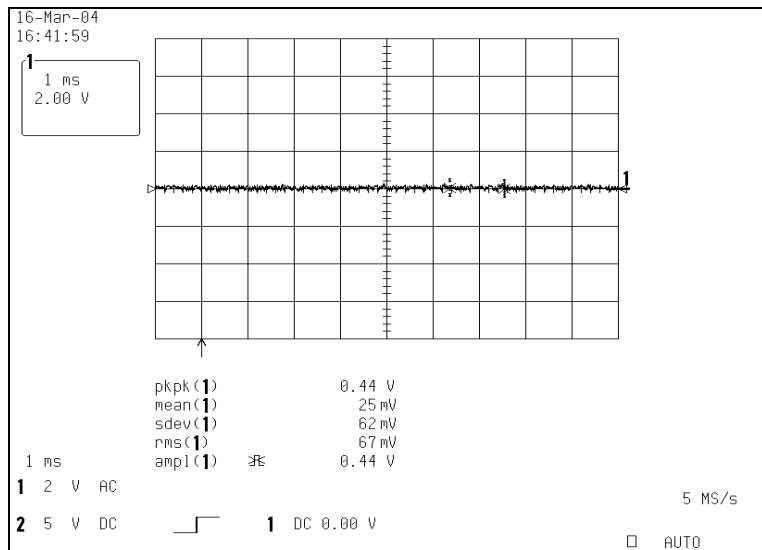


Abbildung 35: Oszilloskopaufnahme ohne Feld

Ohne Feld ergibt sich kein Demodulationsprodukt.

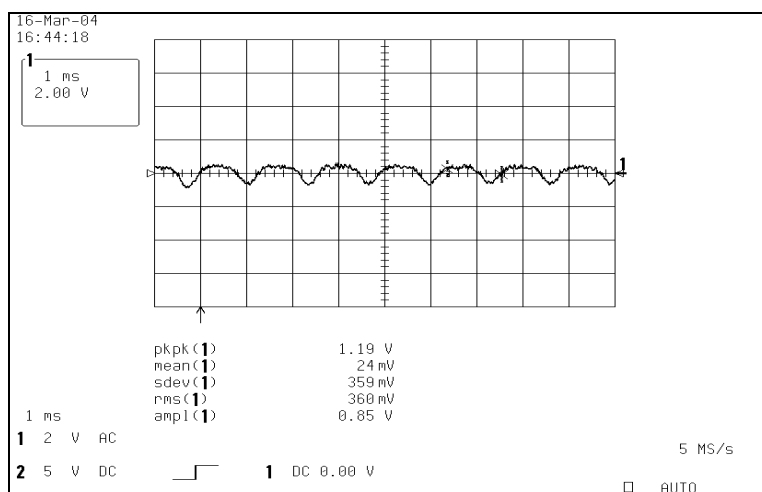


Abbildung 36: gleichgerichtetes NF-Signal

Unter Einfluss eines Feldes von 8V/m (entsprechend 85dB μ V Steuerpegel am HF-Verstärker) sehen wir ein demoduliertes NF-Signal von 1kHz.

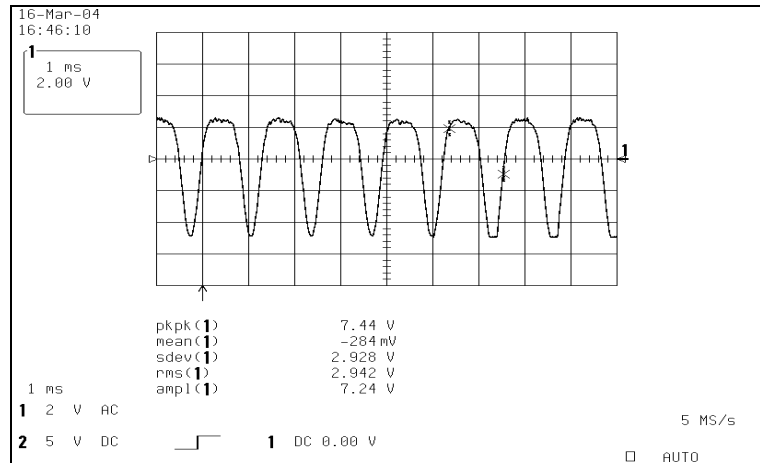


Abbildung 37: Einweggleichrichtung

Das von den Vorstufen gleichgerichtete NF-Signal (Basis-Emitter-Strecke) wird zusätzlich noch mal gleichgerichtet (Einweggleichrichtung: Signalverzerrung). Den Vorgang kann man auch deutlich am Lautsprecher hören.

11.4.2 Lautsprecherverstärker entstört

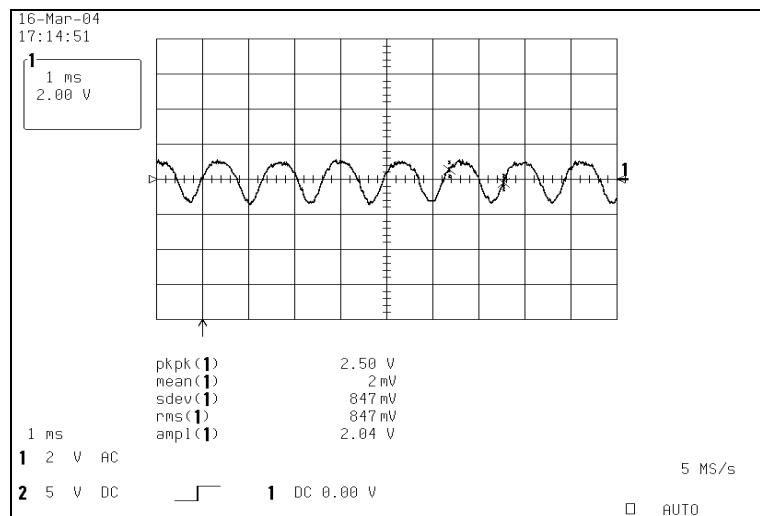


Abbildung 38: Signal ohne Gleichrichtung

Durch die Basis-Emitter-Überbrückung durch die Kondensatoren wird diese zusätzliche Einweggleichrichtung verhindert.

Die Verzerrungen treten nicht mehr auf, es resultiert ein sauberes NF-Signal.

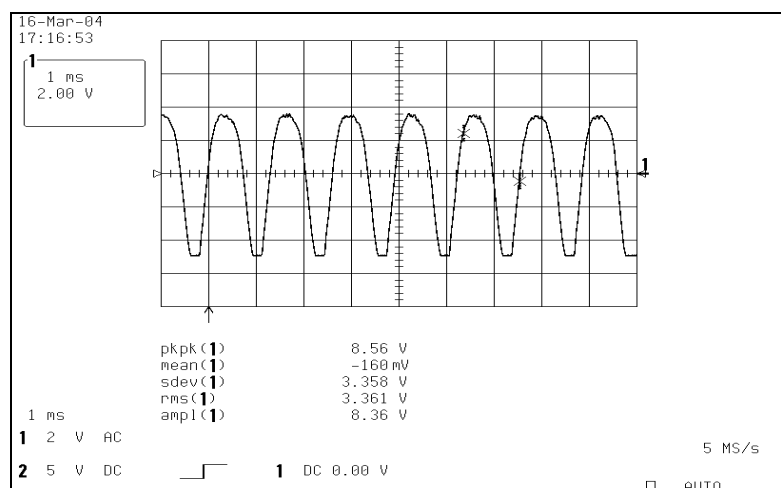


Abbildung 39: NF-Signal nach Pegelerhöhung

11.5 Mikrofonverstärker (SMD-Bausatz)

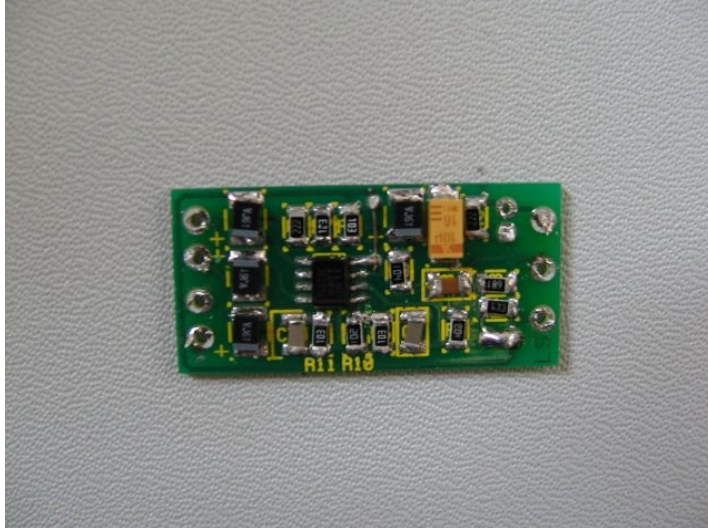


Abbildung 40: SMD-Mikrofonverstärker (Vorderansicht)

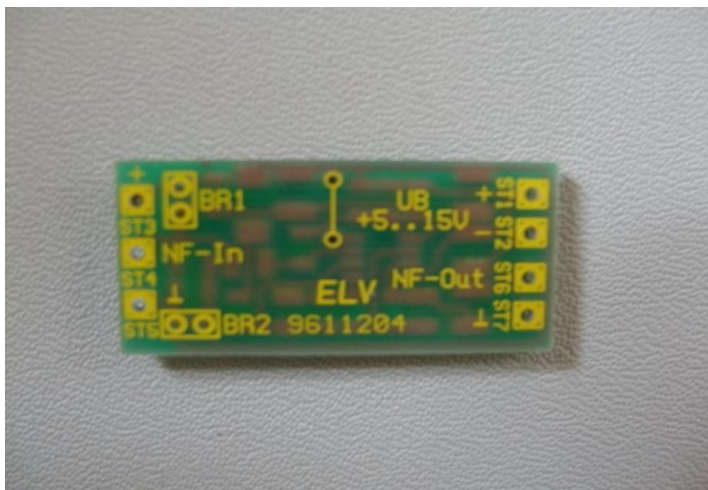


Abbildung 41: SMD-Mikrofonverstärker (Hinteransicht)

Der SMD-Mikrofonverstärker wird wegen zu starken Rauschens verworfen.

11.6 Mikrofonverstärker (Eigenkonstruktion)

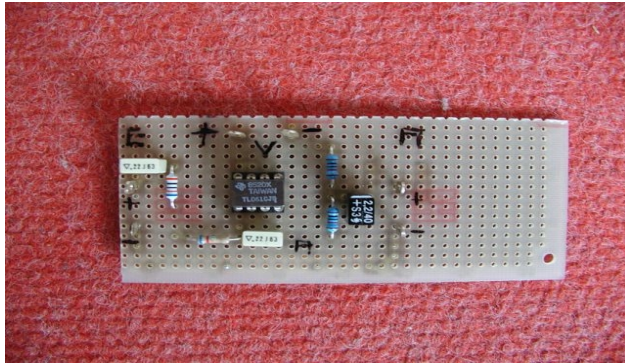


Abbildung 42: Mikrofonverstärker (Eigenbau)

Es handelt sich um einen Verstärker mit unsymmetrischer Betriebsspannung von nominell 12V (siehe Anlage).

Der nicht invertierende Eingang wird über einen Spannungsteiler ($R3/R4$) siehe Abbildung 43) auf die halbe Betriebsspannung hochgelegt und mit einem Kondensator geglättet.

Durch eine externe Beschaltung mit $R1$ und $R2$ wird eine Verstärker von 40dB gewählt. Die Kondensatoren am Eingang und am Ausgang ($C1/C2$) dienen der Gleichspannungsentkopplung und bewirken eine Frequenzgangkorrektur.

40dB (100fache Verstärkung) wurde gewählt, um die im mV-Bereich liegende Ausgangsspannung des dynamischen Mikrofons hinlänglich aufzuheben.

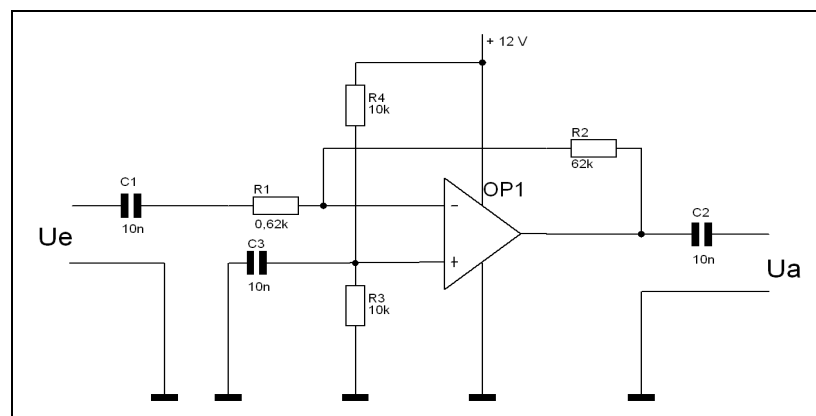


Abbildung 43: Schaltplan (Eigenbau) des Mikrofonverstärkers

Die HF-Empfindlichkeitsprüfung des Mikrofonverstärkers entfällt (Begründung siehe unten).

11.7 Mikrofon und Lautsprecher



Abbildung 44: Mikrofon



Abbildung 45: Lautsprecher (Vorderansicht)



Abbildung 46: Lautsprecher (Rückansicht)



Abbildung 47: externer Lautsprecher

Die Empfindlichkeitsmessungen für Mikrofon und Lautsprecher entfallen auch, da es sich bei beiden um passive Bauelemente handelt.

Passive Bauelemente werden von hochfrequenten Feldern nicht beeinflusst.

11.8 Zusammenfassung der Ergebnisse der Empfindlichkeitsprüfungen

Die Prüfungen an der Kamera und am teilentstörten NF-Verstärker zeigten die Notwendigkeit der Anwendung weiterer Maßnahmen. Wir haben uns für die Verwendung geschirmter Gehäuse entschieden.

Da beide Verstärker im gleichen Gehäuse untergebracht werden sollten, wurde auf eine Empfindlichkeitsprüfung des Mikrofonverstärkers verzichtet.

12 Schirmgehäuse

12.1 Einleitung

Kameras mit metallischen Schirmgehäusen sind bekannt und auf dem Markt verfügbar. Nicht zuletzt aus ökonomischen Erwägungen sollte in dieser Arbeit die Verwendung von metallisiertem Gewebe untersucht werden.

Dämpfungsmessungen an beschichteten Materialien werden üblicherweise mithilfe eines Doppel-TEM-Systems durchgeführt, bei dem das zu prüfende Material in den Strahlungspfad eingefügt wird.

Die hiermit gemessenen Dämpfungsbeträge sind sehr hoch, aber an realisierten Gehäusen nicht unbedingt nachzuvollziehen.

12.2 Berechnung der benötigten Dämpfung bei einer vorgegebenen Feldstärke von 200V/m

Es werden die Empfindlichkeitswerte (Feldstärken) aus den Tabellen 18/19 abgelesen und in Bezug auf 200V/m berechnet.

Mit den unten angegebenen Gleichungen werden die erforderlichen Dämpfungsbeträge für eine störungsfreie Funktion des Audio- und Video-Bereiches berechnet.

12.3 Berechnung für den Lautsprecherverstärker

Beispiel für $f = 437\text{MHz}$, $E = 2,4\text{V/m}$

$$a = 20 * \log \left(\frac{200V / m}{\text{Empfindlichkeit}(V / m)} \right)$$

$$a = 20 * \log \left(\frac{200V / m}{2,4V / m} \right) = \underline{\underline{38,41dB}}$$

12.4 Berechnung für die Kamera

Beispiel für $f = 14\text{MHz}$, $E = 3,78\text{V/m}$

$$a = 20 * \log\left(\frac{200\text{V/m}}{3,78\text{V/m}}\right) = \underline{\underline{34,47\text{dB}}}$$

Nach der Berechnung liegt die mindest erforderliche Dämpfung für den Audio-Bereich bei 38,4dB und für den Video-Bereich bei 34,5dB.

Die Berechnungen werden für die Stellen gemacht, bei denen die Empfindlichkeit maximal ist.

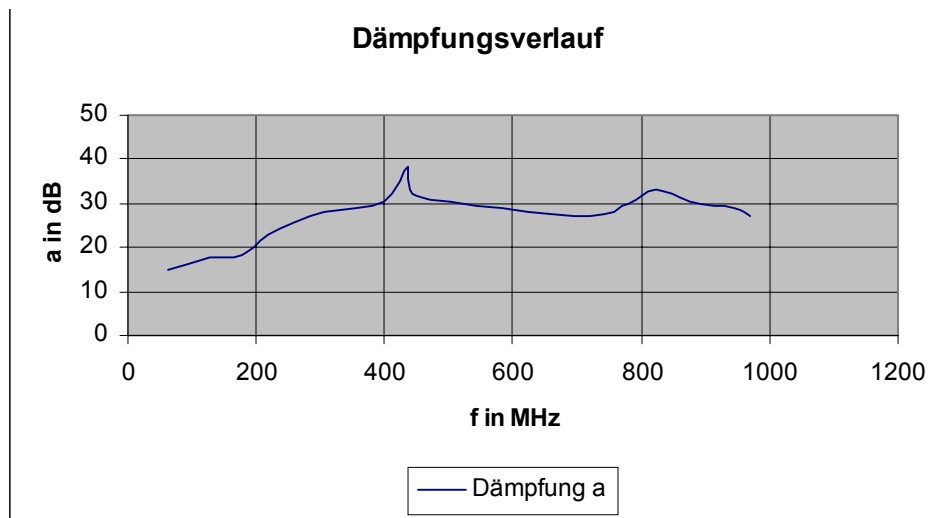


Abbildung 48: Minimal erforderliche Dämpfung für die Verstärker

f in MHz	a in dB
63	15,13
128	17,72
179	18,42
218,7	23,09
305	27,96
400	30,46
437	38,41
448	31,7
719	26,94
780	30,03
823	33,35
877	30,17
945	29,12
969	26,93

Tabelle 5: Dämpfung für die Verstärker

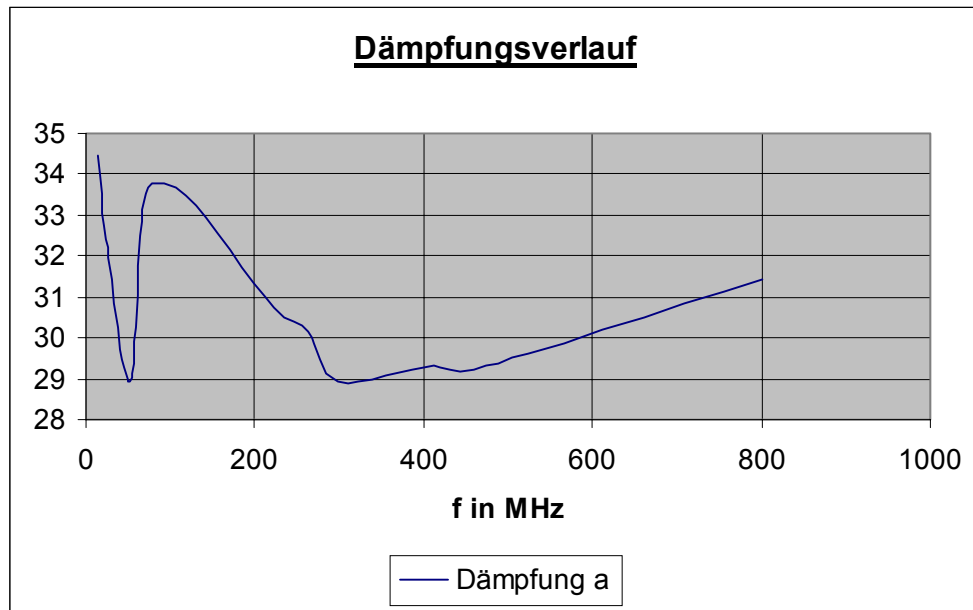


Abbildung 49: Minimal erforderliche Dämpfung für die Kamera

f in MHz	a in dB
14	34,47
24	32,43
52	28,94
72	33,53
118	33,49
223	30,72
263	30,16
298	28,95
412	29,32
460	29,23
800	31,41

Tabelle 6: Dämpfung für die Kamera

Im folgenden Abschnitt werden einfache Gehäusestrukturen verwirklicht und deren Schirmwirkung mit unterschiedlichen Methoden vermessen.

12.5 Gehäuse aus Karton

Für die weiteren Messungen wird eine Gehäuse aus Karton mit der Seitenlänge 9,5cm gebaut und mit metallisiertem Gewebe überdeckt. Die Seitenlänge wurde so gewählt, dass die Feldsonde hinein gelegt werden kann.

Für das Kleben der beiden Schichten aufeinander wird Kleber benutzt.

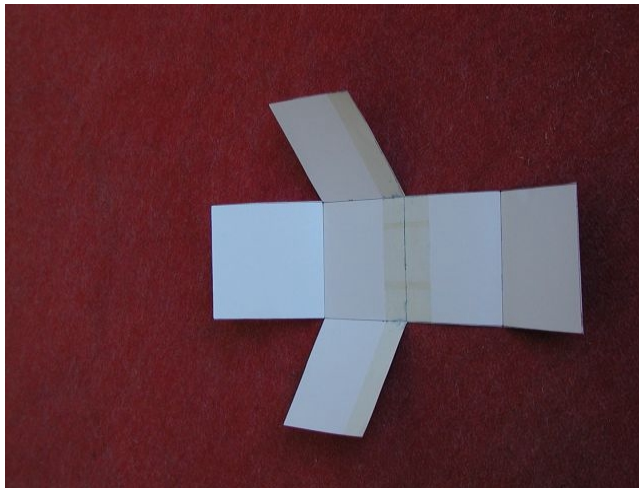


Abbildung 50: Karton mit 9,5cm Seitenlänge ausgeschnitten



Abbildung 51: Metallisiertes Gewebe

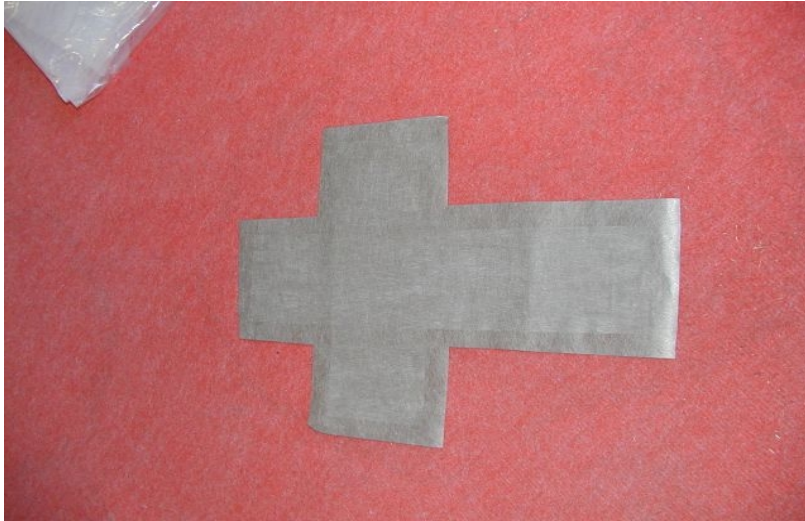


Abbildung 52: Karton mit metallisiertem Gewebe überdeckt

Anschließend wird der Karton mit metallisiertem Gewebe zusammengeklebt.



Abbildung 53: Gehäuse

12.6 Dämpfungsmessung in der TEM-Zelle

Der Messaufbau ist der gleiche wie in der vorherigen Messung (siehe Abbildung 3).

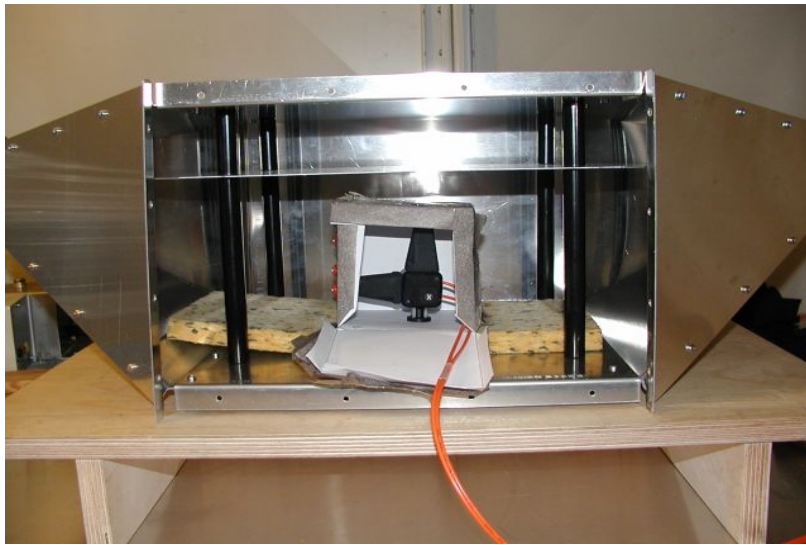


Abbildung 54: Sonde im Karton

Anschließend wird das Gehäuse geschlossen und die Messung beginnt.

12.6.1 Messung der durch metallisiertes Gewebe gedämpften Feldstärke

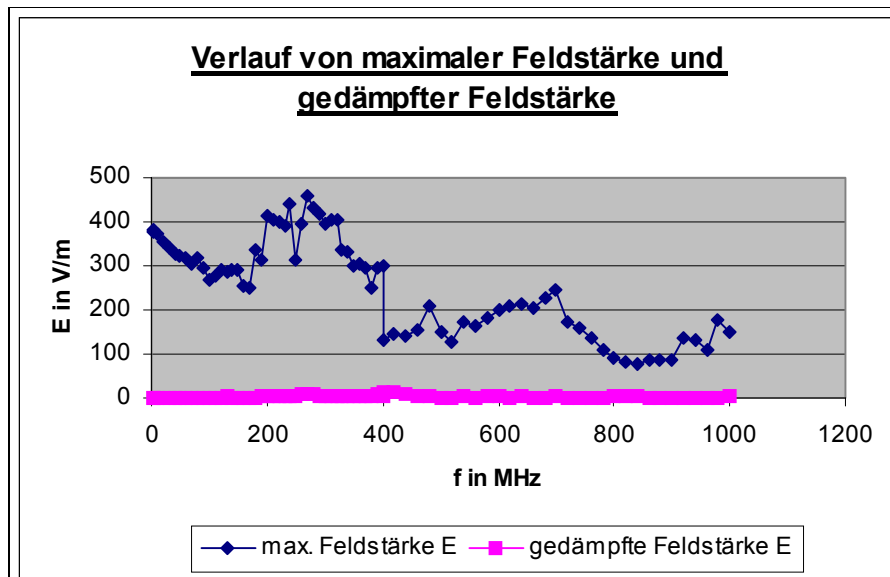


Abbildung 55: Maximale Feldstärke und gedämpfte Feldstärke im Überblick

12.6.2 Berechnung der Dämpfung bei 5MHz

Die Gleichung der Dämpfung lautet:

$$a = 20 \cdot \log \frac{E_{\text{maximal}}}{E_{\text{gedämpft}}}$$

$$a = 20 \cdot \log \left(\frac{384 \text{ V/m}}{0,25 \text{ V/m}} \right) = \underline{\underline{63,73 \text{ dB}}}$$

12.6.3 Dämpfungsverlauf

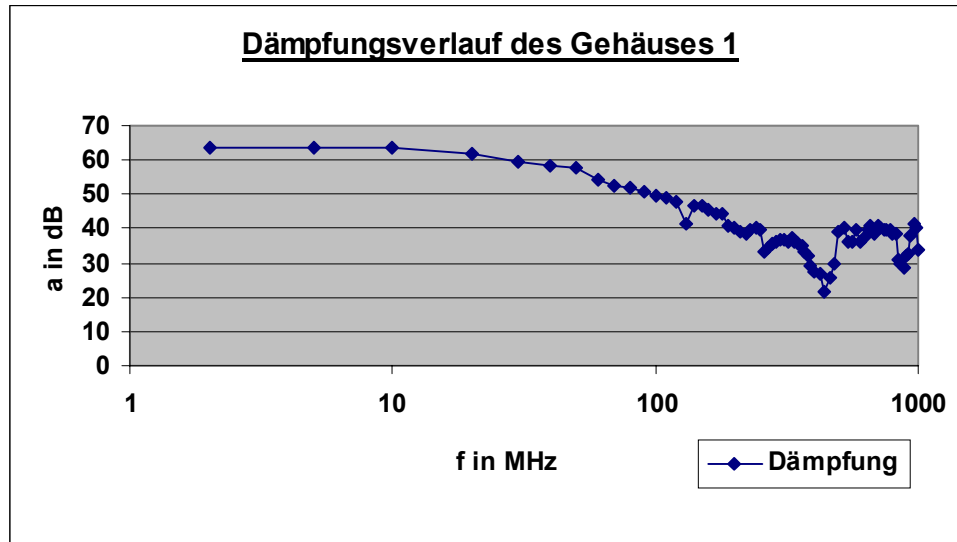


Abbildung 56: Berechnete Dämpfung

12.6.4 Berechnung bei doppelter Schirmung bei 5MHz

$$a = 20 * \log \left(\frac{E_{\text{maximal}}}{E_{\text{gedämft}}} \right)$$

$$a = 20 * \log \left(\frac{384V/m}{0,18V/m} \right) = \underline{\underline{66,58dB}}$$

$$a = 20 * \log \left(\frac{384V/m}{0,18V/m} \right) = \underline{\underline{66,58dB}}$$

12.6.5 Dämpfungsverlauf

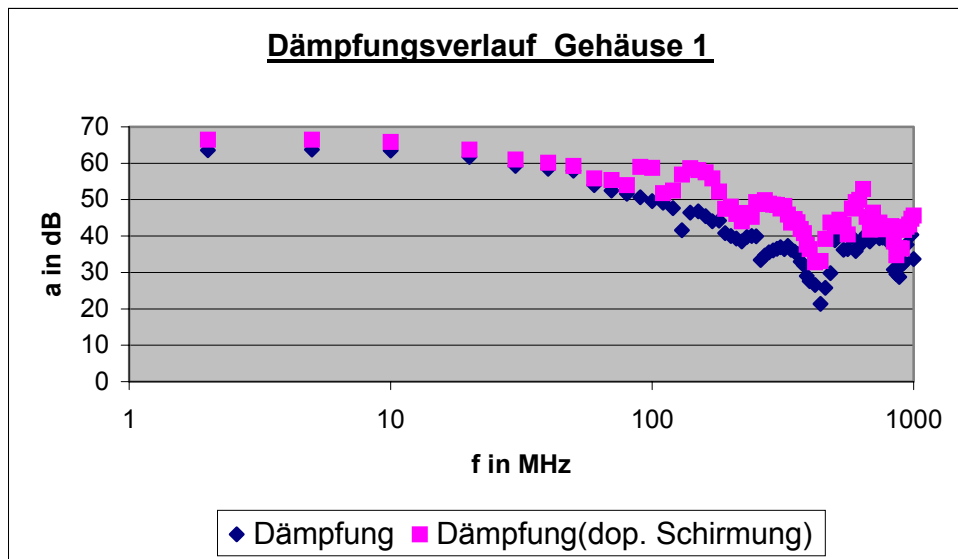


Abbildung 57: beide Dämpfungsverläufe

12.6.6 Gehäuse 2

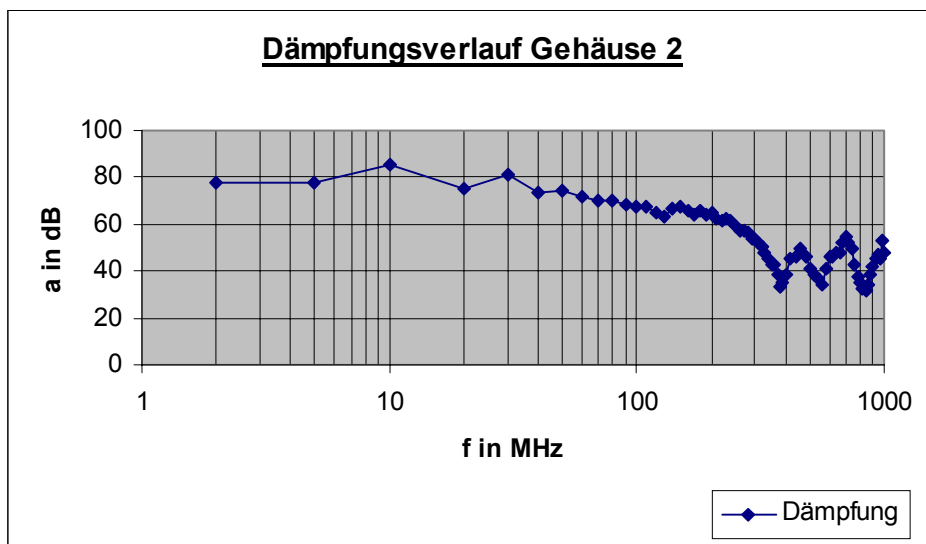


Abbildung 58: Gehäuse 2 (Dämpfung)

12.6.7 Auswertung (Gehäuse 1 und Gehäuse 2)

Nach der Feldstärkenmessung wird die Dämpfung nach der Dämpfungsformel (siehe oben) berechnet.

Die maximale Dämpfung mit einfacher Schirmung mit dem metallisierten Gewebe liegt bei 63,7dB (Frequenz 5MHz).

Die maximale Dämpfung bei doppelter Schirmung liegt bei 66,5dB (Frequenz 5MHz).

Die doppelte Schirmung des Gehäuses bringt nicht, wie viele erwartet hätten, die doppelte Dämpfung.

Die Dämpfungssteigerung ist minimal (siehe Abbildung 57 oder Tabelle 14).

Bei Gehäuse 1 werden die Seiten überlappend mit Klebeband zusammengeklebt, offensichtlich dringen dennoch an den Seitenstellen hochfrequente Felder ein.

Bei Gehäuse 2 wurden die Seiten mit leitfähigem Klebeband verklebt und das Ergebnis war eindeutig besser.

Die maximale Dämpfung liegt bei 85,4dB (Frequenz 10MHz) (siehe Abbildung 58).

12.7 Ersatzantennenmethode (300MHz–3GHz)

Zur Überprüfung der mit dem Streifenleiter erzielten Ergebnisse wird eine zweite Messmethode angewendet.

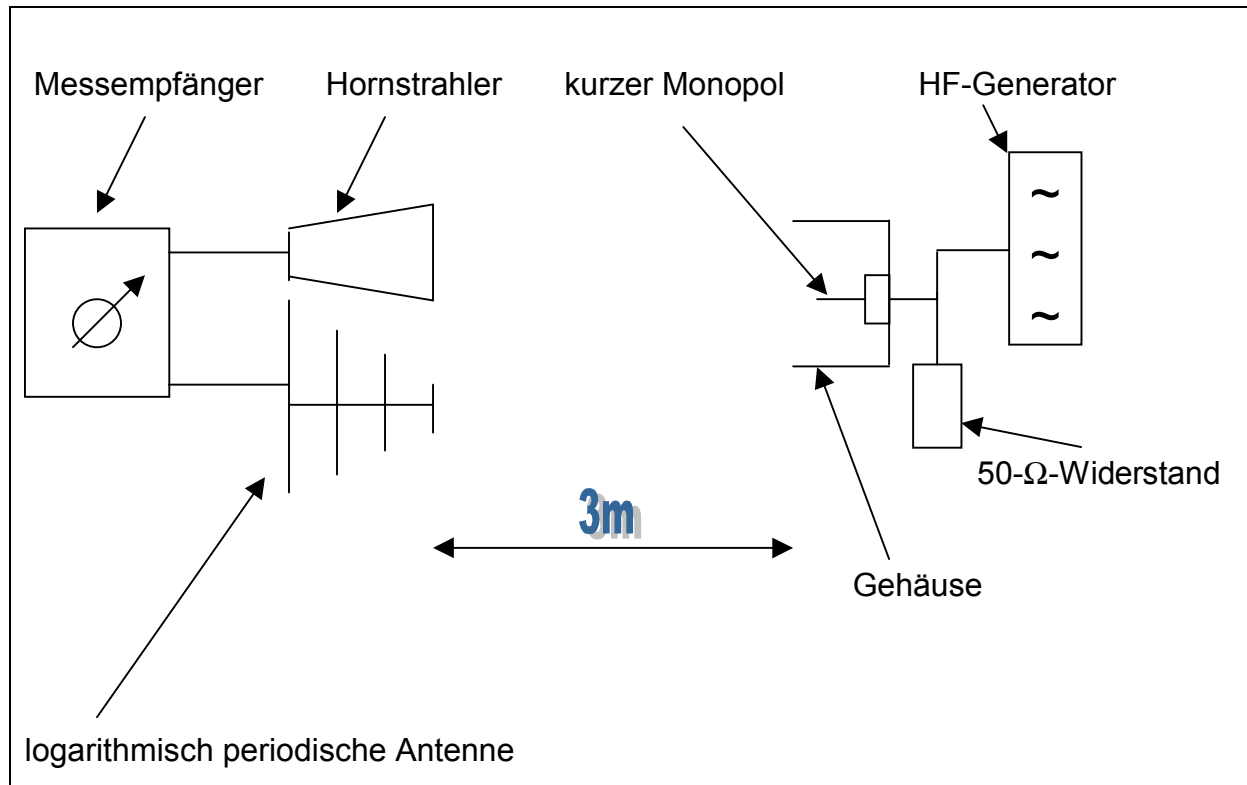


Abbildung 59: Messaufbau

12.7.1 Messablauf Ersatzantennenmethode

In dem Versuchsgehäuse wird an einer 50-Ω-terminierten Leitung (Abschluss für den Generator) ein nicht resonanter Monopol betrieben (siehe Abbildung 60) der bei geöffnetem Gehäuse ein mit Messantennen aufgenommenes Referenzsignal ergibt.

Anschließend wird das Gehäuse geschlossen und die Messung wird wiederholt, die Differenz beider Messungen ergibt die Dämpfung.

Im Bereich 300MHz–1GHz wird mit der logarithmisch periodischen Antenne gemessen.

Im Bereich 1GHz–3GHz wird mit dem Hornstrahler gemessen (siehe Anlage Geräteliste).



Abbildung 60: Kurzer Monopol im Gehäuse



Abbildung 61: T-Stück

12.7.2 Problem

Es gibt offensichtlich Kontaktprobleme zwischen der Buchse (T-Stück) und dem metallisierten Gewebe.

Dadurch hat das ganze System gestrahlt, was zu verfälschten Messergebnissen führte.

12.7.3 Lösung

Der Stecker wird sauber mit der Alufolie an das Gehäuse kontaktiert.

Es bewirkt, dass sich die Dämpfung erheblich verbessert.

Es werden zwei Metallplatten mit passender Bohrung für die Einbaubuchse genommen und bei der Montage mit dem Gewebe gut verpresst.

12.7.4 Ermittlung der Dämpfung

Beispiel für die Frequenz 320MHz

Es wird bei offenem Gehäuse eine Signalstärke von 65,1dBµV/m empfangen.

Mit geschlossenem Gehäuse haben wir eine Signalstärke von 38,6dBµV/m.

Die Differenz beider Signale ergibt eine Dämpfung von 26,5dB.

$$\text{Signal}_{\text{offen}} - \text{Signal}_{\text{geschlossen}} = \text{Dämpfung}$$

$$65,1\text{dB}\mu\text{V/m} - 38,6\text{dB}\mu\text{V/m} = 26,5\text{dB}$$

Bei beiden Messungen gibt es Leitungs- und Steckerdämpfung, die identisch sind, daher unberücksichtigt bleiben können.

Bei 1GHz – 3dB Leitungsdämpfung

Bei 3GHz – 10dB Leitungsdämpfung

12.7.5 Verlauf der Dämpfung der Ersatzantennenmessung

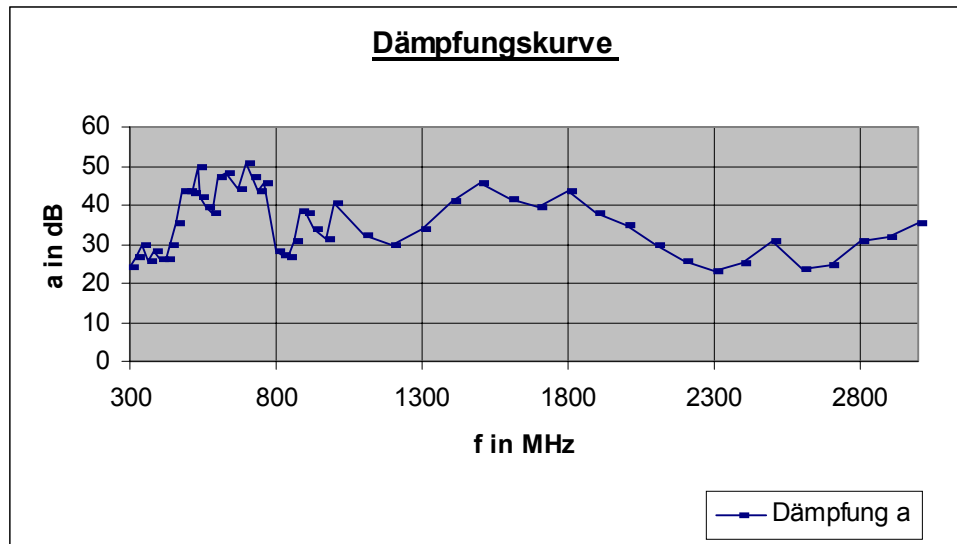


Abbildung 62: Dämpfungsverlauf der Ersatzantennenmethode

12.7.6 Auswertung der Ersatzantennenmessung

Der Bereich unter 300MHz wird nicht in Betracht genommen, da die Feldstärken zu gering sind.

Es gibt bei der Betrachtung der Dämpfungskurve der Ersatzantennenmethode Welligkeiten, die auf Resonanzen zurückzuführen sind.

Der Mittelwert der Dämpfung liegt bei 30dB.

Bei 1GHz stellt der kurze Monopol aufgrund der Länge $\lambda / 4$ bereits ein resonanzfähiges Gebilde dar.

Von 500MHz aufwärts verlassen wir den Bereich der „kurzen Antennen“ mit konstanter Stromverteilung, sodass sich auf dem Monopol eine unterschiedliche Spannungs-Strom-Verteilung ergibt (Resonanzverhalten).

Um das Resonanzverhalten zu vermindern, kann man die Antennenlänge anpassen, sodass ein kurzer Monopol überbleibt.

Auch das Gehäuse stellt einen resonanzfähigen Raum dar.

Die Messung wird als Vergleichsmessung durchgeführt, die ab 1GHz zur Informationszwecke gelten, um einen Überblick zu bekommen.

12.8 Referenzstrahlermethode (300MHz–1GHz)

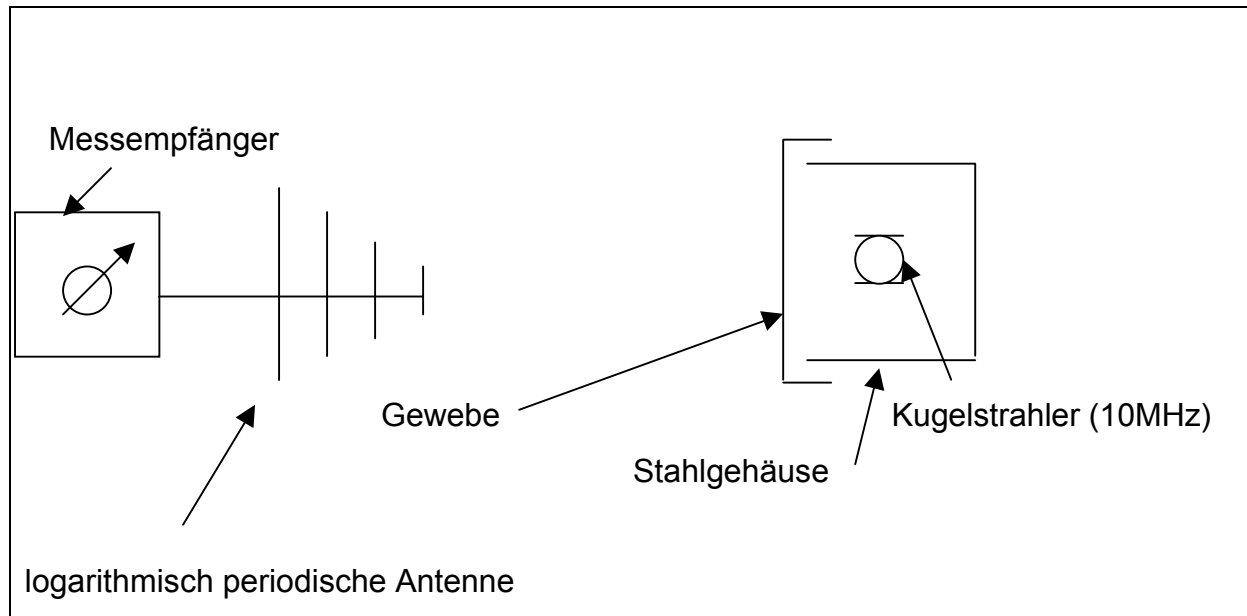


Abbildung 63: Messaufbau

12.8.1 Messablauf Referenzstrahlermethode

Die Messung läuft im Bereich 300MHz–1GHz.

Alle 10MHz sendet der Kugelstrahler im Stahlblech mit der Wandstärke 1mm und Seitenlänge 500mm (siehe Abbildung 64) ein Referenzsignal aus, das mit dem Messem Empfänger aufgenommen wird.

Zunächst ist das Stahlblechgehäuse an der zur Antenne weisenden Seite geöffnet.

Bei der zweiten Messung wird diese geöffnete Seite mit dem metallisierten Gewebe abgedeckt (siehe Abbildung 65) und die Messung wird wiederholt.

Die Differenz beider Messungen ergibt die Dämpfung.



Abbildung 64: Kugelstrahler im Stahlgehäuse



Abbildung 65: Stahlblech mit metallisiertem Gewebe abgedeckt

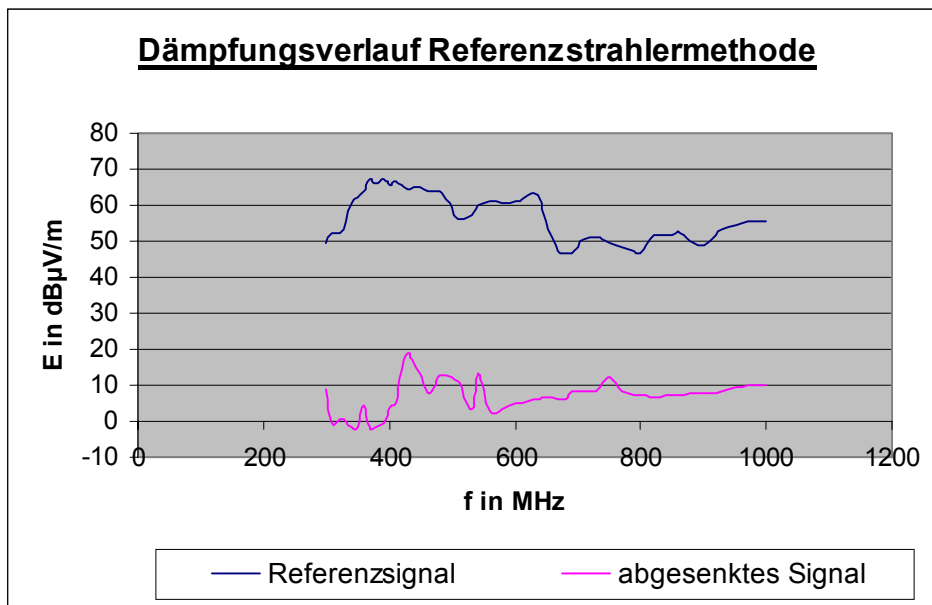


Abbildung 66: Feldstärkenverlauf Referenzstrahlermethode

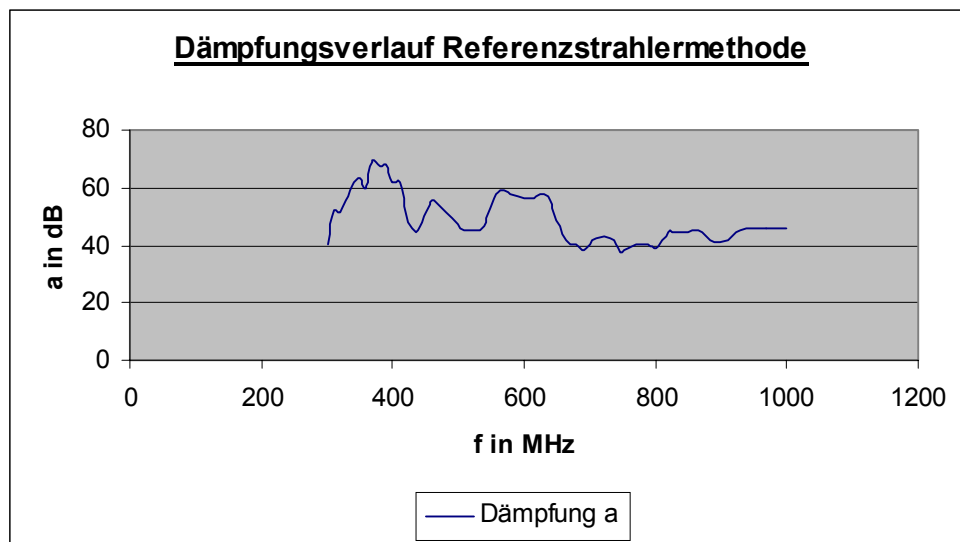


Abbildung 67: Dämpfungsverlauf Referenzstrahlermethode

12.8.2 Auswertung Referenzstrahlermethode

Die Dämpfung wurde wie bei der Ersatzantennenmethode ermittelt.

Die maximale Dämpfung liegt bei 69,4dB.

Vergleicht man die Dämpfungswerte mit denen der Ersatzantennenmethode und den in der TEM-Zelle gemessenen Dämpfungswerte, ergeben sich höhere Dämpfungswerte bei der Referenzstrahlermethode.

Bei der Ersatzantennenmethode und bei in der TEM-Zelle gemessenen Dämpfung des metallisierten Gewebes ergeben sich durch Öffnungen, durch die Leitungen (Leitung für den Opto-Link) durchgeführt werde Dämpfungsverluste.

Durch Anschlüsse entstehen Fehlanpassungen (daraus resultieren Mantelwellen und zusätzliche Abstrahlung über das Kabel).

Das bei der Referenzstrahlermethode verwendete Gehäuse stellt ein abgeschlossenes System dar.

Es gibt keine zusätzliche möglichen Abstrahlungen durch Leitungen bzw. Öffnungen. Es wird überprüft und festgestellt, dass sich an den Messpunkten keine messverfälschenden Messsignale ergeben.

Daher werden die Fremdsignale nicht eingerechnet.

Alle diese Erkenntnisse sprechen für die Referenzstrahlermethode, deshalb wird die Referenzstrahlermethode für die weiteren Messungen bzw. Berechnungen in Betracht genommen.

Mögliche Fehler bei der Referenzstrahlermethode entstehen durch die Überlagerung von im Inneren reflektierten Wellen.

Die präzisesten Ergebnisse sollten mit einem mit Absorptionsmaterial ausgekleideten System erzielt werden.

12.8.3 Auswertung der benötigten Dämpfung

Vergleicht man die mindest erforderlichen Dämpfungen der Audio-/Video-Bereiche mit dem Dämpfungsverlauf des metallisierten Gewebes (siehe Abbildung 67), so liegen die Dämpfungswerte des metallisierten Gewebes alle oberhalb der erforderlichen Dämpfungen.

Somit reicht die Schirmwirkung des metallisierten Gewebes für eine störungsfreie Übertragung.

Der erforderliche Störabstand ist somit erreicht.

Somit kann mit dem Bau der Gehäuse angefangen werden.

12.9 Kamera im Gehäuse

Vor der Realisierung des endgültigen Kameragehäuses stellte sich die Frage, ob für die Durchtrittsöffnung für das Objektiv eine durchsichtige Schirmung notwendig wäre. Es wurde aus Kartonmaterial ein passendes Gehäuse hergestellt, geschirmt und die Kamera montiert.

Die Kamera wird anschließend in das mit dem metallisiertem Gewebe abgeschirmte Gehäuse gelegt und in der TEM-Zelle geprüft. Der Messaufbau ist der gleiche wie in der vorherigen Messung (siehe Abbildung 3).

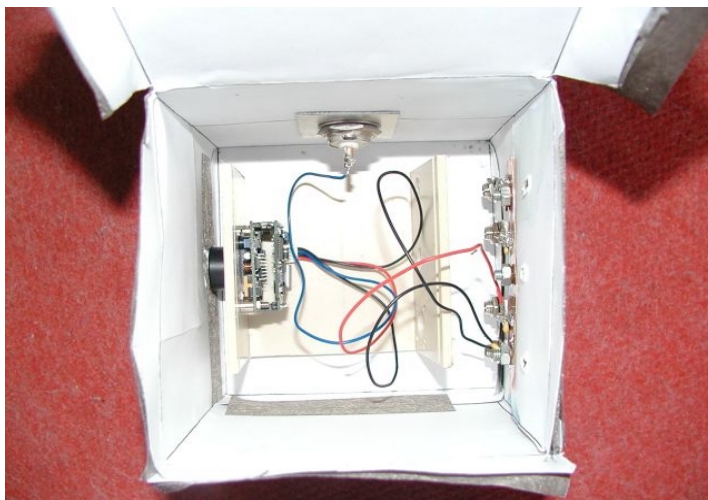


Abbildung 68: Innenansicht des Gehäuses

Die Stecker für die Versorgung und Video werden an das metallisierte Gewebe kontaktiert.

Es werden 1nF-Kondensatoren gegen das Eindringen der Hochfrequenz in das Gehäuse an den Steckern angebracht und die Versorgungsleitung intern verdrösselt.



Abbildung 69: Kamera im Gehäuse

12.9.1 Auswertung Betrieb der Kamera im Gehäuse bei hohen Feldstärken

Diese Messung zeigt eine erstaunlich hohe Dämpfung, es treten nur sehr leichte Bildstörungen auf, die toleriert werden können. Offensichtlich dringt durch das Objektiv der Kamera die Hochfrequenz ein, andere Stellen kommen nicht in Frage, da sie abgeschirmt sind. Im Bereich von 2MHz–1GHz treten bei der maximal verfügbaren Feldstärke bei folgenden Frequenzen leichte, aber vernachlässigbare Störungen auf.

15,9MHz

105MHz

259MHz

317MHz

368,3MHz

Diese Stichprobenprüfungen wurden bei den Frequenzen durchgeführt, bei denen sich zuvor die höchste Empfindlichkeit gezeigt hatte.

12.9.2 Beide Verstärker im Gehäuse

Der Ausgang des Mikrofonverstärkers wurde mit dem Eingang des Lautsprecherverstärkers verbunden, um mithilfe des eingebauten Lautsprechers eine einfache Überwachungsmöglichkeit für beide Verstärker zu bekommen.

Der Verstärker wurde in dieser Form dem maximal möglichen HF-Feld ausgesetzt.

Es resultierten keine Demodulationsprodukte (Störabstand größer 60dB).

Dabei zeigte sich, dass der zuvor noch nicht separat geprüfte Mikrofonverstärker im Gehäuse ausreichend HF-geschützt ist.

Nach diesen Erkenntnissen wurden die endgültigen Kunststoffgehäuse bearbeitet

12.10 Zusammenbau des geschirmten Gehäuses

Das Gehäuse setzt sich aus zwei Teilen zusammen (Unterteil und Deckel).

12.10.1 Videopfad im Gehäuse



Abbildung 70: Kameragehäuse aus Kunststoff

Die Maße für das Gehäuse:

Länge = 85mm, Breite = 85mm, Höhe = 70 mm



Abbildung 71: Kameragehäuse mit metallisiertem Gewebe verkleidet

Vor der Verkleidung der Gehäuse werden die Bohrungen durchgeführt.

Für das Objektiv wird eine Bohrung mit dem Durchmesser von 15mm angebracht.

Entsprechend werden die Bohrungen für die benötigten Stecker ausgeführt.

Der Durchmesser der Bohrungen für die drei Stecker beträgt jeweils 5mm.

Das metallisierte Gewebe ist an einer Seite kaschiert mit einer Thermoklebefolie.

Das Gewebe wird für die Gehäusemaße zurechtgeschnitten und mit einem Heißluftgebläse an das Gehäuse angebracht.

12.10.2 Steckeranschlüsse für das Gehäuse (Video)

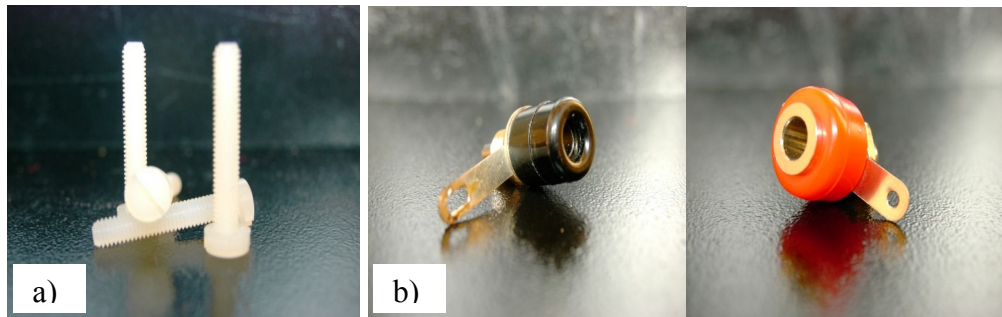


Abbildung 72: a) Nylonschrauben; b) Polklemmen



Abbildung 73: BNC-Buchse

Die Nylonschrauben werden benutzt, um das Eindringen der Hochfrequenz in das Gehäuse zu verhindern.

Polklemmen sind für die Versorgung angebracht.

Die BNC-Buchse ist für den Videoanschluss.

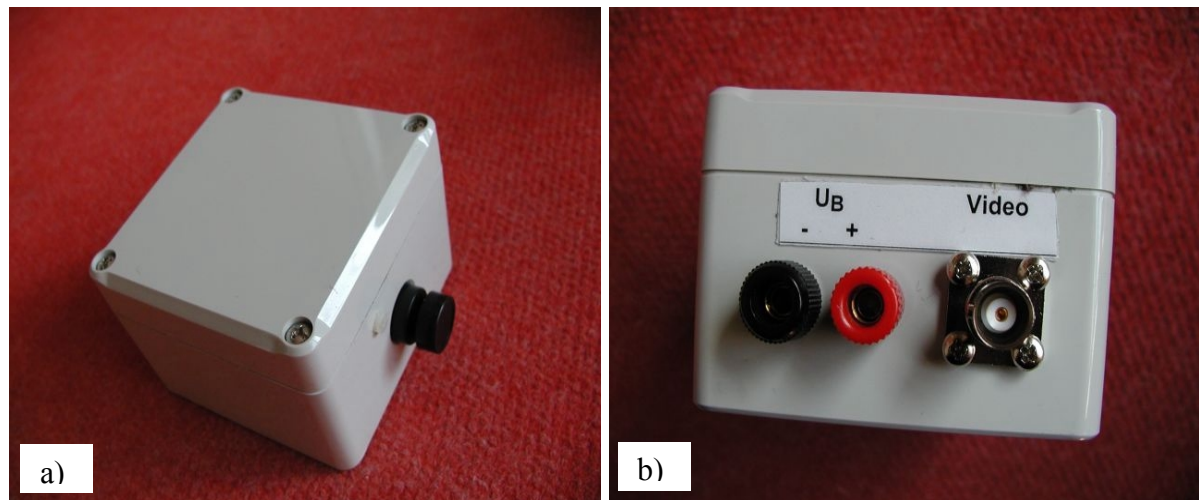


Abbildung 74: a) Kamera im Gehäuse eingebaut; b) Anschlüsse am Gehäuse

U_B = Versorgung

Video = Video-Anschluss

12.10.3 Audio-Bereich im Gehäuse



Abbildung 75: Kunststoffgehäuse für Lautsprecher und Mikrofonverstärker und Lautsprecher

Die Maße für das Gehäuse:

Länge = 200mm, Breite = 120mm, Höhe = 80mm



Abbildung 76: Gehäuse mit metallisiertem Gewebe verkleidet

Das Verstärkergehäuse wird auf die gleiche Art wie das Kameragehäuse geschirmt.
Die Bohrungen für die benötigten Anschlüsse haben alle einen Durchmesser von 5mm.

12.10.4 Steckeranschlüsse für das Gehäuse (Audio)

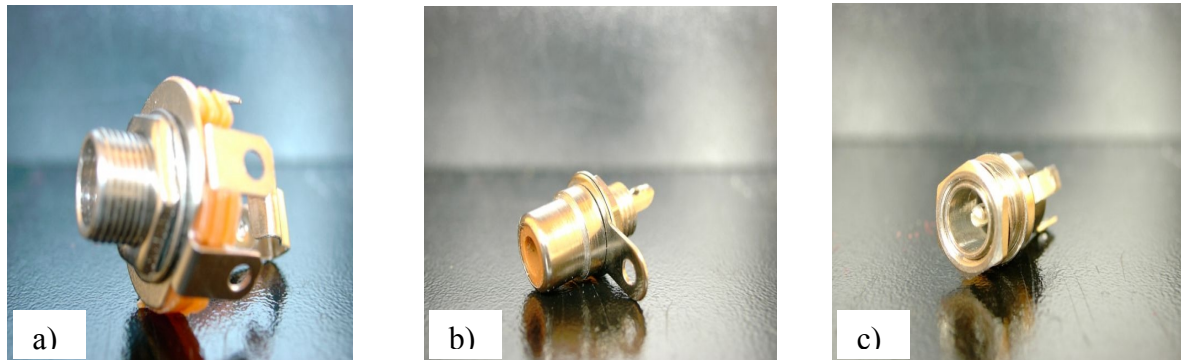


Abbildung 77: a) Klinkenbuchse; b) Cinchbuchse; c) Hohlstecker

12.10.5 Einbau Lautsprecher- und Mikrofonverstärker und Lautsprecher

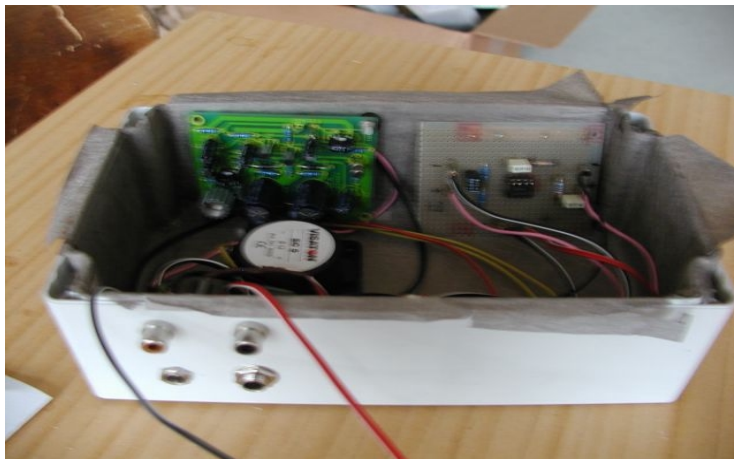


Abbildung 78: Gehäuse inneres

Der Lautsprecher- und Mikrofonverstärker sowie der Lautsprecher werden an den Bohrungen in das Gehäuse montiert und mit den Steckern angeschlossen.

Außerdem werden Drosselspulen an den Leitungen angebracht, die das Eindringen der Hochfrequenz in das Gehäuse verhindern.



Abbildung 79: Buchsen mit Beschriftung

LS_{ein} = Lautsprecherverstärker (Eingang)

M_{ein} = Mikrofonverstärker (Eingang)

M_{aus} = Mikrofonverstärker (Ausgang)

U_B = Versorgung

Die Buchse für die Versorgung ist ein Hohlstecker für den Lautsprecherverstärkereingang bzw. für den Mikrofonverstärkerausgang, werden Cinchbuchsen verwendet. Die Klinkenbuchse wird für den Mikrofonverstärkerausgang benutzt.



Abbildung 80: Beide Verstärker mit Lautsprecher im Gehäuse eingebaut

An der Oberseite des Gehäuses sind zusätzlich 7 Bohrungen mit 3mm Durchmesser angebracht, da an der Innenseite der Lautsprecher genau an dieser Stelle platziert ist.

Mit dem Bau der Gehäuse für den Audio- bzw. Video-Bereich sind die Gehäusen für den Einbau in einem Messkammer (Reverberation Chamber) fertig gestellt.

Im nächsten Kapitel wird der Bau der Gehäuse für den Bereich außerhalb der Messkammer beschrieben.

12.11 Zusammenbau des ungeschirmten Gehäuses



Abbildung 81: Ungeschirmtes Gehäuse in zwei Positionen

Die Maße für das Gehäuse:

Länge = 150mm, Breite = 80mm, Höhe = 80mm

12.11.1 Gehäuseansicht

Gehäuse setzt sich wie bei den vorherigen Modellen aus zwei Teilen zusammen.



Abbildung 82: Innenansicht und Deckel

Da das Gehäuse nicht in einer Messkammer mit Feldern verwendet wird, erspart man sich die Schirmung mit dem metallisierten Gewebe.



Abbildung 83: Buchsen mit Beschriftung

Wie bei dem vorherigem Gehäuse werden Bohrungen und die entsprechenden Buchsen am ungeschirmten Gehäuse angebracht.

Die Beschriftung entspricht der vorherigen.

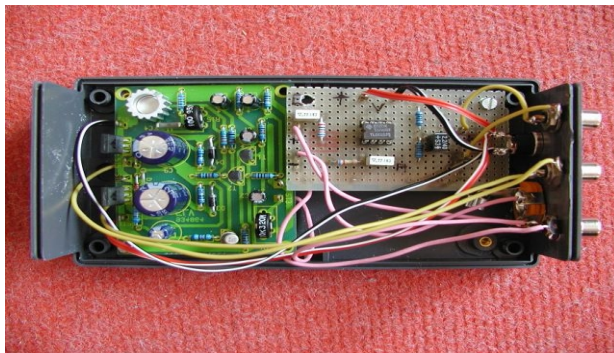


Abbildung 84: Gehäuse Innenansicht

Wie man in Abbildung 84 sieht, sind beide Verstärker (Lautsprecher- und Mikrofonverstärker) mit den Buchsen verbunden.

Der Lautsprecher wird diesmal extern angeschlossen.



Abbildung 85: Ungeschirmtes Gehäuse zusammengebaut

13 Aufstellung der Einheiten am Betriebsort

Versuchsweise wurden die Baugruppen an den vorgesehenen Betriebsorten aufgestellt und in Betrieb genommen.

Der nicht geschirmte Verstärker mit dem externen Lautsprecher steht am Steuerrechner.

Die Audioleitungen des geschirmten Verstärkers werden über zwei von Kabinenherstellern gelieferten Filtern, die Kameraleitung über eine koaxiale Wanddurchführung geführt.

Die fotografischen Aufnahmen wurden vor der endgültigen Verkabelung gemacht.

Beim Betrieb ist auf eine ausreichend niedrige Verstärkungseinstellung zu achten, da sonst eine akustische Rückkopplung auftritt.

Im Betrieb der noch nicht fertig gestellten Modenverwirbelungskammer wird dieses Verhalten sich nicht nachteilig auswirken, da für Überwachungszwecke ohnehin nur der eine oder der andere Kanal genutzt wird.

Die endgültige Positionierung der Komponenten wird sich nach den Bedürfnissen der fertig gestellten Kammer richten.



Abbildung 86: Bedienplatz mit Monitor des Steuerrechners

Das Mikrofon steht rechts unten, Verstärker und externer Lautsprecher rechts oben.



Abbildung 87: Kabinenfilter



Abbildung 88: Geschirmter Verstärker in der Kammer



Abbildung 89: Mikrofon in der Kammer



Abbildung 90: Kamera in der Kammer

Rechts oben im Bild ist die Kamera positioniert.

14 Zusammenfassung

Für den Betrieb in einer geplanten Modenverwirbelungskammer (MVK) soll eine bidirektionale Audio-Verbindung und eine unidirektionale Video-Verbindung erstellt werden, die auch bei höheren Feldstärken unbeeinflusst arbeiten.

Gleichfalls dient der Aufbau dieser Einrichtung der Überprüfung der Schirmwirkung eines neuzeitlichen Schirmmaterials im praktischen Einsatz.

Die Empfindlichkeit der analogen Einrichtung gegenüber Hochfrequenzbestrahlung wird ermittelt.

Die frequenzabhängige Schirmwirkung des verwendeten Materials wird gleichermaßen ermittelt und für ausreichend befunden.

Eine Entstörung des fertig gekauften Videomoduls wurde nicht in Betracht gezogen. Stattdessen wurde eine Teilentstörung des Lautsprecherverstärker-Moduls durchgeführt.

Beim anfänglichem Betrieb des Lautsprecherverstärkers zeigte sich dessen erhebliche Empfindlichkeit gegenüber der Feldbeeinflussung eines benachbarten Mittelwellensenders (Feldstärke ca. 0,5V/m).

Es wurden stufenweise Teilentstörungen durchgeführt, die aber nicht den gewünschten Gesamterfolg zeigten.

Daraufhin wurde ein Abschirmgehäuse auch für den sicheren Betrieb von Lautsprecher- und Mikrofonverstärker vorgesehen.

Die praktische Umsetzung der theoretischen Überlegungen (Auskleidung der verwendeten Gehäusen mit metallisiertem Gewebe) wurde abschließend überprüft.

Die Anforderungen bei den vorgesehenen Feldstärken von 200V/m werden erfüllt.

15 Anlagen

15.1 Tabellen

f in MHz	P in W
2	74
5	75
10	72
20	63
30	62
40	56
50	50
60	44
70	44
80	46
90	41
100	34
110	35
120	38
130	37
140	39
150	36
160	32
170	31
180	42
190	48
200	44
210	47
220	42
230	34
240	29
250	32

Tabelle 7: zur Abbildung 5

f in MHz	P in W
200	73
210	81
220	78
230	68
240	81
250	61
260	65
270	82
280	77
290	71
300	74
310	70
320	71
330	63
340	62
350	54
360	50
370	51
380	36
390	49
400	42

Tabelle 8: zur Abbildung 6

f in MHz	P in W
400	7
420	13
440	10
460	16
480	24
500	9
520	6
540	9
560	7
580	6
600	8
620	10
640	14
660	16
680	21
700	35
720	23

Tabelle 9: zur Abbildung 7

740	16
760	17
780	11
800	6
820	8
840	8
860	12
880	12
900	11
920	17
940	13
960	8
980	13
1000	14
1020	4
1040	2
1060	0,7

f in MHz	E in V/m	E _{rech.} in V/m
2	378	405
5	384	408
10	372	400
20	353	374
30	340	371
40	327	352
50	323	333
60	317	313
70	305	313
80	317	320
90	295	302
100	269	275
110	276	279
120	290	291

Tabelle 10: zur Abbildung 8

130	287	287
140	292	294
150	289	283
160	255	267
170	249	267
180	335	306
190	314	327
200	350	313
210	294	323
220	252	306
230	269	275
240	305	254
250	284	267

f in MHz	E in V/m	E _{rech.} in V/m
200	415	403
210	404	424
220	402	416
230	390	389
240	440	424
250	313	268
260	397	380
270	448	427
280	430	414
290	417	397
300	397	406
310	404	394
320	406	397
330	335	374
340	334	371
350	302	346
360	305	333
370	297	337
380	249	283
390	297	330
400	301	306

Tabelle 11: zur Abbildung 9

f in MHz	E in V/m	E _{rech.} in V/m
400	131	125
420	145	170
440	140	149
460	155	188
480	211	231
500	148	141
520	129	115
540	174	141
560	163	125
580	181	116
600	199	133
620	211	149
640	213	176
660	205	189
680	226	216
700	245	279
720	174	226

740	157	188
760	138	194
780	110	156
800	89	115
820	82	133
840	78	133
860	85	163
880	87	163
900	86	156
920	137	194
940	131	170
960	111	133
980	179	170
1000	151	176
1020	80	94
1040	48	67
1060	30	39

Tabelle 12: zur Abbildung 10

f in MHz	maximale E in V/m	gedämpfte E in V/m
2	378	0,25
5	384	0,25
10	372	0,25
20	353	0,29
30	340	0,37
40	327	0,39
50	323	0,41
60	317	0,63
70	305	0,72
80	317	0,83
90	295	0,87
100	269	0,89
110	276	0,96
120	290	1,2
130	287	2,39
140	292	1,39
150	289	1,33
160	255	1,36
170	249	1,56
180	335	2,05
190	314	2,85
200	415	3,67
210	404	3,98
220	402	4,51
230	390	4,62
240	440	5,78
250	313	6,19
260	397	8,42
270	460	8,56
280	430	7,21
290	417	6,59
300	397	5,94
310	404	5,76
320	406	6,14
330	335	4,6
340	334	4,82
350	302	4,72
360	305	5,38
370	297	6,42
380	249	6,26
390	297	8,88
400	301	12,56

400	131	6,15
420	145	12,36
440	140	7,21
460	155	5,02
480	211	2,41
500	148	1,46
520	129	1,99
540	174	2,64
560	163	1,68
580	181	2,91
600	199	2,71
620	211	2,26
640	213	2,53
660	205	1,92
680	226	2,17
700	245	2,63
720	174	1,82
740	157	1,61
760	138	1,64
780	110	1,29
800	89	2,58
820	82	2,72
840	78	2,84
860	85	2,12
880	87	2,02
900	86	1,13
920	137	1,12
940	131	1,07
960	111	0,92
980	179	1,72
1000	151	3,14

Tabelle 13: zur Abbildung 55

f in MHz	a in dB	a in dB (dop. Schirmung)
2	63,59	66,44
5	63,73	66,5
10	63,45	65,87
20	61,71	63,72
30	59,26	61,07
40	58,47	60,12
50	57,93	59,3
60	54,03	55,86
70	52,53	55,36
80	51,64	54,03
90	50,61	59,03
100	49,61	58,76
110	49,17	51,79
120	47,66	52,47
130	41,6	56,9
140	46,45	58,67
150	46,74	58,09
160	45,46	57,5
170	44,06	55,88
180	44,27	52,22
190	40,84	47,46
200	40,05	48,14
210	39,32	46,07
220	38,54	44,05
230	39,77	46,38
240	40	45,33
250	39,91	49,33
260	33,46	48,81
270	34,61	49,85
280	35,51	48,92
290	36,03	48,59
300	36,5	48,57
310	36,92	47,57
320	36,41	48,31
330	37,25	45,89
340	36,22	43,69

350	35,71	44,68
360	35,07	43,79
370	32,98	41,93
380	31,99	40,8
390	29,03	37,62
400	27,59	36,43
420	26,57	32,77
440	21,39	33,15
460	25,76	39,24
480	29,79	43,68
500	38,84	42,65
520	40,12	44,48
540	36,23	43,08
560	36,38	40,43
580	39,74	47,54
600	35,88	49,33
620	37,32	49,96
640	39,4	52,94
660	40,57	45,33
680	38,51	41,78
700	40,57	46,42
720	40,35	43,52
740	39,38	43,74
760	39,61	41,89
780	39,78	42,04
800	38,5	42,45
820	38,62	42,76
840	30,75	38,54
860	29,58	34,76
880	28,77	36,64
900	32,06	36,56
920	32,68	41,65
940	37,63	42,55
960	41,63	43,17
980	40,35	44,73
1000	33,64	45,64

Tabelle 14: zur Abbildung 57

f in MHz	a in dB
300	24
320	26,5
340	30
360	25,8
380	28,2
401	25,9
420	26,3
440	29,5
460	35,4
480	43,8
500	43,4
510	43,2
530	49,7
540	42
560	39,3
580	38
600	47,3
630	48,2
670	44,3
700	50,9
720	47,4
740	43,8
760	45,6
800	28
820	27,3

840	26,7
860	31
880	38,4
900	38,2
930	33,7
970	31,4
1000	40,5
1100	32,1
1200	29,8
1300	34,1
1400	41
1500	45,4
1600	41,5
1700	39,6
1800	43,5
1900	37,8
2000	35,1
2100	29,7
2200	25,4
2300	23,2
2400	25
2500	30,6
2600	23,5
2700	24,6
2800	30,7
2900	31,7
3000	35,2

Tabelle 14: zur Abbildung 58

f in MHz	E offen	E abgedeckt
300	49,4	9,1
310	52	-0,3
320	52,5	0,6
330	55,8	-0,2
340	60,5	-1,6
350	62,1	-1,4
360	64	4,4
370	67	-2,4
380	66	-1,8
390	67,3	-0,8
400	65,5	3,8
410	66,5	4,8
420	65,7	14,7
430	64,7	19,1
440	65,2	16
450	65	13,2
460	63,7	7,8
470	64	9,6
480	63,8	12,6
500	59,6	12,2
510	56,2	11,2
530	57,4	3,2
540	60,1	13,2
560	61,3	2,8
580	60,6	3,2
600	61,3	5,2

610	61,5	5,2
630	63,4	5,9
640	61,7	6,2
650	55,8	6,8
670	47,1	6,2
680	46,8	6,2
690	46,6	8,4
710	50,4	8,2
730	50,9	8,6
740	50,6	10,4
750	49,6	12,2
770	48,6	8,3
790	47,1	7
800	46,1	7
820	51,5	6,8
830	51,7	6,9
850	51,6	7,1
860	52,7	7,3
870	51,8	7,5
890	48,9	7,7
910	49,9	7,9
930	53,5	8,6
970	55,6	10
980	55,6	10
990	55,6	10
1000	55,6	10

Tabelle 15: zur Abbildung 66

f in MHz	a in dB
300	40,3
310	52,3
320	51,3
330	56
340	62,1
350	63,3
360	59,6
370	69,4
380	67,8
390	68,1
400	61,7
410	61,7
420	51
430	45,6
440	45,2
450	51,8
460	55,9
470	54,4
480	51,2
500	47,4
510	45
530	45,2
540	46,9
560	58,5
580	57,4
600	56,1

610	56,3
630	57,5
640	55,5
650	49
670	40,5
680	40,6
690	38,2
710	42,2
730	42,2
740	40,2
750	37,4
770	40,3
790	40,1
800	39,1
820	44,7
830	44,8
850	44,5
860	45,4
870	44,3
890	41,2
910	42
930	44,9
970	45,6
980	45,6
990	45,6
1000	45,6

Tabelle 16: zur Abbildung 67

f in MHz	E in V/m
3	100
5	22,98
6	115,2
14	3,78
17	18,68
24	4,78
29	35,68
33	7,56
43	7,24
52	7,14
55	28,98
62	30,18
72	4,21
92	28,14
98	31,84
118	4,23
126	65,24
132	41,28
141	32,81
148	31,48
156	22,16
168	31,56
179	22,54
188	16,26
197	26,56
208	75,26

223	5,82
232	26,52
251	12,81
257	22,41
263	6,21
266	82,53
278	47,15
298	7,14
326	7,76
336	30,74
374	27,87
393	15,83
412	6,84
431	22,74
450	9,68
460	6,91
497	9,84
582	82,15
639	31,54
649	28,56
658	48,67
668	23,58
686	40,54
800	5,38
914	70,45
918	176,98

Tabelle 17: zur Abbildung 23

f in MHz	E in V/m
2	52
9,7	42
44	43
63	35
73,1	84
82,1	113
87	96
92	128
101	112
117	52
123	33
128	26
136	31
148	44
167	29
179	24
184,5	31
187	77
190	27
207	33
218,7	14
235	32
250	33
276	10
280	19
286	14
296	13
305	8
338	10
348	34
357	14
366	28

374	30
388	11
400	6
421	3,8
437	2,4
448	5,2
467	6
480,3	5,7
510,5	11
528	8
547	9
578	12
588	16
600	17
657	30
700	17
719	9
730	8,4
747	9,2
780	6,3
804	5,4
823	4,3
840	4,7
850	5
877	6,2
906	11
920	9
933	10
945	7
955	13,6
969	9

Tabelle 18: zur Abbildung 33

15.2 Technische Daten

Kamera 1

Bildsensor	1/3" DSP-Farb-Kamera
Bildpunkte	752 (H) * 582 (V) Pixel (sichtbar)
Auflösung	480 Linien horizontal
Empfindlichkeit	0,43 Lux refl. Licht
Stromversorgung	+ 12 VDC (11–35 VDC)

Kamera 2

Bildsensor	SONY 1/3" Super HAD CCD Sensor
Bildpunkte	NTSC: 510*492, PAL: 500*582 (H*V)
Auflösung	420 TV Linien
Mindestlichtstärke	0.05 LUX, F=1.2
Rauschunterdrückung	>48 dB
Elektronischer Auto-Shutter	NTSC: 1/60s~1/100,00s, PAL: 1/50s~1/110,000s. ON /OFF Switchable
Automatische Pegelkontrolle	High / Low schaltbar
Automatischer Weißabgleich	Ja
Gegenlicht-Steuerung	an / ausschaltbar
Flicker Less Modus	an / ausschaltbar
Video-Ausgang	1Vss / 75Ω
Spannungsversorgung	12V DC ± 10% ±
Stromaufnahme	120mA
Objektiv	F3.6mm / F2.0
Temperaturbereich	–10 Grad Celsius bis 50 Grad Celsius

Lautsprecherverstärker

Sinus-Dauer-Ausgangsleistung an $4\ \Omega$	3,2W ($U_B = 15V$) 2,05W ($U_B = 12V$) 0,97W ($U_B = 9V$)
Frequenzgang ($-3dB$)	30Hz bis über 100kHz
Klirrfaktor (bei 70% P_{max})	0,09%
Geräuschspannungsabstand	80dB ($U_B = 12V$)
Verstärkung	40dB (100fach)
Betriebsspannung	7V–15V

Lautsprecher

Nennbelastbarkeit	60W
Musikbelastbarkeit	100W
Übertragungsbereich ($-8dB$)	4000–22000Hz

Mikrofonverstärker

Betriebsspannung	12V–15V
Eingangsimpedanz	600 Ω
Verstärkung	40dB (100fach)

Mikrofon

Ausgangsimpedanz	600 Ω
Dynamisches System	ja

Alle angegebenen Informationen basieren auf Herstellerangaben.

15.3 Geräteliste

Emission – Funkstörfeldstärkemessung

Inv.-Nr	Gerätetyp	Bezeichnung	Hersteller	Serienr.
50031	Antennenmesskabel 10m	AK 9513	Schwarzbeck	ohne
50034	Antennenhltg/bikon.Antenne	VHBB 9124	Schwarzbeck	9124-0216
50035	Antenne/bikon. Elemente	BBA 9106, Paar	Schwarzbeck	ohne
50050	div. HF-Adapter	Adapter		ohne
50052	Messplatz	Freifeld 3/10	Reichl	ohne
50053	Antennenmast	Mast 1	Reichl	ohne
50054	Drehteller	Drehteller 1	Reichl	ohne
50061	LogPer- Meßantenne	VULP 9118-A(0,2-1,2GHz)	Schwarzbeck	VULP 9118 - A - 317
50097	Rahmenantenne	Rahmen II (3-30MHz)	Siemens	C-02-011
50098	Balun für Messrahmen	B I/II	Reichl	ohne
50130	Hornstrahler 0,7-6GHz	BBHA9120LF(A)	Schwarzbeck	1199
50126	Referenzstrahlungsquelle	KSQ	Schaffner	18269
50145	Messempfänger	SMR4518	Schaffner	013

Störfestigkeit gegen elektromagnetische Felder

Inv.-Nr	Gerätetyp	Bezeichnung	Hersteller	Serienr
50034	Antennenhltg/bikon.Antenne	VHBB 9124	Schwarzbeck	9124-0216
50035	Antenne/bikon. Elemente	BBA 9106, Paar	Schwarzbeck	ohne
50050	div. HF-Adapter	Adapter		
50051	Schirmraum	HF-Kabine 3	SIEMENS	ohne
50058	HF-Verstärker	ALPHA 250 / 75A	Dressler	9604011 A
50060	Leistungsdämpfungsglied	33- 3- 34	Weinschel	BA4425
50065	Leistungsverstärker	400-225-50-35	LCF Enterprises	151
50066	Leistungsverstärker	720F/1-60-428-001	Kalmus	7688-1
50069	Richtkoppler	RK 100	MEB	13052
50070	Power Meter	NRVS	Rohde & Schwarz	848062/0057
50071	Thermal Power Sensor	NRV-Z51	Rohde & Schwarz	848665/ 0011
50079	TEM-System	TEM 01	Reichl	
50080	HF-Generator	SMT03	Rohde&Schwarz	841733/025
50109	Last 50 Ω /25 W	1452-4	Weinschel	BH3257
50127	E-Feldsonde	HI- 6005	Holaday Ind.	

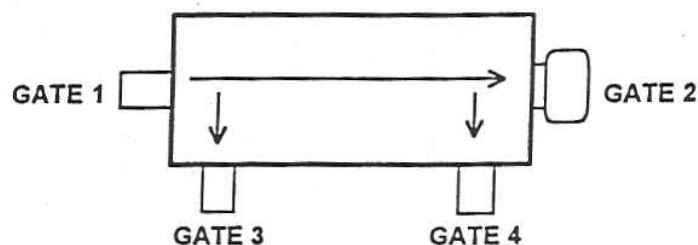
Allgemeine Labormessgeräte

Inv.-Nr	Gerätetyp	Bezeichnung	Hersteller	Seriennr.
50068	Labornetzteil	GP035-10	Takasago	9609008
50111	DC Probe	URV5-Z1	Rohde&Schwarz	
50138	Speicheroszilloskop 0,5GHz	9350 CL	LeCroy	13023
50146	Dämpfungsglied	BN745188/200W-30dB-2,2GHz	Spinner	03/93-1
50148	Terminierung	BN531714/5W-8GHz	Spinner	ohne

KNORR-BREMSE ELECTRONIC GMBH MEB PB MESSELEKTRONIK BERLIN MEB Messelektronik Berlin - Landsberger Allee 399 - 12681 Berlin - Germany 	
--	--

Directional Coupler RK100

Technical Data:	Frequency range	:	10kHz ... 1GHz
	Impedance	:	50Ohms
	Power max.	:	100Watts
	Insertion loss	:	< 0,7dB (gate 1 - gate 2)
	VSWR	:	< 1:1,15 (gate 1 - gate 2)
	Coupling factor	:	40dB +/- 1,5dB (gate 1 - gate 3) (gate 2 - gate 4)
	Directivity	:	> 20dB
	Cross talk attenuation	:	> 40dB (gate 3 - gate 4)
	Connectors	:	N male, N female
	FNR: 13052		



frequency [MHz]	0.01	0.1	30	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
insertion loss	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7
coupling factor													
gate1 to 3	41,4	40,5	40,5	40,7	40,9	41,0	41,1	40,8	40,6	40,4	40,0	39,5	39,0
gate2 to 4	41,3	40,8	40,7	41,0	41,0	41,2	41,2	40,9	40,6	40,3	39,9	39,3	38,9

08.02.97 Rel.

15.4 Literaturverzeichnis

- [1] Prof. Ermel: EMV- Skript Einführung und Grundbegriffe, 1999
- [2] Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten (EMVG), EMV-Zentrum Berlin- Brandenburg e.V., Berlin, 1998
- [3] A. Schwab: Elektromagnetische Verträglichkeit; Springer Verlag; 4. Auflage, Berlin, 1996
- [4] E. Habiger: Elektromagnetische Verträglichkeit; Hüthig Buch Verlag Heidelberg, 1992
- [5] D. Peier: Elektromagnetische Verträglichkeit: Problemstellung und Lösungsansätze; Hüthig Buch Verlag Heidelberg, 1990
- [6] Prof. Dr. –Ing. habil. Manfred Seifart: Analoge Schaltungen, 5.Auflage, Verlag Technik Berlin, 1996
- [7] U. Tietze, Ch. Schenk: Halbleiter- Schaltungstechnik, 6. Auflage, Springer- Verlag Berlin, 1983
- [8] <http://www.schirmung2000.de>
- [9] <http://www.elektrosmog.de>

16 Danksagung

Ich danke meinen Eltern für die nicht nur finanzielle Unterstützung meines Studiums.

Ich danke (Herrn Prof. Ermel, Herrn Ostmann (Schirmung 2000) und Herrn Reichl (Ing. Büro) für die Begleitung und freundliche Unterstützung meiner Arbeit.