



**Fachhochschule
Kaiserslautern**
University of Applied Sciences

Prof. Dr. Andreas Steil (FH Kaiserslautern)
Dipl.-Ing. (FH) Felix Schad (FH Kaiserslautern)
Mark Rosenbaum (TU Kaiserslautern)

Verträglichkeitsuntersuchungen zum
Verhalten von DRM120 und HD-RadioTM gegenüber
dem FM-Rundfunk, BOS-Funk und Flugfunkdiensten

Abschlussbericht

8. November 2007

Vorwort

Der vorliegende Bericht entstand in der Zeit von Mai bis Oktober 2007 als Abschluss zu einer Vielzahl von Messungen und Analysen, die sich allesamt um technische Fragestellungen rund um das derzeit viel diskutierte Vorhaben der „Digitalisierung des UKW-Bandes“ ranken. Der vorliegende Bericht legt den Fokus klar auf deren (mess)technische Beantwortung anhand etablierter und geltender Messvorschriften und -verfahren zur Ermittlung der sog. „Verträglichkeit“ zwischen einzelnen Funkdiensten. Die in diesem Bericht niedergeschriebenen Ergebnisse sollen ihren Beitrag dazu leisten, ein solides technisches Fundament zur Bewertung der diskutierten Verfahren zu erhalten; eine Basis, die es u.a. erlaubt, die anstehenden Versuchsabstrahlungen vorab fundiert zu beurteilen.

Es ist eine gute Tradition, das Vorwort dazu zu nutzen, all denjenigen zu danken, die zum Zustandekommen eines Werkes beigetragen haben. Mit dieser Tradition soll nicht gebrochen werden, denn die in diesem Bericht dokumentierten Ergebnisse sind nur durch das konstruktive Zusammenwirken vieler engagierter Beteiligter - Behörden, Institute, Firmen - gefunden worden. In erster Linie gilt der Dank der Landeszentrale für Medien und Kommunikation (LMK) Rheinland-Pfalz, die mit der FH Kaiserslautern seit nunmehr gut 3 Jahren eine intensive Zusammenarbeit zum Thema der Digitalisierung des UKW-Bandes pflegt. Zwischen FH und LMK findet eine rege, kontinuierliche technische Diskussion statt, eine wesentliche Grundlage für das Gelingen der hier vorgestellten Arbeit.

Besonderer Dank ergeht auch an alle, die sich aktiv in die technische Diskussion einbringen. Hier seien beispielhaft das Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen IIS, die Bundesnetzagentur (BNetzA), die Deutsche Flugsicherung (DFS), der Lehrstuhl für Nachrichtentechnik der TU Kaiserslautern, das Institut für Kommunikationstechnik der Universität Hannover und die T-Systems Business Services GmbH angeführt.

Dank gebührt aber auch allen, die durch zumeist kostenfreie Bereitstellung oder Leihgaben von Hard- und Software oder Lizenzen die Arbeiten in nicht unerheblichen Maße unterstützen. Beispielhaft seien hier der Südwestrundfunk (SWR), die ARD.ZDF medienakademie, die Polizei des Landes Rheinland-Pfalz, die Firma Coding Technologies, die Firma Rohde & Schwarz, die RuossAG, die Firma Microtones sowie die Firmen BMW und Bosch genannt.

Allen an dieser Arbeit mittel- und unmittelbaren Beteiligten sei an dieser Stelle - auch im Namen von Hr. Michael Feilen, Hr. Frank Bernhardt, Hr. Felix Schad und Hr. Mark Rosenbaum - für den fruchtbaren fachlichen Austausch ganz herzlich gedankt.

Kaiserslautern, im Oktober 2007

Andreas Steil

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	7
1.1. Ausgangslage und Motivation	7
1.2. Anmerkungen zur Ergebnisinterpretation	8
1.3. Ausblick	9
1.4. Zuordnung der dokumentierten Arbeiten zu Drittmittelvorhaben	9
1.5. Inhaltsübersicht	10
2. Zusammenfassung und Bewertung	11
3. Empfängerauswahl	13
3.1. FM-Rundfunk	13
3.2. BOS-Sprechfunk	13
3.3. Flugfunk	13
4. Gewollte Signale	15
4.1. UKW-Rundfunkdienst	15
4.1.1. Audioübertragung (Stereo)	15
4.1.2. RDS-Datendienst	16
4.1.3. Signalerzeugung	16
4.1.4. Störkriterien	16
4.2. BOS-Funkdienst	17
4.2.1. Signalerzeugung	17
4.2.2. Störkriterium	17
4.3. Flugfunk	18
4.3.1. Das ILS-System zur Unterstützung des Landeanfluges	18
4.3.2. Das VOR-System zur Flugnavigation	19
5. Störsignale	21
5.1. Dokumentation der verwendeten Signalspektren	21
5.2. FM-Rundfunkdienst	22
5.2.1. Signalerzeugung	22
5.2.2. Spektrumsmasken	23
5.2.3. Gemessenes Signalspektrum	23
5.3. DRM120	25
5.3.1. Systembeschreibung	25
5.3.2. Signalerzeugung	26
5.3.3. Spektrumsmasken	26
5.3.4. Gemessenes Signalspektrum	27
5.4. HD-Radio TM	28
5.4.1. Systembeschreibung	28
5.4.2. Signalerzeugung	30
5.4.3. Spektrumsmasken	30
5.4.4. Gemessenes Signalspektrum	32

6. Schutzabstandsmessungen	33
6.1. Allgemeines	33
6.2. Messaufbauten	34
6.2.1. FM-Rundfunk als Nutzsignal	34
6.2.2. BOS als Nutzsignal	35
6.2.3. VOR bzw. ILS als Nutzsignal	36
6.3. FM-Rundfunk als Störer	38
6.3.1. FM-Rundfunk vs. FM-Rundfunk	38
6.3.2. FM-Rundfunk vs. BOS-Sprechfunk	39
6.3.3. FM-Rundfunk vs. Flugfunk VOR	39
6.3.4. FM-Rundfunk vs. Flugfunk ILS Localizer	40
6.4. DRM120 als Störer	42
6.4.1. DRM120 vs. FM-Rundfunk	42
6.4.2. DRM120 vs. BOS-Sprechfunk	43
6.4.3. DRM120 vs. Flugfunk VOR	44
6.4.4. DRM120 vs. Flugfunk ILS Localizer	46
6.5. HD-Radio TM als Störer	49
6.5.1. HD-Radio TM vs. FM-Rundfunk	49
6.5.2. HD-Radio TM vs. BOS-Sprechfunk	50
6.5.3. HD-Radio TM vs. Flugfunk VOR	51
6.5.4. HD-Radio TM vs. Flugfunk ILS Localizer	53
7. Vergleich der Messergebnisse	54
7.1. Schutz des FM-Rundfunks	54
7.2. Schutz des BOS-Dienstes / Schmalband FM-Signale	56
7.3. Schutz des Flugfunks (VOR)	57
7.4. Schutz des Flugfunks (ILS Localizer)	58
8. Analyse DRM120 vs. FM	59
8.1. Einleitung	59
8.2. Klassifizierung	59
8.2.1. Gleichkanal	60
8.2.2. Rauschbegrenzter Bereich	60
8.2.3. Übergangsbereich	62
9. Hörtests	66
9.1. Einleitung	66
9.2. Wirkung der Störsignale	67
9.2.1. Störungen durch FM-Signale	67
9.2.2. Störungen durch DRM120	67
9.2.3. Störungen durch HD-Radio TM	67
9.2.4. Allgemeine Beobachtungen	68
10. Intermodulationsmessungen	70
10.1. Allgemeines	70
10.2. Messaufbau und Ablauf der Messung	70
10.3. Verhalten gegenüber dem VOR-Dienst	72
10.4. Verhalten gegenüber dem ILS-Localizer-Dienst	72
Anhang	75
A. Liste der verwendeten Geräte	75
B. Liste der verwendeten Empfänger	separates Dokument

C. Spektren und Filterkurven
D. Schutzabstandsmessungen
E. Intermodulationsmessungen

separates Dokument
separates Dokument
separates Dokument

Literaturverzeichnis	77
Abbildungsverzeichnis	79
Tabellenverzeichnis	81

1. Einführung

1.1. Ausgangslage und Motivation

Im Rahmen der angestrebten Umstellung des UKW-Bandes auf Übertragungsverfahren mit digitaler Modulation (umgangssprachlich als „Digitalisierung des UKW-Hörfunks“ bezeichnet) werden derzeit insbesondere zwei Kandidaten als Systemvorschläge diskutiert:

- „DRM+“: Das System DRM+ stellt die Erweiterung des bereits existierenden offenen ETSI-Standards DRM auf den Frequenzbereich bis 120 MHz dar. In dieser Erweiterung werden alle Aspekte, die für den Einsatz im UKW-Band wichtig sind, berücksichtigt. DRM+ verfolgt den Ansatz, einen bestehenden UKW-FM-Sender auf einer gegebenen Frequenz auf einen UKW-DRM+-Sender umzustellen, d.h. das FM-Signal rasterkonform durch ein COFDM-Signal zu ersetzen. Zu Beginn der hier dargestellten Untersuchungen standen die genauen Parametersätze des DRM+-Systems noch nicht fest. Aus diesem Grund basieren die hier vorgestellten Untersuchungen auf einem als „DRM120“ bezeichneten System, dessen abgestrahltes COFDM-Signal demjenigen von DRM+ sehr ähnlich ist. Das System DRM120 wurde auf der Basis der Vorstudie [Ber05] zur Digitalisierung des UKW-Rundfunks, welche die FH Kaiserslautern im Auftrag der TKLM angefertigt hatte, von der FH Kaiserslautern und der TU Kaiserslautern gemeinsam Ende 2005/Anfang 2006 spezifiziert und von der FH Kaiserslautern senderseitig implementiert. Aufgrund der Ähnlichkeit des ausgesendeten Signals steht DRM120 in diesem Bericht synonym für DRM+.
- „HD-RadioTM“: HD-RadioTM ist ein von der US-amerikanischen Firma Ibiquity entwickeltes System, bei dem der Senderbetreiber die Wahl zwischen einem hybriden Betrieb - also der gemischten, gleichzeitigen Übertragung seiner Inhalte mit einer analogen Modulation sowie einem COFDM-Verfahren - und einem volldigitalem Betrieb, der nur die COFDM-Modulationsart einsetzt. Ein bestehender UKW-Sender kann mit HD-RadioTM „aufgerüstet“ werden. Neben der analogen Ausstrahlung der Inhalte wird durch COFDM-Verfahren die digitale Übertragung weiterer Inhalte möglich. Hierbei sei angemerkt, dass der Inhalt des „ersten“ digitalen Programms immer identisch ist mit demjenigen der analogen Ausstrahlung.

Für beide Systemvorschläge sollen bald möglichst Versuchsausstrahlungen stattfinden. Dieser Wunsch wirft die wichtige Frage nach der Verträglichkeit mit den derzeit bestehenden Funkdiensten (senderseitig: Masken, empfängerseitig: Schutzabstände) auf. Solche Verträglichkeitsbetrachtungen sind zum Schutz dieser Dienste unerlässlich und sind für die Bundesnetzagentur (BNetzA) – in ihrer Funktion als Frequenzregulierungsbehörde – Voraussetzung zur fundierten Bewertung, ob eine Versuchslizenz erteilt werden kann oder nicht. Der vorliegende Bericht dokumentiert die von der FH Kaiserslautern und der Bundesnetzagentur durchgeführten Schutzabstandsmessungen für die digitalen Rundfunksysteme DRM120 und HD-RadioTM. Die von diesen Rundfunksystemen ausgestrahlten Signale – nachfolgend als Störsignale bezeichnet – werden detailliert hinsichtlich ihres Interferenzpotentials gegenüber den bestehenden Funkdiensten

- BOS-Funk / Schmalband-FM
- FM-Rundfunk inkl. RDS
- Flugnavigationsfunk: VOR und ILS (nur Localizer)

untersucht und bewertet.

Der vorliegende Bericht gibt ausführlich Antwort auf die Frage nach der Verträglichkeit und stellt unter anderem die Grundlage für die Zuteilung einer Versuchsfunklizenz dar. Weiterhin ermöglichen es die hier dokumentierten Ergebnisse, Antworten zu weiterführenden technischen Fragen abzuleiten, als da beispielsweise wären:

- Ist die Migration vom analogen zum digitalen UKW-Rundfunk gleitend (stückweise Umstellung der Sender) oder hart (komplette Umstellung der Senderlandschaft zu einem einheitlichem Starttermin) möglich?
- Welche Beschränkungen bzw. Besonderheiten sind mit den evtl. Versuchsfunklizenzen verbunden?
- Können die bisherigen Planungsraster eingehalten werden?
- Welche Planungsrichtlinien sind für den Sendernetzaufbau anzuwenden?

An dieser Stelle sei abschließend angemerkt, dass „FMExtraTM“ hier nicht in die Untersuchung mit einbezogen wurde. Dies liegt daran, dass FMExtraTM oberhalb des RDS-Trägers bei 57 kHz ein digitales Signal in den FM-Multiplex integriert. Dieser Signalanteil trägt nur wenig zur Leistung des FM-Multiplex bei, er liegt ca. 8 dB unter der RDS-Leistung. Das ausgesendete Signal ist somit dem eines „klassischen“ FM-Signals sehr ähnlich, solange die zulässige FM-Multiplexleistung nicht überschritten wird. In diesem Fall ist davon auszugehen, dass ein mit FMExtraTM aufgerüsteter UKW-Sender eine vergleichbare Störwirkung hat wie ein UKW-Sender ohne FMExtraTM. DAB wurde auch nicht betrachtet: Das Sendesignal von DAB ist mit einer Bandbreite von ca. 1,5 MHz im Vergleich zum UKW-Raster viel zu breitbandig. Eine Koexistenz DAB/FM im UKW-Band erscheint alleine schon aus diesem Grund unmöglich.

1.2. Anmerkungen zur Ergebnisinterpretation

Alle in diesem Bericht vorgestellten Messergebnisse wurden auf der Basis geltender technischer Richtlinien, Messverfahren und technischer Kriterien bestimmt. Dieser Ansatz – der auf Objektivität und Reproduzierbarkeit abzielt – ist aus Sicht der Autoren unabdingbar, um die Ergebnisse mit anderen Messungen vergleich- und abstimmbare zu machen. Die Auswahl der vermessenen Empfänger kann im Falle von BOS und FM als – überwiegend – repräsentativ betrachtet werden. Lediglich im Falle des Flugfunkes stand nur ein Empfänger zur Verfügung, so dass die Ergebnisse nur als erster Anhaltswert dienen können.

Die Autoren dieses Berichts sind sich darüber im Klaren, dass die Bewertung anhand rein technischer Kriterien und Maßzahlen unter Umständen ein anderes Ergebnis als eine subjektive Bewertung liefern kann, es sozusagen eine gewisse Diskrepanz zwischen normgerechter Messung einerseits und „gehörter Wirklichkeit“ andererseits geben kann. Ein Beispiel aus dem Bereich der Messung der FM-Schutzabstände soll dies verdeutlichen: Auf der einen Seite wird eine Verringerung des gemessenen FM-Schutzabstands verzeichnet, auf der anderen Seite tritt in der FM-Empfangssituation keine subjektive Verschlechterung ein. Grund dafür kann z.B. sein, dass das verwendete Audiomaterial aufgrund der für FM typischen Dynamikkompression diese Verschlechterung – subjektiv – gar nicht zur Wirkung kommen lässt: Die vermeintliche Diskrepanz lässt sich oftmals erklären, ist aber zuweilen schwer zu ergründen und – anschaulich – schwer zu vermitteln. In diesem Sinne sollten nach Meinung der Autoren objektive Messwerte und deren Aussage einerseits und der subjektive (Hör)Eindruck andererseits sehr wohl auseinandergehalten werden, es sind schlicht „zwei verschiedene Paar Schuhe“. Aus diesem Grund liegt dem Bericht eine CD mit Audio-Samples bei, die im Falle der FM-Schutzabstände eine individuelle, subjektive Bewertung und Einordnung der nüchternen Zahlen und Kurven ermöglichen sollen.

1.3. Ausblick

Auf Basis der hier dargestellten Ergebnisse halten die Autoren es für sinnvoll, Versuchslizenzen für beide Systeme zu erteilen, damit umfangreiche Versuchsausstrahlungen vorgenommen werden können. Diese Ausstrahlungen müssen durch umfangreiche Messkampagnen begleitet werden mit dem Ziel, die hier vorgestellten Labormessungen nicht einfach nur abzurunden, sondern zu ergänzen: Die Labormessungen erfassen immer nur die Störwirkung durch ein Störsignal, während in der realen Empfangssituation viele Störeinflüsse im Empfängereingang „sichtbar“ sind und eine resultierende Störwirkung bewirken. Erst wenn Messungen im realen Empfangsfall vorliegen, lassen sich abschließend verlässliche Planungsgrundlagen erarbeiten.

Die FH Kaiserslautern beabsichtigt daher, einen Feldversuch mit DRM+ durchzuführen. Eine Versuchsfrequenz hierfür ist bereits beantragt und koordiniert (87,6 MHz). Die Versuchslizenz wurde am 29.10.2007 erteilt. Die Sendesoftware Spark ist so erweitert worden, dass ein DRM+-konformes Signal in Echtzeit erzeugt und abgestrahlt werden kann. Um auch die Empfangssituation des DRM+-Empfängers im UKW-Band zu erfassen, wird ein Empfängerprototyp benötigt. Hier steht die FH Kaiserslautern in engem Kontakt mit Dritten, die sich mit dieser Thematik beschäftigen. Die FH Kaiserslautern arbeitet derzeit an der Konzeption der nötigen Messkampagnen.

Das derzeit gültige Messverfahren basiert auf einem hohen Wert für das nötige Signal-zu-Geräuschverhältnis des demodulierten Audio-Signals, was aus zwei Gründen Anlaß dazu gibt, über alternative Messverfahren nachzudenken: Erstens kann dieser Wert in vielen FM-Ausstrahlungen allein deshalb nicht erreicht werden, weil die senderseitige Dynamikkompression des Audiosignals dies schlicht verhindert. Dies trifft um so mehr zu, je höher die Kompression des Audiosignals senderseitig eingestellt wird. Zweitens können eine Vielzahl der im Feld eingesetzten Empfänger diesen Wert nicht erreichen, weil sie – schlicht gesagt – „einfach zu schlecht“ sind. Ein Teil der im Markt befindlichen Empfänger kann somit per Definition nicht in den ermittelten Schutzabständen erfasst sein. Die FH Kaiserslautern möchte daher neue Ansätze zur Ermittlung der Verträglichkeit im UKW-Band entwickeln, konkret ausprobieren, analysieren und hinsichtlich der Vergleich- und Übertragbarkeit mit bzw. auf das derzeit übliche Verfahren bewerten. Diese neuen Ansätze sollen ebenfalls im Rahmen der Messkampagnen verifiziert werden, soweit dies möglich ist, und ggf. in die Planungsgrundlagen einfließen.

1.4. Zuordnung der dokumentierten Arbeiten zu Drittmittelvorhaben

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen von Kooperationen (Drittmittelverträge und Praxissemester) zwischen FH Kaiserslautern und LMK/TKLM erarbeitet. Der vorliegende Abschlussbericht beinhaltet Ergebnisse von Untersuchungen, welche im Rahmen folgender Verträge durchgeführt wurden:

- Drittmittelvertrag mit der Landeszentrale für Medien und Kommunikation (LMK) Rheinland-Pfalz aus dem Jahr 2006 zu Schutzabstandsmessungen zwischen DRM+ und UKW-FM im Labor zur Vorbereitung eines praktischen Feldversuchs in Kaiserslautern.
- Drittmittelvertrag mit der Landeszentrale für Medien und Kommunikation (LMK) Rheinland-Pfalz aus dem Jahr 2007 zu Messungen von DRM+ gegenüber anderen benachbarten Funkdiensten (oberhalb und unterhalb des UKW-Bereichs) zur Vorbereitung eines praktischen DRM+-Feldversuchs in Kaiserslautern.
- Drittmittelvertrag mit der Technischen Kommission der Landesmedienanstalten (TKLM) unter Federführung der LMK aus dem Jahr 2007 zu Schutzabstandsmessungen zwischen HD-RadioTM und UKW-FM sowie gegenüber BOS-Funkdiensten (unterhalb des UKW-Bereichs) und Flugfunkdiensten (oberhalb des UKW-Bereichs) im Labor.
- Praktikum von Herrn Mark Rosenbaum (TU Kaiserslautern) in der LMK im Jahr 2007 zum Aufbau einer Messanordnung im Labor für Schutzabstandsmessungen zwischen DRM+ und UKW-FM.

1.5. Inhaltsübersicht

Der vorliegende Bericht gliedert sich wie folgt:

- Kapitel 1 führt in die Thematik und die Rahmenbedingungen ein.
- Kapitel 2 fasst die Ergebnisse des Berichts zusammen.
- Kapitel 3 gibt einen Überblick über die verwendeten Empfänger.
- Kapitel 4 stellt die zu schützenden Nutzsignale dar, die von den Testaussendungen gestört werden könnten.
- Kapitel 5 erläutert die Eigenschaften der untersuchten digitalen Rundfunksysteme, die die Störsignale abstrahlen.
- Kapitel 6 beschreibt detailliert die durchgeführten Messungen, aufgeschlüsselt nach individuellem Dienst und individuellem Störsignal.
- Kapitel 7 führt die Ergebnisse aus Kapitel 6 zusammen und diskutiert ausführlich die Wirkungen der jeweils untersuchten Störsignale auf die zu schützenden Dienste.
- Kapitel 8 erklärt mit weiteren Messungen das Verhalten von FM-Empfängern beim Empfang von DRM120-Störsignalen.
- Kapitel 9 demonstriert anhand von Hörtests mit einem realem, komprimiertem Audiosignal die Störwirkungen der untersuchten Systeme auf den FM-Rundfunkempfang.
- Kapitel 10 dokumentiert die Messungen der Störung durch Intermodulationen, die von im UKW-Band ausgestrahlten Signalen in einem Flugfunkempfänger hervorgerufen werden.

Aufgrund ihres Umfangs sind die Anhänge mit Ausnahme von Anhang A zur Zuordnung der verwendeten Geräte in den Abbildungen als separates Dokument diesem Bericht beigelegt.

2. Zusammenfassung und Bewertung

DRM120

Der vorliegende Bericht zeigt, dass DRM120 gegenüber den dem UKW-FM-Band benachbarten Funkdiensten – unter der Voraussetzung geeigneter Filterung am Senderausgang – prinzipiell das gleiche, wenn nicht sogar ein geringeres Störpotential im Vergleich zur heutigen Situation aufweist. Im Falle des BOS-Funks sind die Störungen durch DRM120 und einen FM-Störer vergleichbar. Gegenüber den Flugfunkdiensten ist bei kleinen Frequenzabständen das Interferenzpotential von DRM120 wesentlich geringer im Vergleich zu demjenigen eines FM-Störers. Mit entsprechender Filterung ist die Störwirkung von DRM120 und FM bei großen Frequenzabständen vergleichbar.

Innerhalb des UKW-Rundfunkbandes ist das Störpotential eines DRM120-Signals auf den FM-Stereoempfang in manchen Frequenzbereichen höher im Vergleich zur herkömmlichen Störung durch einen FM-Störer. Für Frequenzabstände kleiner als ± 300 kHz wirkt das DRM120-Signal wie ein FM-Störer. Bei größeren Frequenzabständen hängen die Schutzabstände allerdings von der Güte des einzelnen Empfängers ab; es wurden Streuungen von bis zu 25 dB gemessen. Es gibt Empfänger, bei denen das DRM120-Signal keinerlei Probleme verursacht, bei anderen kann dies nicht garantiert werden. Die empfängerseitigen Probleme resultieren hierbei aus der Kombination von (für DRM120) mangelhafter Vorselektion und Großsignalfestigkeit und bewirken durch Intermodulation im Frequenzbereich von ± 300 kHz bis ca. ± 2 MHz eine vom jeweiligen Empfänger abhängige Verschlechterung des Schutzabstands. Störsignale, die durch die Vorselektion unterdrückt werden, beeinflussen den Schutzabstand nicht negativ. Für Frequenzabstände $> \pm 2$ MHz scheint das Einhalten der Schutzabstandskurven durch geeignete Filterung der unerwünschten Nebenaussendungen des Senders problemlos möglich.

Die Messungen des Verhaltens des RDS-Dienstes haben gezeigt, dass dieses Verfahren gegenüber den COFDM-basierten Verfahren sehr robust ist. Da die für den FM-Audiodienst notwendigen Schutzabstände wesentlich höher sind als diejenigen für den RDS-Dienst, ist keine Störung dieses Dienstes zu erwarten. Dies deckt sich mit den Angaben auf [ITU02e], wo die gleiche Aussage für FM-Störer getroffen wird. Die Tendenz von DRM120 zur Erzeugung von Intermodulationen in Flugfunkempfängern ist geringer im Vergleich zu FM-Störern.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass bei DRM120/DRM+ trotz der Problematik der äußerst unterschiedlichen Qualität der UKW-Empfänger die Störwirkung auf die derzeitige interferenzbegrenzte UKW-Senderlandschaft beherrschbar erscheint: Der Verschlechterung des Schutzabstands steht eine im Vergleich zu FM deutlich verringerte DRM+-Sendeleistung gegenüber. Es erscheint möglich, ein etwa gleich großes Versorgungsgebiet bei nicht erhöhtem oder sogar geringerem Störpotential zu erzielen, jeweils im Vergleich zu FM. In wie weit dieser Austausch Schutzabstand – Sendeleistung in der Realität tatsächlich nutz- und umsetzbar ist, soll im Rahmen der Versuchsabstrahlung durch ausführliche Messkampagnen festgestellt und dokumentiert werden; ein Konzept hierfür wird derzeit erarbeitet.

HD-Radio™

Unter der Voraussetzung ausreichender Filterung am Senderausgang ist bei HD-Radio™ ein vergleichbares Interferenzpotential gegenüber dem BOS-Funk im Vergleich zu einem herkömmlichen FM-Störer zu erwarten. Gegenüber dem ILS- und VOR-Empfang ist das Störpotential allerdings wesentlich höher als ein FM- oder DRM120-Störer, wenn das Signal ab einer Frequenz von 107,5 MHz abgestrahlt

wird. Der Betrieb eines HD-RadioTM-Systems oberhalb von 107,7 MHz ist nicht möglich, da Teile des Spektrums in das Band der Flugfunkdienste hineinreichen würden. Somit sind die Kanäle 107,8 MHz und 107,9 MHz nicht durch HD-RadioTM belegbar. Bei entsprechend großen Frequenzabständen ist das Störpotential von HD-RadioTM vergleichbar mit einer Störung durch einen FM-Rundfunkdienst.

Innerhalb des FM-Rundfunkbandes produziert ein HD-RadioTM-Signal teilweise stärkere Störungen im Vergleich zu einem reinen FM-Störer. Diese höhere Störung betrifft den Empfang der benachbarten Kanäle in Frequenzabständen von ± 100 kHz bis ± 300 kHz. In diesem Bereich kann wegen des COFDM-Signals zum einen die bestehende Sendermaske für den FM-Rundfunk prinzipiell nicht eingehalten werden. Zum anderen verschlechtern sich die Schutzabstände in diesem Bereich bis zu ca. 20 dB. Außerhalb des Frequenzbereichs ± 300 kHz ist das Störpotential von HD-RadioTM ungefähr gleich dem eines reinen FM-Störers. In diesem Zusammenhang bleibt anzumerken, dass evtl. auftretende unerwünschte Nebenaussendung mit geeigneter Filterung soweit reduziert werden können, dass im Frequenzbereich $> \pm 300$ kHz die Planungskurve aus [ITU02a] eingehalten wird.

Die Messungen des Verhaltens des RDS-Dienstes haben gezeigt, dass dieses Verfahren gegenüber HD-RadioTM sehr robust ist. Da die für den FM-Audiodienst notwendigen Schutzabstände höher als diejenigen für den RDS-Dienst sind, ist keine signifikante Störung dieses Dienstes zu erwarten. Dies deckt sich mit den Angaben auf [ITU02e], wo die gleiche Aussage für FM-Störer getroffen wird. Die Tendenz von HD-Radio zur Erzeugung von Intermodulationen in Flugfunkempfängern ist mit derjenigen des FM-Rundfunks vergleichbar.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die Integration von Systemen wie HD-RadioTM in die bestehende interferenzbegrenzte UKW-Senderlandschaft nur unter Einschränkung der derzeitigen Versorgung möglich sein sollte. Diese liegt darin begründet, dass das COFDM-Signal leistungsmäßig an den FM-Träger gekoppelt ist: Rüstet man einen bestehenden analogen FM-Sender mit HD-RadioTM auf, dann muss zur Aufrechterhaltung des Versorgungsgebiets die FM-Trägerleistung beibehalten werden. Die ermittelten Schutzabstandskurven legen nahe, dass in diesem Fall in den angrenzenden Nachbarkanälen – die zum Versorgungsgebiet eines anderen FM-Senders gehören – Störungen in den Randbereichen anderer Versorgungsgebiete auftreten können. Ein Austausch Schutzabstand - Sendeleistung wie bei DRM120/DRM+ ist wegen der oben erwähnten leistungsmäßigen Kopplung im Falle einer Ausrüstung mit HD-RadioTM nicht möglich. Schlussendlich kann HD-RadioTM aufgrund seiner Bandbreite das verfügbare UKW-Band nicht komplett nutzen.

Subjektive Wahrnehmung der jeweiligen Störungen gegenüber dem FM-Rundfunk

Die in Kapitel 9 beschriebenen Hörtests dienen vor allem der subjektiven Bewertung der Größen „Schutzabstand“ und „Signal-zu-Geräuschverhältnis“. Daher ist eine Bewertung dieser Größen jeweils individuell vorzunehmen. Inwiefern die Labormessung mit einer realen Empfangssituation, in der mehr als nur ein Störeinfluss auf den Empfänger einwirkt, vergleichbar ist, ist an dieser Stelle zweitrangig. Im Vordergrund sollte stehen, wie sich – jeweils individuell – ein objektiv ermittelter Messwert in der subjektiven Wahrnehmung darstellt.

3. Empfängerwahl

3.1. FM-Rundfunk

Insgesamt standen 7 unterschiedliche Empfänger aus verschiedensten Quellen zur Verfügung. Dabei gab es Geräte aus den Kategorien

- Empfänger zum stationären Empfang (Mini-HiFi-Anlagen, UKW-Tuner höherwertigerer HiFi-Anlagen) (SE)
- Empfänger zum mobilen Empfang im KFZ (ME)
- Empfänger zum portablen Empfang mehrerer Funkbänder, „Weltempfänger“ (PE)

Rx	SE	ME	PE	Name
1	X			JVC CA-MX55RMB Hifi Rack
2		X		Blaupunkt Woodstock DAB54 Car Radio
3		X		Blaupunkt Hannover DAB Car Radio
4	X			Pioneer F229 Home Receiver
5		X		Blaupunkt Heidelberg RCM40 Car Radio
6			X	Grundig Satellit 700 Portable Radio
7		X		BMW Business RDS PH7850 Car Radio

Tabelle 3.1.: FM-Empfängertypen

Gerade bei den FM-Empfängern für den Massenmarkt bestehen große Qualitätsunterschiede. Da alle (ausser einem) Gerät die in [ITU02a] gegebene Schutzabstandskurve gegenüber dem FM-Rundfunk erfüllen, kann diese Auswahl als repräsentativ im Sinne dieser Planungsrichtlinie angesehen werden.

3.2. BOS-Sprechfunk

Im Rahmen dieser Meßkampagne wurden insgesamt 6 BOS-Transceiver von der „Zentralstelle für Polizeitechnik“ Rheinland-Pfalz zur Verfügung gestellt. Unter diesen waren sowohl mobile, stationäre als auch portable Geräte vorhanden. Sie können als eine repräsentative Auswahl aus den in Deutschland von den Sicherheitskräften verwendeten Geräte angesehen werden.

3.3. Flugfunk

Oberhalb des FM-Rundfunkbandes schliesst sich direkt der Frequenzbereich für Flugfunkdienste an. Innerhalb dieses Bandes zählen zu den direkt benachbarten Funkdiensten:

Navigation: 108,0 ··· 117,95 MHz: VOR (VHF-Omnidirectional Radio Range, Streckennavigation); Kanalraster: 200 kHz

Anflugverfahren: 108,1 ··· 111,95 MHz: ILS-Localizer (Instrumentenlandesystem, horizontaler Anteil); Kanalraster: 200 kHz

Kommunikation: 118,0 ··· 136,975 MHz: Sprechfunk Boden / Bord sowie Bord / Boden.

Die Funkverträglichkeitsparameter zwischen Rundfunk (UKW-FM) und Flugfunk sind dabei in den ITU-Recommendations [ITU95a, ITU95b] festgelegt.

Seit der Erweiterung des FM-Rundfunkbandes auf 108 MHz müssen alle Aeronautischen Empfangsgeräte strenge von der ICAO¹ vorgegebene Auflagen im Hinblick auf die Störsicherheit gegenüber dem FM-Rundfunk erfüllen. Die Großsignalfestigkeit dieser zertifizierten Empfänger bewegt sich innerhalb eines sehr schmalen Rahmens. Die Bandbreiten der Empfänger hingegen sind nicht verpflichtend festgelegt, so daß es hier naturgemäß zu Streuungen kommt. *Dennoch muß an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen werden, daß nur ein ILS- und VOR-Empfänger vermessen werden konnte. Im Hinblick auf die hohe Sensibilität der Flugfunkdienste kann aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nicht von einer allgemeinen Gültigkeit der Messreihen als Grundlage zu Zwecken der Frequenzkoordinierung bzw. Verträglichkeit der untersuchten Dienste ausgegangen werden. Insbesondere in Anbetracht des internationalen Flugverkehrs sind weitere, großangelegte Untersuchungen im entsprechendem Rahmen unerlässlich wenn ein Regelbetrieb der entsprechenden Funkdienste im UKW-Band angestrebt wird. Der Bedarf nach solchen Untersuchungen ist von der ICAO erkannt worden [ACPA04].*

Die Funkverträglichkeit der digitalen Modulationsformen zum Kommunikationsdienst wurde aufgrund der großen Frequenzabstandes nicht untersucht. Die Untersuchungen gegenüber dem VOR / ILS-Dienst – insbes. bei Anwendung einer entsprechenden senderseitigen Filterung – haben zwar gezeigt das kein schädliches Interferenzpotential in einer höheren Größenordnung im Vergleich zum UKW-Rundfunk erwartet werden kann, sollten jedoch nicht zu einer pauschalen Annahme der Unbedenklichkeit gegenüber dem Kommunikationsdienst verleiten.

¹ICAO, kurz: International Civil Aviation Organization

4. Gewollte Signale

In diesem Kapitel werden die gewollten, zu schützenden Nutzsignale dokumentiert. Es werden die Kernaspekte der jeweiligen Übertragungstechnik angerissen, die Signalerzeugung der jeweiligen Signalart vorgestellt und das Nutzspektrum dokumentiert.

4.1. UKW-Rundfunkdienst

Der UKW-Rundfunkdienst basiert auf dem analogen Übertragungsverfahren der Frequenzmodulation. Der grundlegende Aufbau des dabei übertragenen Signalspektrums ist in Abb. 4.1 dargestellt. Das gesendete Multiplexsignal besteht aus zwei Anteilen:

- der analogen, FM-modulierten Audioübertragung, s. Kapitel 4.1.1
- der digitalen, PAM-modulierten Übertragung von Zusatzinformationen, s. Kapitel 4.1.2

Innerhalb von Europa wird zur Funknetzplanung ein Kanalraster von 100 kHz verwendet.

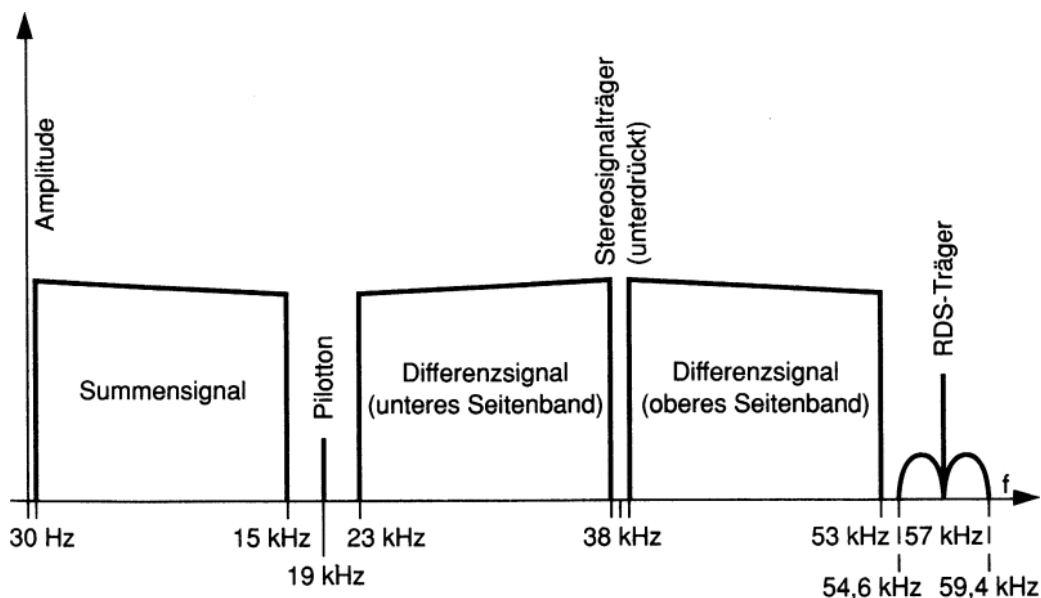


Abbildung 4.1.: Aufbau des Signalspektrums eines FM-Rundfunksenders bei stereophoner Audioübertragung im Basisband, aus: [BDH⁺96, S. 173]

4.1.1. Audioübertragung (Stereo)

Zur stereophonen Audioübertragung im UKW-Rundfunkdienst wird das Signal in ein Summenanteil (linker und rechter Kanal, L+R) und Differenzanteil (L-R) zerlegt. Ein Hochpaß mit einer Zeitkonstante von $50 \mu\text{s}^1$ hebt die Höhen an, da diese eine niedrigere Leistungsdichte als die Tiefen Anteile aufweisen und somit leichter bei der Übertragung gestört werden können. Dieses als Preemphase verwendete Verfahren verbessert den Signal-zu-Rauschabstand zusätzlich um 12 dB. Ein Tiefpaß begrenzt

¹in ITU-Region I

das Audiospektrum schließlich auf eine Bandbreite von $f_{nf} = 15 \text{ kHz}$. Zur Markierung des Summen- bzw. Differenzanteils wird ein sogenannter Pilotton von 19 kHz dem Signalmultiplex hinzugefügt. Zusätzlich werden dem Signalmultiplex noch erweiterte Informationen hinzugefügt, wie z.B. RDS (s.u.). Nach der Modulation entsteht somit bei einem Frequenzhub Δf_T von 75 kHz ein Signal mit einer HF-Bandbreite B (Näherung nach Carson, s. z.B. [Mäu88, S. 135]):

$$\begin{aligned} B &= 2(\Delta f_T + f_{S_{max}}) \\ B &= 2(75 \text{ kHz} + 59,4 \text{ kHz}) \\ B &= 268,8 \text{ kHz} \end{aligned}$$

4.1.2. RDS-Datendienst

Der RDS-Datendienst ist in [ITU02e] definiert. Mithilfe dieses Dienstes werden von den Sendeanstalten Zusatzinformationen übertragen. Zu diesen gehören u. a. die Senderkennung, Radiotext, Listen alternativer Senderfrequenzen, etc.

Das binäre Signal moduliert den 57 kHz-Subträger². Aus der Trägerfrequenz leitet sich die Taktfrequenz des Systems ab, die sich nach Teilung der Subträgerfrequenz durch den Faktor 48 zu 1187,5 bit/s ergibt. Die übertragenen Bits werden zu aus 104 Bit bestehenden Gruppen zusammengefasst. Jede Gruppe besteht dabei aus vier Blöcken von je 26 Bit. Zum Fehlerschutz bzw. zur Korrektur falsch empfangener Bits dient ein 10-Bit langes Wort auf Basis des CRC-Prüfverfahrens.

Besonders zu diesem Dienst ist anzumerken, daß er im allgemeinen erst dann als gestört anzusehen ist, wenn die Audioübertragung bereits schon lange unter Störungen leidet. Die Schutzabstände sind daher prinzipiell noch niedriger als die einer FM-Monoübertragung, s.a. [ITU02e, Abschnitt 2].

4.1.3. Signalerzeugung

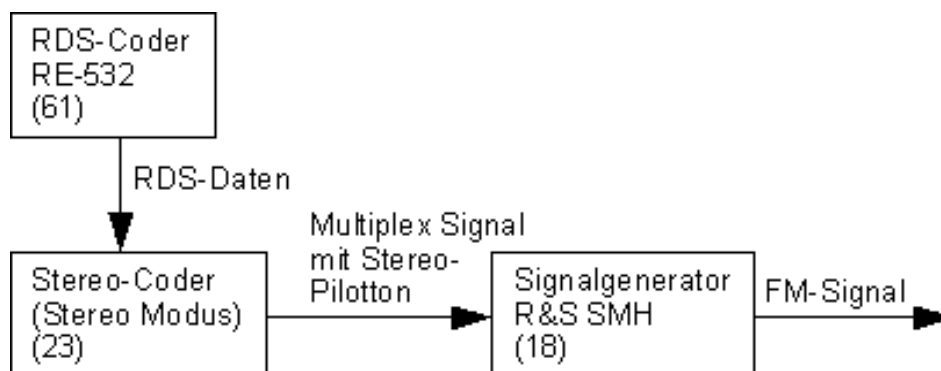


Abbildung 4.2.: Erzeugung des FM-Nutzsignals. Die Zahlenangaben in Klammern beziehen sich auf die Geräteliste in Anhang A.

Das RDS-Signal wird mittels eines dedizierten Generators der eine fixe Bitmusterfolge erzeugt über den Stereocoder in den Signalmultiplex eingebunden.

4.1.4. Störkriterien

4.1.4.1. Störkriterium Audioübertragung

Das Störkriterium für die FM-Audioübertragung ergibt sich aus der einschlägigen ITU-Richtlinie [ITU02d]. Demnach ist der Dienst dann als gestört zu betrachten, wenn im unmodulierten Fall der mit einem Filter gem. [ITU02b] gewichtete Signal-zu-Geräuschabstand S/N des übertragenen Audio-Signals von 56 dB auf 50 dB abgefallen ist.

Zur Definition des Referenzpegels wird das gewollte FM-Signal mit einem 500 Hz-Sinuston mit einem

²die dritte harmonische Oberwelle des 19 kHz-Pilottons

Hub von 75 kHz moduliert. Der (ungewichtete) Audiopegel wird mittels eines Psophometers gemessen und gibt die 0dB-Referenzmarke an. Im nächsten Schritt wird die Modulation aus- und das Gewichtungsfiter eingeschaltet. Am Psophometer kann nun das S/N abgelesen werden.

4.1.4.2. Störkriterium RDS-Dienst

Der RDS-Dienst gilt im Rahmen dieser Messreihe in dem Moment gestört in dem die ersten Bitfehler auftreten. Ab diesem Punkt steigt die Fehlerrate rapide an. Bis zu einem Totalausfall des Empfangs ist von diesem Punkt an noch ein kleiner Puffer, jedoch ist dieses Störkriterium im Sinne der messtechnischen Erfassung am eindeutigstem.

4.2. Funkdienst für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS)

Der behördliche Funkdienst nutzt zur Übertragung ein Schmalband-FM-Signal.

4.2.1. Signalerzeugung

Das gewollte BOS-Signal kann direkt mit dem Funkmessplatz R&S CMS48 erzeugt werden. Ausgangspegel und Frequenz sind frei variierbar.

4.2.2. Störkriterium

Die Signale digitaler Modulationsverfahren haben eine hohe Ähnlichkeit zu Rauschsignalen. Störungen, die im BOS-Empfänger hervorgerufen werden könnten, würden sich somit mit den folgenden Auswirkungen zeigen:

1. die Sprachqualität nimmt durch Hintergrundrauschen ab
2. die Rauschsperrre öffnet nicht, obwohl ausreichender Nutzsignalpegel vorhanden ist
3. die Rauschsperrre öffnet aufgrund der Präsenz des Störsignals, auch ohne Vorhandensein eines Nutzsignals

Der erste Effekt tritt in jedem Fall auf. Er wird in diesem Fall durch die Ermittlung des SINAD-Verhältnisses³ messtechnisch erfasst werden. Lt. [ftz] ist ein SINAD von 20 dB ausreichend, um eine bestimmte Prozentzahl ausreichend verständlicher Silben zu garantieren. Das SINAD wird mit einem CCITT-Gewichtungsfiter gemessen. Dieser hebt Frequenzen im Bereich um 500 Hz an und senkt die sehr hohen und sehr tiefen Frequenzen des Sprachspektrums stark ab. Dieser Störmechanismus wird im folgenden als „SINAD-Störung“ oder auch als „SINAD-Interferenz“ bezeichnet. Das Störkriterium gilt dann als nicht mehr erfüllt, wenn das Störsignal das SINAD auf einen Wert kleiner als 20 dB verschlechtert. Der Zielwert bei den Messungen, bei dem die HF-Pegelverhältnisse erfasst wurden war ein Wert von 19 dB.

Der zweite Effekt wird als „Rauschsperrreninterferenz“ bzw. „Squelch interference“ bezeichnet. Dieser wurde gemessen indem der Nutzsignalpegel soweit erhöht wurde, bis die Rauschsperrre reproduzierbar sicher öffnen konnte. Der Pegel des Störsignals wurde daraufhin immer weiter erhöht, bis das Nutzsignal die Rauschsperrre nur noch verzögert bzw. nicht mehr öffnete („delayed squelch“). Zur Prüfung der Gültigkeit der eingestellten Pegelverhältnisse wurde das Störsignal mehrmals an- und ausgeschaltet.

Das dritte Störkriterium (ungewolltes öffnen der Rauschsperrre, „Squelch opens“), wurde ohne das Vorhandensein eines Nutzsignals gemessen.

Abhängig von dem Aufbau des Empfängers tritt der zweite oder dritte Effekt auf. Beim Vergleich der verschiedenen Störeffekte sollte in Betracht gezogen werden, daß der zweite Effekt (squelch interference) die schlimmstmögliche Störung ist, da der Teilnehmer kann nicht feststellen kann, daß eine

³s. z.B [MS91, 118 ff.]

Störung vorliegt. Darüberhinaus ist es ihm nicht möglich zu bemerken, daß er angerufen wurde und hat somit auch keine Möglichkeit, den Sender um Wiederholung der Nachricht zu bitten (was bei der SINAD-Interferenz immer noch möglich wäre).

4.3. Flugfunk

An der Obergrenze des UKW-FM-Bandes beginnt der Frequenzbereich von zwei unterschiedlichen Flugfunkdiensten: VOR und ILS Localizer. Darüber beginnt bei 118 MHz der Bereich des Sprechfunkdienstes im Flugwesen, welcher aufgrund des großen Abstandes zum UKW-Band an dieser Stelle nicht weiter untersucht wurde. Gleiches gilt für weitere, in der Frequenz noch höher angeordnete Kommunikationsdienste.

4.3.1. Das ILS-System zur Unterstützung des Landeanfluges

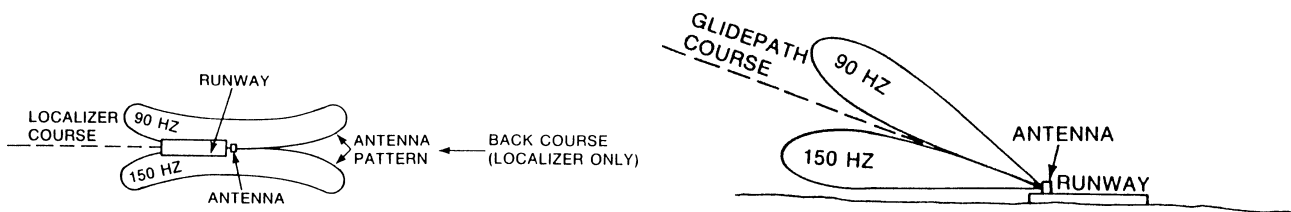


Abbildung 4.3.: Antennendiagramm des ILS-Localizers und ILS-Gleitpfadgebers, aus: [Roc]

Das Instrumentenlandesystem (kurz: ILS) besteht aus zwei Teilen: ein Teil gibt die horizontale Abweichung des Empfängers vom idealen Gleitweg an (ILS Localizer), der andere gibt diese Abweichung für den vertikalen Pfad an (ILS Glideslope). Beide Träger sind mit zwei Sinustönen von 90 Hz und 150 Hz amplitudenmoduliert. Die beiden einzelnen Töne werden von Antennen mit unterschiedlichen Abstrahlcharakteristika ausgesendet. Der in der Luft befindliche Empfänger vergleicht die empfangene Feldstärke beider Signalanteile. Wenn das Flugzeug sich genau auf dem idealen, vorgegebenen Gleitweg befindet sind die empfangenen Feldstärken jeweils gleich hoch. Ansonsten kann der Empfänger anhand der Feldstärkedifferenz die vertikale und horizontale Abweichung vom vorgegebenem Landeweg ermitteln.

Die für den Localizer und Glideslope verwendeten Frequenzen sind immer paarweise vergeben, befinden sich aber in unterschiedlichen Frequenzbereichen. Die Frequenzen für den Localizer sind die ungeraden 100 kHz-Schritte beginnend von dem niedrigstem Kanal 108,1 MHz. Die Frequenzen für den Glideslope-Dienst befinden sich im UHF-Band. Der niedrigste Kanal befindet sich auf der Frequenz 329,15 MHz. Da für diesen Anteil des ILS-Dienstes der spektrale Abstand zu Sendern im UKW-Rundfunkband sehr hoch ist, wurde er in dieser Messreihe nicht untersucht.

4.3.1.1. Signalerzeugung

[ITU95b] schreibt die bei Verträglichkeitsuntersuchungen anzuwendenden ILS-Sollsignale vor, welche bei den vorliegenden Messungen zur Anwendung kamen. Der Modulationsgrad der 90 Hz und 150 Hz-Töne ist dabei auf 20% festgelegt. Die nominelle Abweichung von dem idealem Gleitweg (DDM, Difference in Depth of Modulation) ist dabei auf 0,093 festgelegt. Das ILS-Nutzsignal kann direkt mit dem Signalgenerator R&S SME03 erzeugt werden.

4.3.1.2. Störkriterium

[ITU95b] definiert die bei Verträglichkeitsuntersuchungen anzuwendenden Störkriterien des ILS-Dienstes. Dieser gilt dann als gestört, wenn die Abweichung vom nominellen Kurs 7% der Gesamtskala bei einer nominellen Kursabweichung von 2/3 der Gesamtskala beträgt. Im Folgenden wird diese Störung als „Kursstörung“ bzw. „course interference“ bezeichnet.

Antenne zu. Beide Komponenten des VOR-Nutzsignals können direkt mit dem Signalgenerator R&S SME03 erzeugt werden.

4.3.2.2. Störkriterium

[ITU95a] definiert die bei Verträglichkeitsuntersuchungen anzuwendenden Störkriterien des VOR-Dienstes. Dieser gilt dann als gestört, wenn die Abweichung vom nominellen Kurs $0,3^\circ$ beträgt. Im Folgenden wird diese Störung als „Kursstörung“ bzw. „course interference“ bezeichnet.

Moderne Flugfunkempfänger, wie auch der in dieser Messreihe verwendete, arbeiten auf einer Digitalen Basis. Ihr Ausgangssignal besteht aus Datentelegrammen, die an den Bordcomputer versendet werden. Dieser stellt die empfangenen Daten auf den entsprechenden Anzeigeeinheiten dar. Um im digitalen Fall ein vergleichbares Störkriterium wie in [ITU95a] zu haben, definiert [ITU95b] die anzuwendenden Kriterien auf einer statistischen Basis. Der Mittelwert der empfangenen Daten soll demnach mit einer 95%-igen Wahrscheinlichkeit dem tatsächlich gesendeten Wert mit einer 5%-igen Standardabweichung (2σ) entsprechen. Bei dem VOR-Dienst entspricht dieser Rahmen einer Abweichung von $4,5 \mu\text{A}$ des Ablenkungsstroms bzw. $0,3^\circ$. Darüberhinaus wurde das Verhalten des sog. Flaggensignals beobachtet. Dieses tritt immer dann auf, wenn das Eingangssignal zu schwach oder zu gestört ist, um vom Empfänger ordnungsgemäß ausgewertet zu können. In diesem Fall wird der Pilot durch einen roten Indikator an der Kompassrose darauf aufmerksam gemacht, daß das Navigationssignal ungültig ist. Diese Störung wird im Folgenden als „Flaggenstörung“ bzw. „flag interference“ bezeichnet. Die Kursstörung tritt wesentlich früher als die Flaggenstörung auf. Daher ist sie das kritischere Störkriterium, insbes. da der Pilot keine Möglichkeit hat die Gültigkeit der Kursanzeige zu überprüfen (sofern er nicht noch über andere Instrumente besitzt).

5. Störsignale

In diesem Kapitel werden die verwendeten Störsignale erläutert. Es werden die Kernaspekte der jeweiligen Übertragungstechnik angerissen und die relevanten Spektrumsmasken dargestellt. Die Erzeugung des jeweiligen Signals wird dokumentiert und das resultierende Signalspektrum mit dem die eigentliche Schutzabstandsmessungen durchgeführt wurden in hoher Dynamik vermessen.

5.1. Dokumentation der verwendeten Signalspektren

Die Grenzwerte für unerwünschte Nebenausstrahlungen der Sender jenseits ihrer zugewiesenen Frequenz sind gewöhnlicherweise in den entsprechenden Standards definiert und dort als Spektrumsmasken verzeichnet. Im Fall von DRM120 wurde die Spektrumsmaske auf Basis von [Ber05] definiert, s. a. Kap. 5.3.3. Da der Anteil der unerwünschten Nebenausstrahlungen einen erheblichen Anteil auf die zu messenden Schutzabstände (insbesondere in den Nachbarkanälen) hat wurde darauf geachtet, die verwendeten Signalspektren sorgfältig zu dokumentieren.

Zur Messung der Restseitenbandstrahlung der Sender ist es notwendig die Meßdynamik eines herkömmlichen Signalanalysator wesentlich zu erhöhen, so daß die Aussendungen auch weit unterhalb des gewollten Nutzsignalpegels aufgenommen werden können. Aus diesem Grunde wurden die Spektren der Störsignale mit der in Abb. 5.1 dargestellten Messanordnung aufgenommen. Das dort verzeichnete Filter ist entweder ein Bandpass oder eine Bandsperre mit hoher Güte. Mit diesem wird das eigentliche Signal stark gedämpft bevor es dem Meßempfänger zugeführt wird. Auf diese Weise kann die Vorschaltdämpfung des Messempfängers verringert und somit der Dynamikumfang entsprechend gesteigert werden. Der Messempfänger wird dabei von dem Laptop aus gesteuert. Er tastet mit einer Meßbandbreite von 7,5 kHz das interessierende Frequenzband schrittweise ab. Die Werte werden im Laptop gespeichert.

Im ersten Schritt wird die Filterkurve aufgenommen. Danach wird das aufzunehmende Signal aufgezeichnet. Nach Korrekturrechnung der Meßbandbreite auf eine Bandbreite von 1 kHz und Überlagerung der beiden Wertepaare ergibt sich das tatsächliche Signalspektrum mit einem erfassbarem Dynamikumfang von ca. 85 dB. Die mit diesem Verfahren aufgenommenen Signalspektren sind in den Anhängen

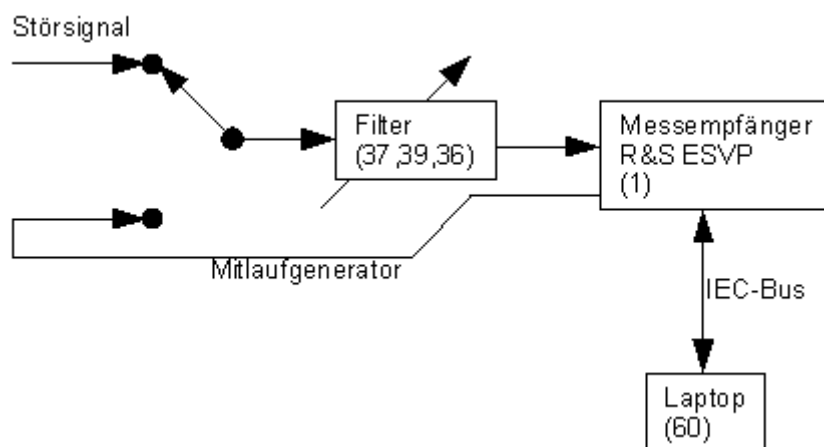


Abbildung 5.1.: Blockschaltbild zur hochdynamischen Vermessung der Signalspektren. Die Zahlenangaben in Klammern beziehen sich auf die Geräteliste in Anhang A.

dokumentiert.

5.2. FM-Rundfunkdienst

Zusätzlich zu den Angaben in Kap. 4.1 sind für die Betrachtung des Störpotentials eines solchen Signals folgende Ergänzungen notwendig:

Der Hub – und somit die Bandbreite – variiert im regulären Sendebetrieb innerhalb der gegebenen Grenzen ständig. Würde zu messtechnischen Zwecken ein Signal erzeugt werden das dauerhaft die in [Eur06] definierten Grenzen der Spektrumsmaske ausschöpft, würde dies ein unrealistisches Bild im Sinne des Störpotentials gegenüber den Nachbarkanälen ergeben. Daher wird der Träger mit einem gemäß [ITU02c] gefärbtem Rauschsignal frequenzmoduliert. Die Details der Signalerzeugung zu Schutzabstandsmessungen sind in [ITU02d] gegeben. Entsprechend dieser Richtlinie wird der Träger des Störsignals im monophonen Betrieb durch das farbige Rauschen frequenzmoduliert, da dann der größtmögliche Störeffekt zum Tragen kommt.

5.2.1. Signalerzeugung

Das FM-Störsignal wird mit den in Abb. 5.2 dargestellten Aufbauten erzeugt. Zusätzlich wurde bei der Messreihe FM vs. ILS Localizer bzw. VOR ein FM-Sender der Firma Itelco verwendet.

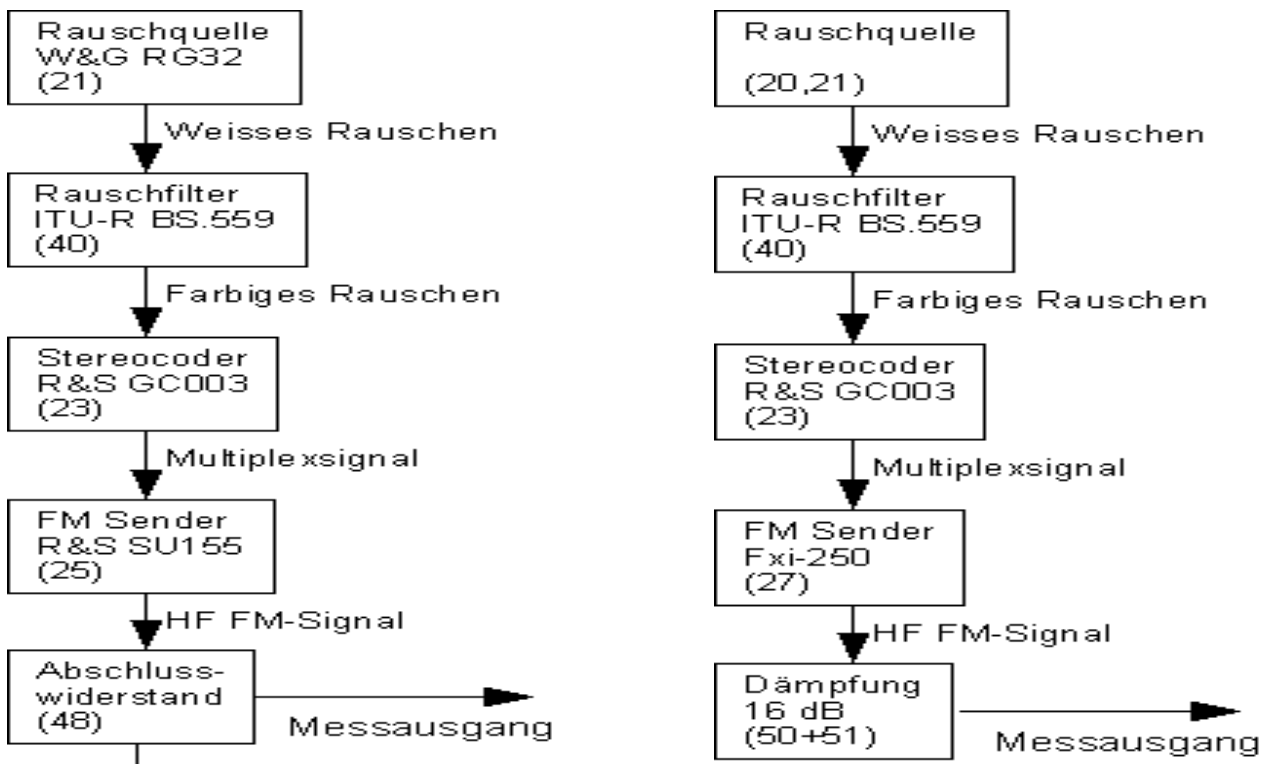


Abbildung 5.2.: Erzeugung des FM-Störsignals. Die Zahlenangaben in Klammern beziehen sich auf die Geräteliste in Anhang A.

Der durch das farbige Rauschen erzeugte Hub wird gemäß [ITU02d] folgendermaßen eingestellt:

1. die Preemphase des Stereocoders wird ausgeschaltet.
2. Der Sender wird mit einem Sinuston von 500 Hz angesteuert. Dessen Pegel wird solange erhöht, bis ein Hub von ± 32 kHz erreicht ist.
3. Das Gewichtungsfiter des Psophometers wird ausgeschaltet.
4. Die NF-Eingangsspannung des Stereocoders wird mit dem Psophometer gemessen.

5. Der Sinusgenerator wird durch einen Rauschgenerator inkl. des Rauschformfilters gem. [ITU02c] ersetzt.
6. Der NF-Pegel wird solange erhöht, bis die gleiche Spitzenspannung am Eingang des Stereocoders im Vergleich zu der Sinusaussteuerung erreicht ist.
7. Die Preemphase des Stereocoders wird eingeschaltet.

Das am Ende dieser Prozedur erzeugte FM-Signal hat (ohne Einfluß der Preemphase) einen quasi-Spitzenhub von ± 32 kHz. Dieser wird durch das vorschriftmäßige Zuschalten des Preemphasenetzwerks zusätzlich erhöht. Dieses Störsignal simuliert lt. [ITU02d] die Sendung von unkomprimierten Rundfunkprogrammmaterial.

Bei den Messungen gegenüber den Flugfunkdiensten VOR / ILS Localizer wird gemäß [ITU95b] der FM-Störsender im Stereomodus betrieben. Beide Audiokanäle werden mit farbigem Rauschen moduliert, wobei das Signal auf dem linken Kanal um 6 dB (halbe Spannung) geringer im Vergleich zum rechten Kanal ist. Der Frequenzhub des FM-Signals beträgt 32 kHz mit einer Preemphase von 50 μ s. Das resultierende Störspektrum ist in im folgendem Abschnitt in Abb. 5.5 dargestellt.

5.2.2. Spektrumsmasken

Die für den FM-Rundfunk relevante Spektrumsmaske ist in [Eur06] definiert und in Tab. 5.1 tabelliert sowie in der untenstehenden Abb. 5.3 grafisch dargestellt. Darüberhinaus ist die Spektrumsmaske für den FM-Rundfunk des US-amerikanischen Regulierungsbehörde FCC [Com05] eingetragen. Im Unterschied zu dem europäischen Planungsraaster wird dort ein 200 kHz-Raster verwendet.

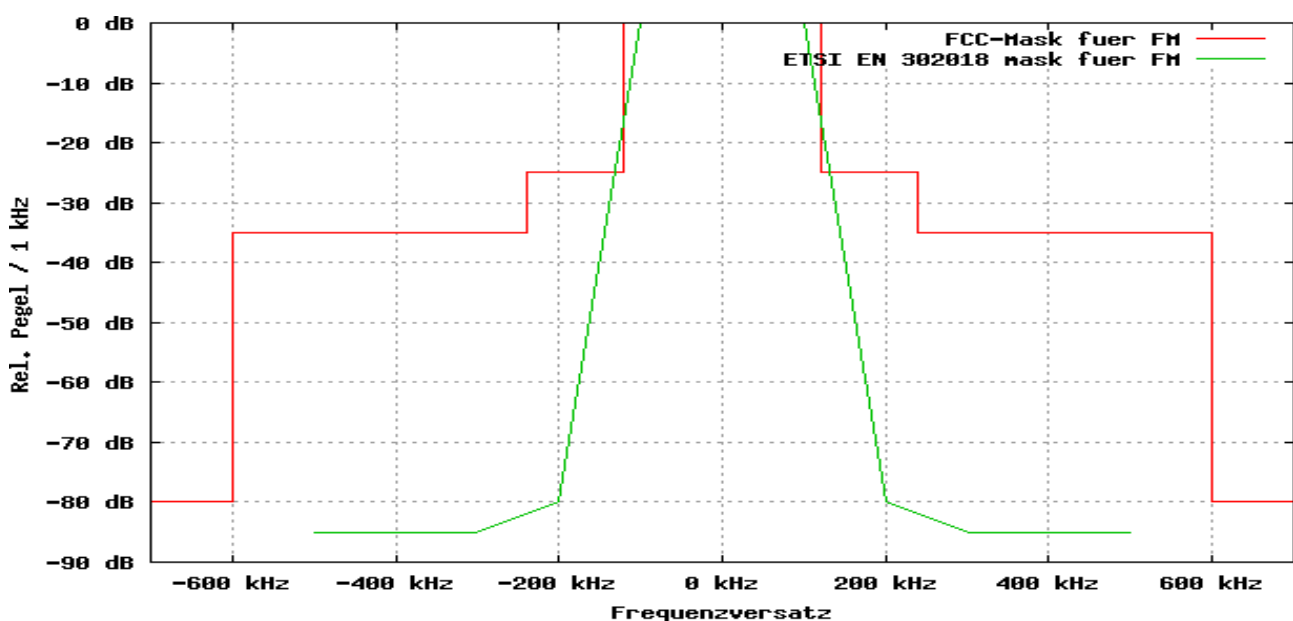


Abbildung 5.3.: Spektrumsmasken für den FM-Rundfunk, jeweils für ITU-Region I und II

5.2.3. Gemessenes Signalspektrum

Das resultierende Spektrum des auf diese Weise simulierten FM-Rundfunksignals ist in Abb. 5.4 dargestellt. Der Spitzenwert des Signals ist 15,5 dB unterhalb der Trägerleistung, gemessen bei einer Empfängerbandbreite von 1 kHz.

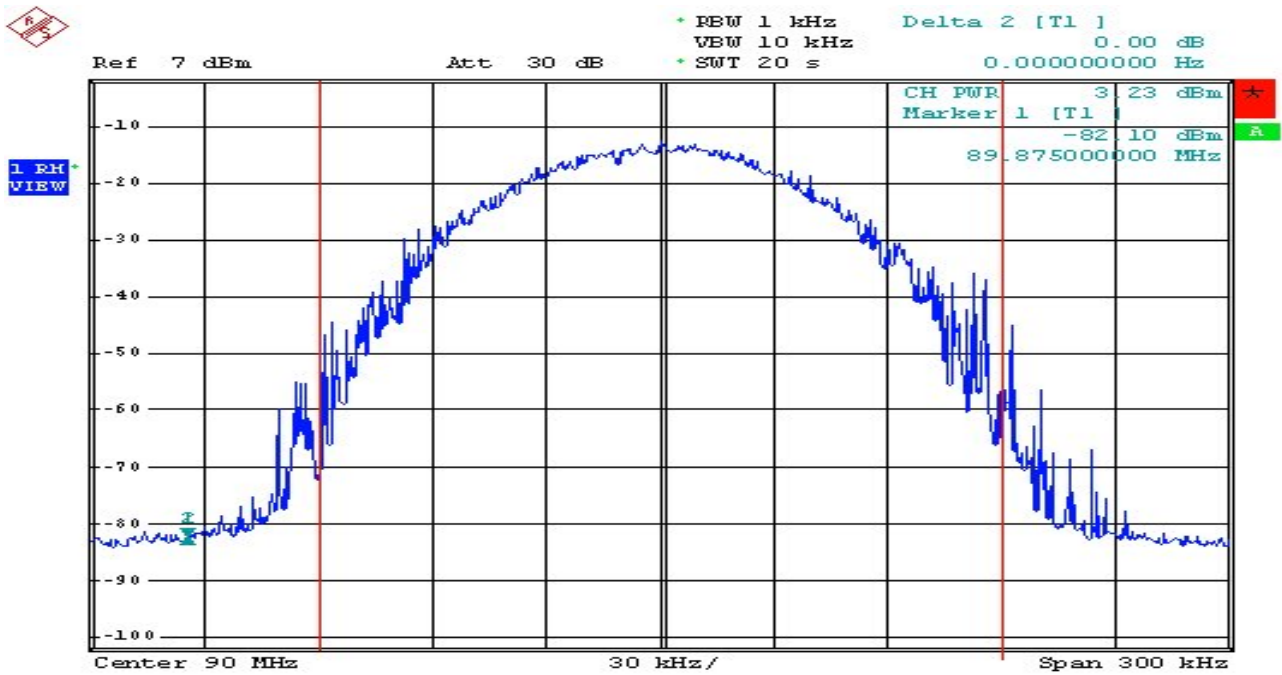


Abbildung 5.4.: Spektrum des FM-Störsignals (Messdetektor: RMS-Detektor)

Da bei den Messungen gegenüber den Flugfunkdiensten VOR bzw. ILS Localizer andere FM-Modulationsparameter verwendet werden müssen, ist das relevante Störspektrum gesondert in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Einstellungen des Spektrumanalyzers sind entsprechend den Abbildungen in [ITU95b, Abb. 3a] gewählt.

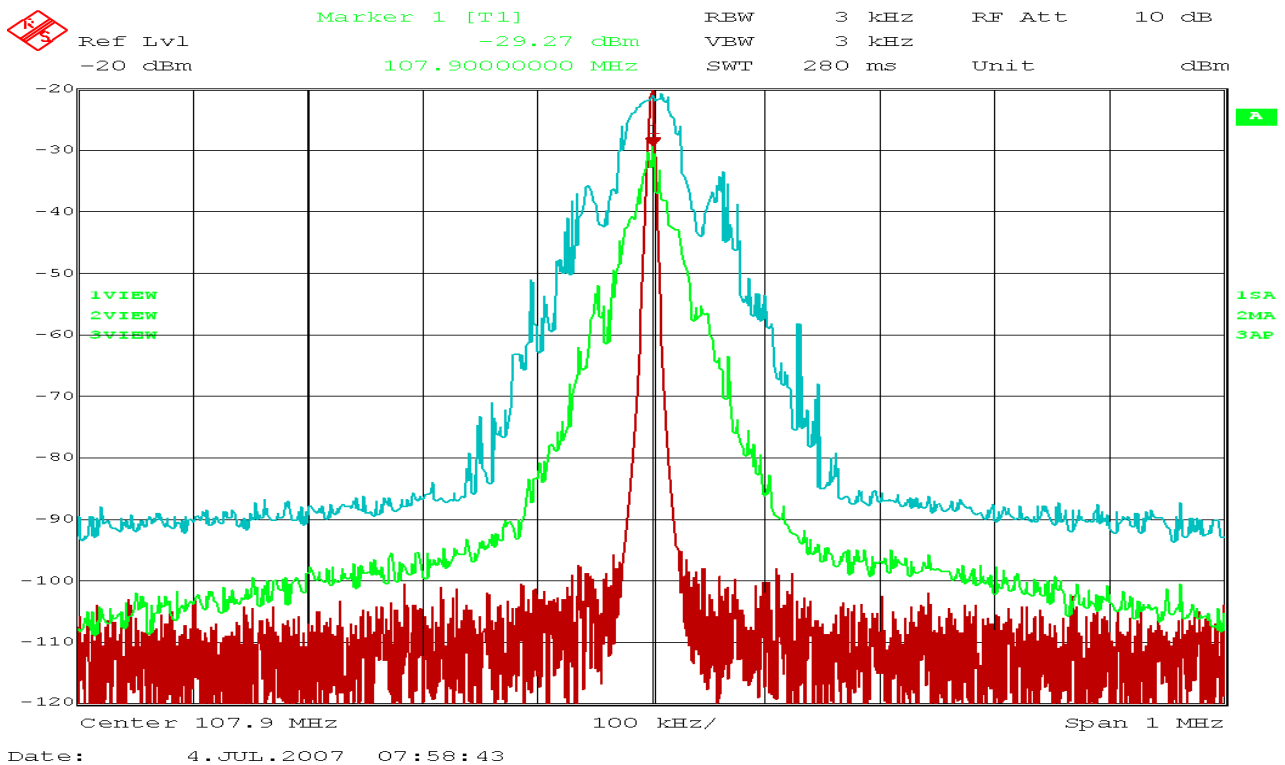


Abbildung 5.5.: Gemessenes Spektrum des FM-Störsignals gemäß den anzuwendenden Parametern aus ITU-R IS.1140.

- Untere Kurve (rot): unmodulierter Träger (Pegelreferenz)
- Mittlere Kurve (grün): Sweep mit dem RMS-Detektor
- Obere Kurve (türkis): Spitzenwertaufnahme (Max-Hold)

5.3. DRM120

5.3.1. Systembeschreibung

DRM120 bezeichnet eine Weiterentwicklung des DRM-Standards [Ins04], der für das Lang- Mittel- und Kurzwellenband bis 30 MHz definiert ist. DRM120 ist ein explizit für das UKW-Frequenzband 87,5 – 108,0 MHz als rasterkonformer Nachfolger des analogen FM-Rundfunkdienstes 2005 im Auftrag der TKLM entworfen worden [Ber05]. Dieser Ansatz wurde konsequent an der Fachhochschule Kaiserslautern durch die Arbeiten [Fei05] sowie [Sch07b] weiter verfolgt, so daß der vorliegende Messbericht ermöglicht wurde. Zu den wesentlichen Aspekten, die DRM120 erfüllt, zählen nach [Ber05] sowie [SKL⁺06]:

- Realisierung von Datenraten, die den Empfang vom mindestens einem Programm in CD-Audio-Qualität ermöglichen
- Möglichkeit des In-House und mobilen Empfangs mit Empfängergeschwindigkeiten von bis zu 300 km/h
- Möglichkeit der Übertragung bestehender Senderstrukturen im jetzigem UKW-Rundfunk (lokale, regionale, nationale Sendeformate)
- Gleichwellenfähigkeit zur Bildung von Sendernetzen
- Nutzbandbreite von 100 kHz, zur Beibehaltung des jetzigen Planungsrasters.
- Vermeidung von Störungen der bestehenden UKW-FM-Versorgung zur Realisierung einer schrittweisen Migration der Rundfunksender.

Zu den technische Schlüsselparametern von DRM120 zählen im Sinne der Modulations-/ Übertragungstechnik:

Übertragungsschema: OFDM

Anzahl der Unterträger: 111

Trägerabstand: 857 Hz

Modulation d. Unterträger: 16-QAM (in diesem Bericht verwendet) oder 64-QAM

Gleichkanalfähigkeit: vorhanden

Crestfaktor: 11,5 dB (Messwert)

Darüberhinaus wird im DRM-Konsortium an einem vergleichbarem Ansatz gearbeitet. Das System mit dem Titel DRM+ befindet sich noch in der Standardisierungsphase. Viele Impulse aus [Ber05] und aus den jetzigen Arbeiten an der Fachhochschule Kaiserslautern sind in diesen Prozess mit eingeflossen. Zu den Schlüsselparametern von DRM+ zählen im Sinne der Modulations-/ Übertragungstechnik:

Übertragungsschema: OFDM

Anzahl der Unterträger: 213

Trägerabstand: 444,44 Hz

Modulation d. Unterträger: 16-QAM, QPDSK oder 64-QAM

Gleichkanalfähigkeit: vorhanden

Crestfaktor: 9 dB (Messwert)

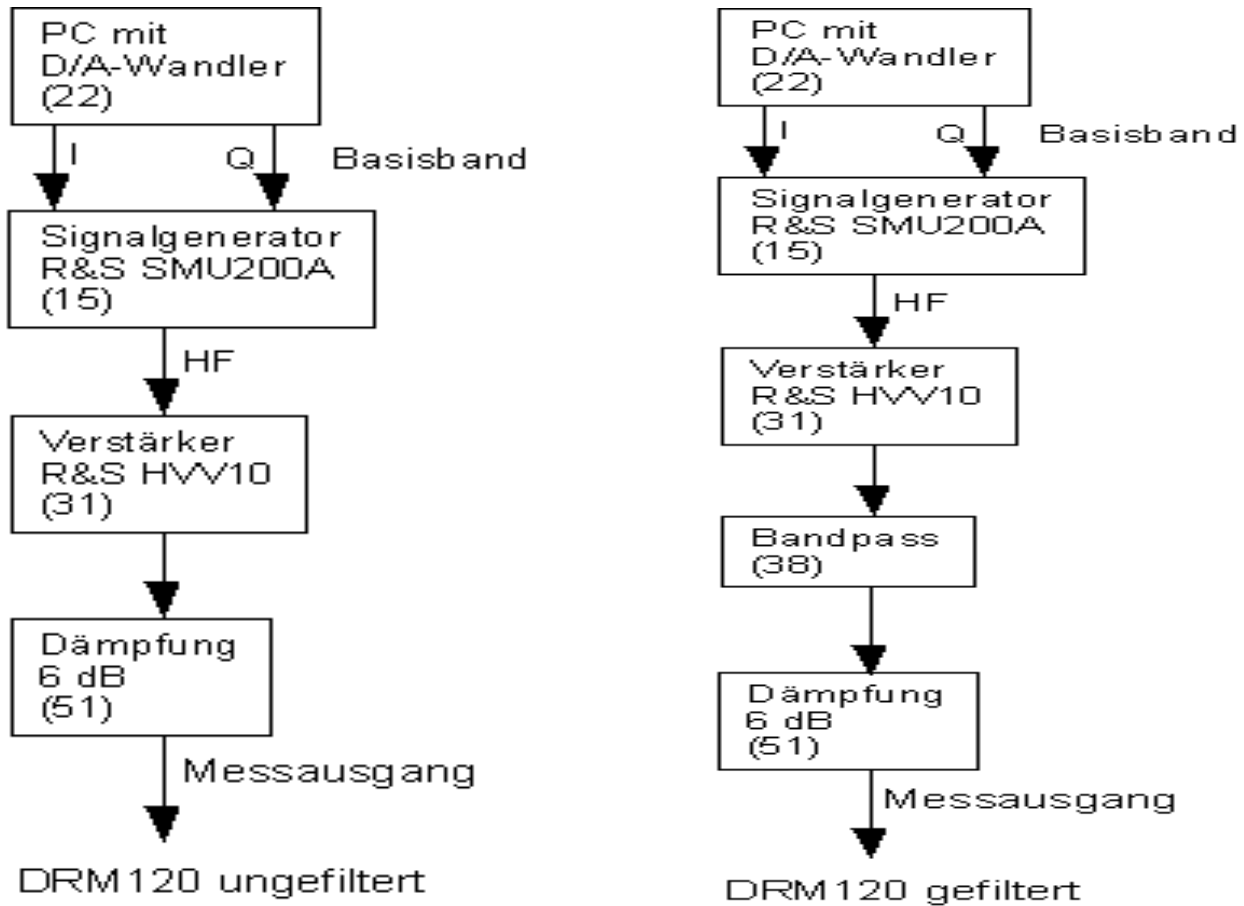


Abbildung 5.6.: Erzeugung des DRM120-Störsignals. Die Zahlenangaben in Klammern beziehen sich auf die Geräteliste in Anhang A.

5.3.2. Signalerzeugung

Das DRM120 -Signal wird entsprechend dem Blockschaltbild in Abb. 5.6 erzeugt. Die Inphasal- und Quadraturkomponente wird im Basisband durch die für DRM120 modifizierte Sendesoftware „Spark“ [Fei05] erzeugt. Die Signale werden über einen hochwertigen Digital-/Analogwandler aus dem PC ausgegeben. Die Mischung auf die Sendefrequenz und Addition der beiden Komponenten findet im Signalgenerator R&S SMU200A statt. Der nachgeschaltete Verstärker liefert den für die Messungen notwendigen Signalpegel.

5.3.3. Spektrumsmasken

Die für DRM120 angewendete Spektrumsmaske basiert auf den in [Ber05] definierten Eckdaten. Es ist zu beachten, daß diese nicht standardisiert ist und auch für DRM+ noch keine Spektrumsmaske definiert wurde. Bei ihrer Erstellung wurde darauf geachtet, die für den FM-Rundfunk gültige Spektrumsmaske nicht zu überschreiten. Beide Masken sind direkt miteinander vergleichbar, wenn man bedenkt das im Gegensatz zu einem FM-Signal die Sendeleistung nicht in einem einzigem Träger gebündelt ist, sondern sich in allen Unterträgern komplett auf die gesamte Bandbreite verteilt:

$$d = 10 \log \left(\frac{100 \text{ kHz}}{1 \text{ kHz}} \right) = 20 \text{ dB}$$

Die Oberkante der Maske ist somit um 20 dB unterhalb der Maske eines FM-Senders mit der gleichen Leistung anzusetzen.

DRM120-Maske			ETSI FM-Maske	
Offset	Atten.	rel. Pegel/ kHz	Offset	rel. Pegel/ kHz
-400 kHz	-64 dB	-84 dB	-500 kHz	-85 dB
-300 kHz	-64 dB	-84 dB	-300 kHz	-85 dB
-200 kHz	-59 dB	-79 dB	-200 kHz	-80 dB
-172 kHz	-35 dB	-55 dB	-100 kHz	0 dB
-60 kHz	-21 dB	-41 dB	100 kHz	0 dB
-50 kHz	0 dB	-20 dB	200 kHz	-80 dB
50 kHz	0 dB	-20 dB	300 kHz	-85 dB
60 kHz	-21 dB	-41 dB	500 kHz	-85 dB
172 kHz	-35 dB	-55 dB		
200 kHz	-59 dB	-79 dB		
300 kHz	-64 dB	-84 dB		
400 kHz	-64 dB	-84 dB		

Tabelle 5.1.: Spektrumsmaske für DRM120 und den FM-Rundfunk

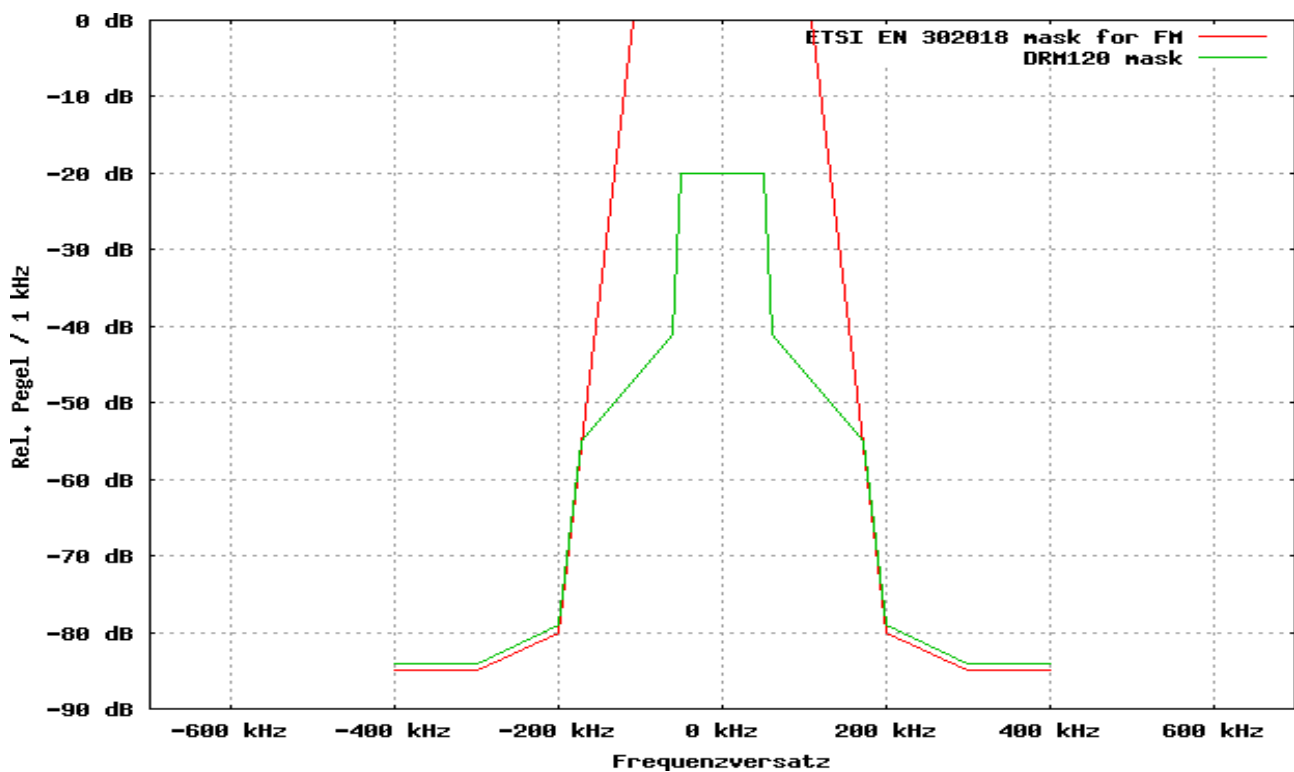


Abbildung 5.7.: Spektrumsmaske für DRM120 und den FM-Rundfunk

5.3.4. Gemessenes Signalspektrum

Die folgende Abbildung zeigt ein gemessenes DRM120-Signalspektrum. Die hochauflösende Messung mit dem in Kap. 5.1 beschriebenen Verfahren ist in den Anhängen verzeichnet.

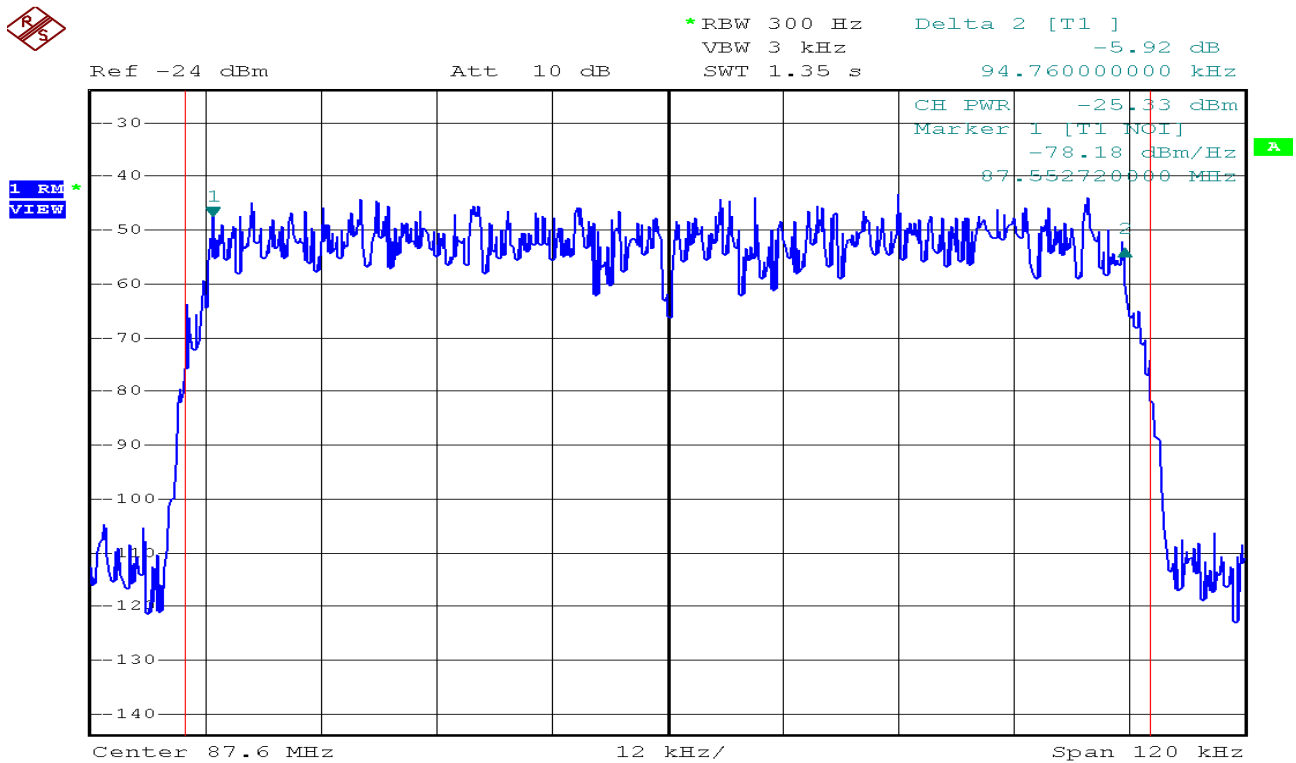


Abbildung 5.8.: Gemessenes DRM120 -Signalspektrum

5.4. HD-Radio™

5.4.1. Systembeschreibung

HD-Radio™ ist ein von der US-amerikanischen Firma iBiquity entwickeltes Übertragungsverfahren. Es ermöglicht die gleichzeitige Übertragung des Rundfunkprogramms in analoger und digitaler Form. Entsprechenderweise ist das System für das in der ITU-Region II verwendete Planungsrastrer von 200 kHz ausgelegt. Der digitale Anteil wird dabei mit dem Begriff „IBOC-DSB – In Band on Channel - Digital Side Band“ gekennzeichnet. Ein HD-Radio™ -System kann in drei grundlegenden Betriebsarten arbeiten:

- Hybrid-Mode: dem FM-Multiplex werden links und rechts OFDM-Signale hinzugefügt, s. Abb. 5.9.
- Extended-Hybrid-Mode: wie vor, mit zusätzlichen OFDM-Trägern, die näher an den analogen Teil beigefügt werden und eine größere Bandbreite beanspruchen, s. Abb. 5.10
- Full-Digital-Mode: der FM-Multiplex wird abgeschaltet; die entstehende Lücke wird durch weitere OFDM-Träger aufgefüllt, s. Abb. 5.11

Mit den uns verfügbaren HD-Radio Geräten konnte ein FM-Signal und das Signal des Hybrid-Modus erzeugt werden. Im folgenden bezeichnet HD-Radio™ den Betrieb im Hybrid-Modus.

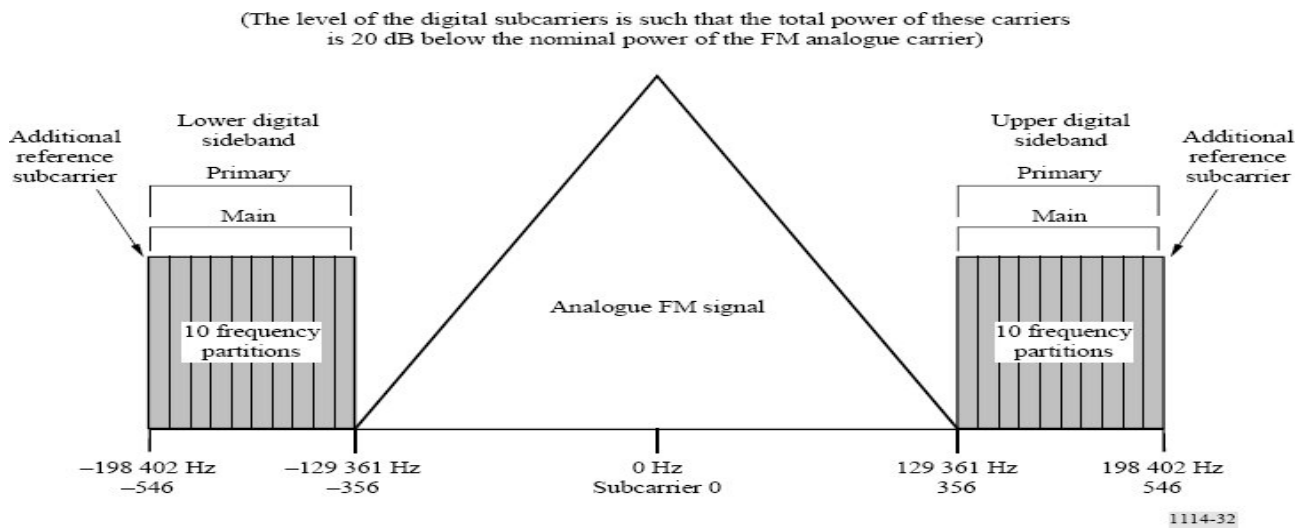


Abbildung 5.9.: Schematische Darstellung der spektralen Anteile eines HD-Radio™-Signals, Hybrid-Betrieb, aus: [ITU04, Abb. 32]

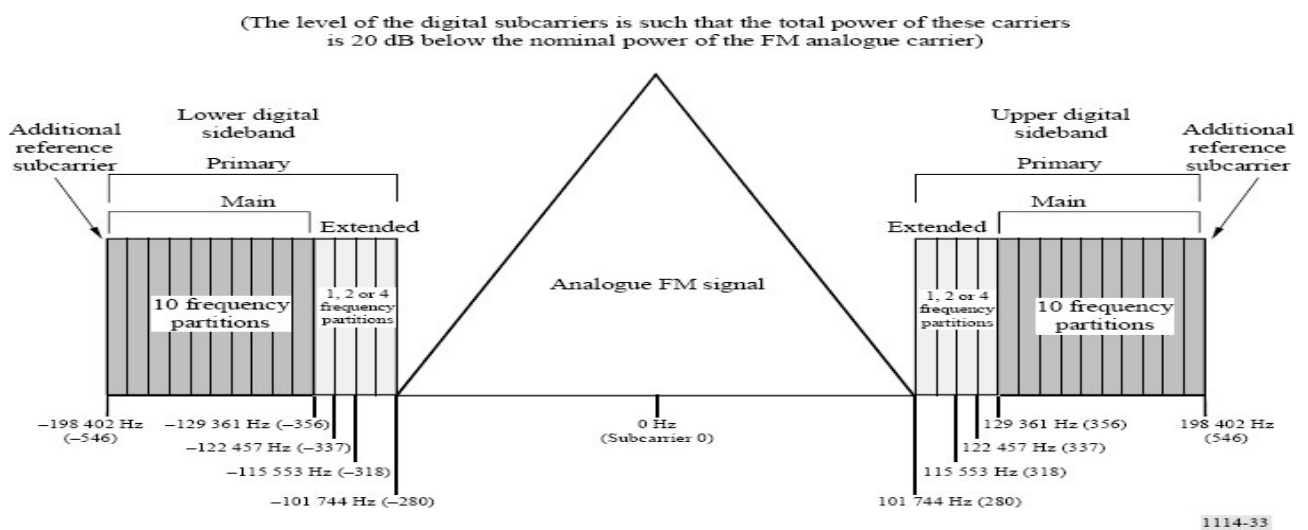


Abbildung 5.10.: Schematische Darstellung der spektralen Anteile eines HD-Radio™-Signals, erweiterter Hybrid-Betrieb, aus: [ITU04, Abb. 33]

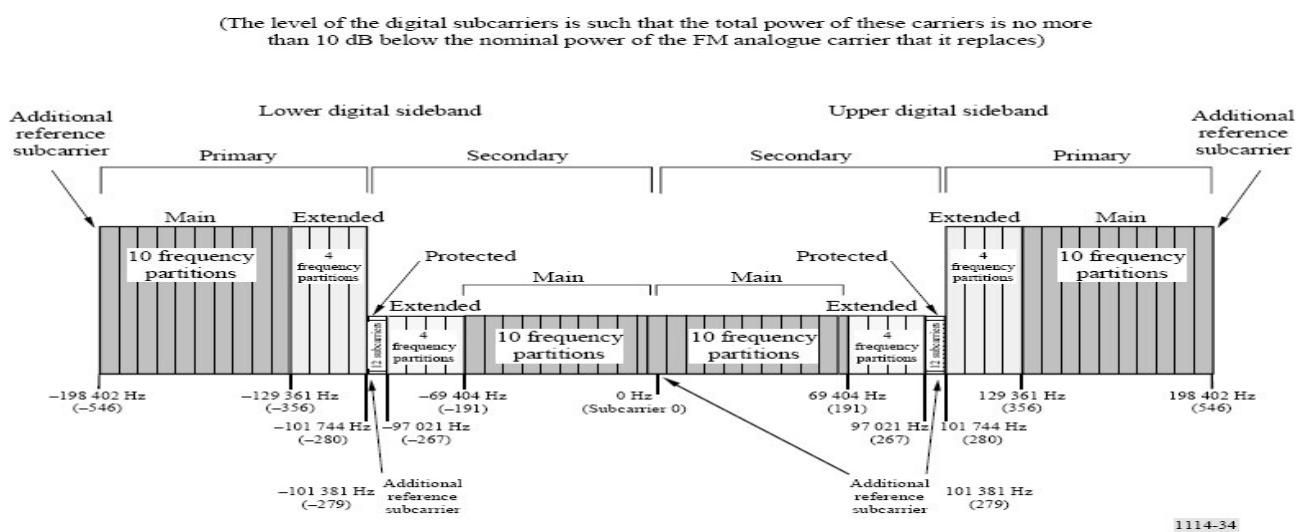


Abbildung 5.11.: Schematische Darstellung der spektralen Anteile eines HD-Radio™-Signals, Voll-digitaler Betrieb, aus: [ITU04, Abb. 34]

Im Hybrid-Modus gelten im Sinne der Modulations- bzw. Übertragungstechnik folgende Parameter für die digitalen Signalblöcke:

Übertragungsschema: OFDM

Anzahl der Unterträger: 2×191

Trägerabstand: 363 Hz

Modulation d. Unterträger: QPSK

Gleichkanalfähigkeit: nicht vorhanden

Crestfaktor: 8,5 dB (Messwert; zusammen mit dem FM-Multiplex sinkt der Crest-Faktor auf ≤ 2 dB)

5.4.2. Signalerzeugung

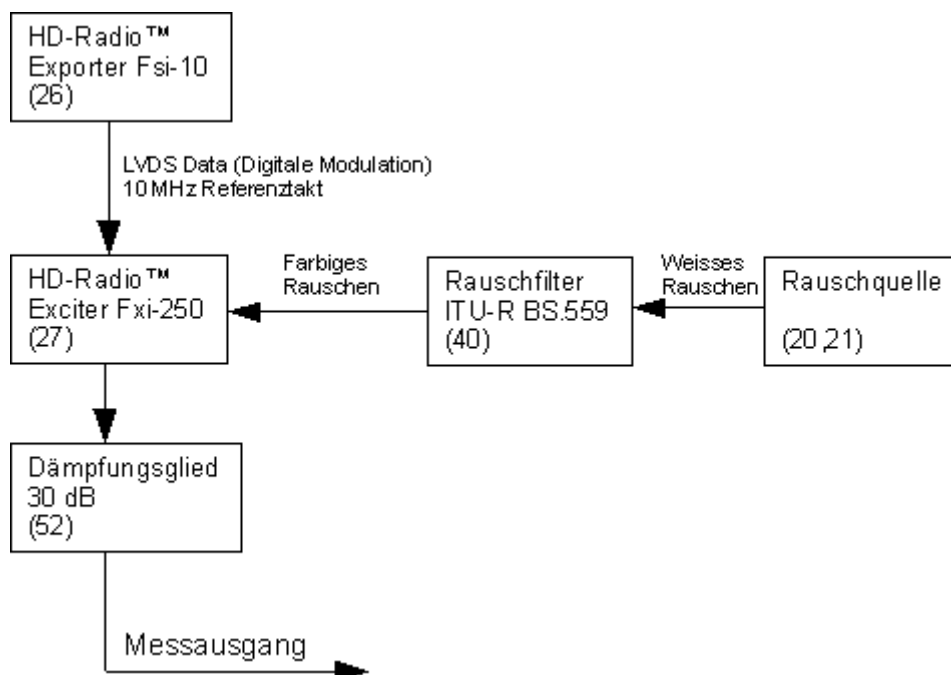


Abbildung 5.12.: Erzeugung des HD-Radio™ -Störsignals. Die Zahlenangaben in Klammern beziehen sich auf die Geräteliste in Anhang A.

Das Signal wird mit dem in Abb. 5.12 dargestellten Aufbau erzeugt. Kern der Sendeanlage ist der HD-Radio™ -Exporter sowie der HD-Radio™ -Exciter. Die wesentliche Aufgabe des Exporters ist die Erzeugung der digitalen Signale sowie die Regelung des zeitmässigen Versatzes zwischen den Inhalten des analogen und digitalen Teils sowie die Bereitstellung des Referenzsystemtaktes. Im Exciter befindet sich der FM-Modulator inkl. des zuschaltbaren Stereocoders, die Additionsstufe beider Signaltypen, die Oszillatorstufe zur Wahl der Sendefrequenz und der Leistungsverstärker. Das farbige Rauschen, mit dem die analoge Signalkomponente zu den Messungen erzeugt wurde, wird durch eine externe Rauschquelle inkl. des notwendigen Formfilters direkt in den Exciter eingespeist.

5.4.3. Spektrumsmasken

Aufgrund des Mischbetriebes sind für HD-Radio™ mehrere Masken zu kombinieren, die sich aus folgenden relevanten Vorschriften ergeben:

- für den FM-Rundfunk die Maske gemäß [Eur06]

- für die digitalen Seitenbänder die Maske gemäß [ITU04, Abs. 8.1.1]
- zusätzlich wird zum Vergleich die Maske der US-amerikanischen Regulierungsbehörde FCC angegeben, s. [Com05]

Die Eckdaten dieser Masken sind in Tab. 5.2 tabelliert und in Abb. 5.13 grafisch dargestellt.

FCC FM-Maske		ITU-R BS.1114 DSB-Maske			ETSI FM-Maske	
Offset	rel. Pegel/ kHz	Offset	Atten.	rel. Pegel/ kHz	Offset	rel. Pegel/ kHz
-600 kHz	-80 dB	-270 kHz	-60 dB	-101 dB	-500 kHz	-85 dB
-600 kHz	-35 dB	-205 kHz	-40 dB	-81 dB	-300 kHz	-85 dB
-240 kHz	-35 dB	-200 kHz	0 dB	-41 dB	-200 kHz	-80 dB
-240 kHz	-25 dB	-100 kHz	0 dB	-41 dB	-100 kHz	0 dB
-120 kHz	-25 dB	-95 kHz	-40 dB	-101 dB	100 kHz	0 dB
-120 kHz	0 dB	-30 kHz	-60 dB	-101 dB	200 kHz	-80 dB
120 kHz	0 dB	30 kHz	-60 dB	-81 dB	300 kHz	-85 dB
120 kHz	-25 dB	95 kHz	-40 dB	-41 dB	500 kHz	-85 dB
240 kHz	-25 dB	100 kHz	0 dB	-41 dB		
240 kHz	-35 dB	200 kHz	0 dB	-81 dB		
600 kHz	-35 dB	205 kHz	-40 dB	-81 dB		
600 kHz	-80 dB	270 kHz	-60 dB	-101 dB		

Tabelle 5.2.: Spektrumsmasken für HD-Radio™

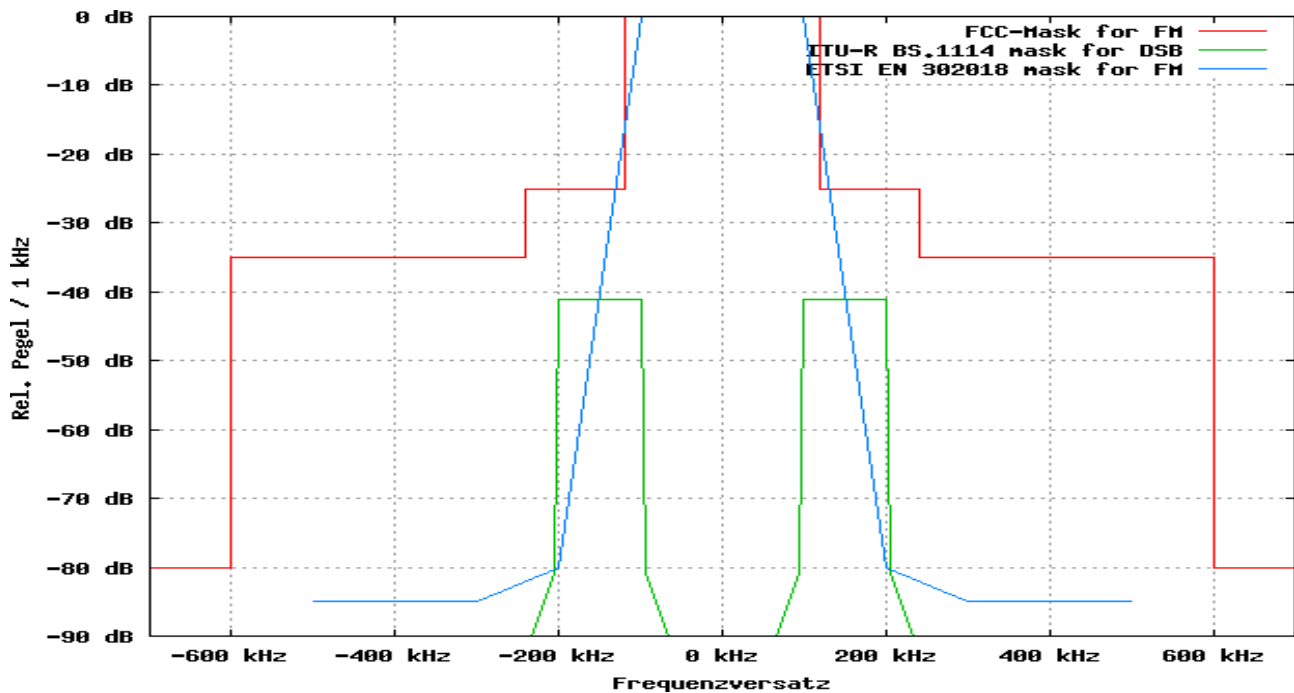


Abbildung 5.13.: Spektrumsmasken für HD-Radio™

Die spektrale Leistung eines digitalen Seitenbandes beträgt -41 dB relativ zur Gesamtleistung in einer Bandbreite von 1 kHz. Somit beträgt die Leistung jedes einzelnen digitalen Seitenbandes über seiner Bandbreite:

$$P_{1DSB} = -41 \text{ dB} + 10 \lg \left(\frac{69 \text{ kHz}}{1 \text{ kHz}} \right)$$

$$P_{1DSB} = -23 \text{ dB}$$

Beide Seitenbänder haben somit in Summe eine Leistung von -20 dB relativ zu der FM-Sendeleistung. Die Zuschaltung der digitalen Sendung erhöht die Senderleistung somit demnach um 1% .

5.4.4. Gemessenes Signalspektrum

Mit dem oben angegebenen Aufbau wurde das in Abb. 5.14 dargestellte Spektrum erzeugt. Die Messung mit dem in Kap. 5.1 erläuterten Verfahren ist in den Anhängen verzeichnet.

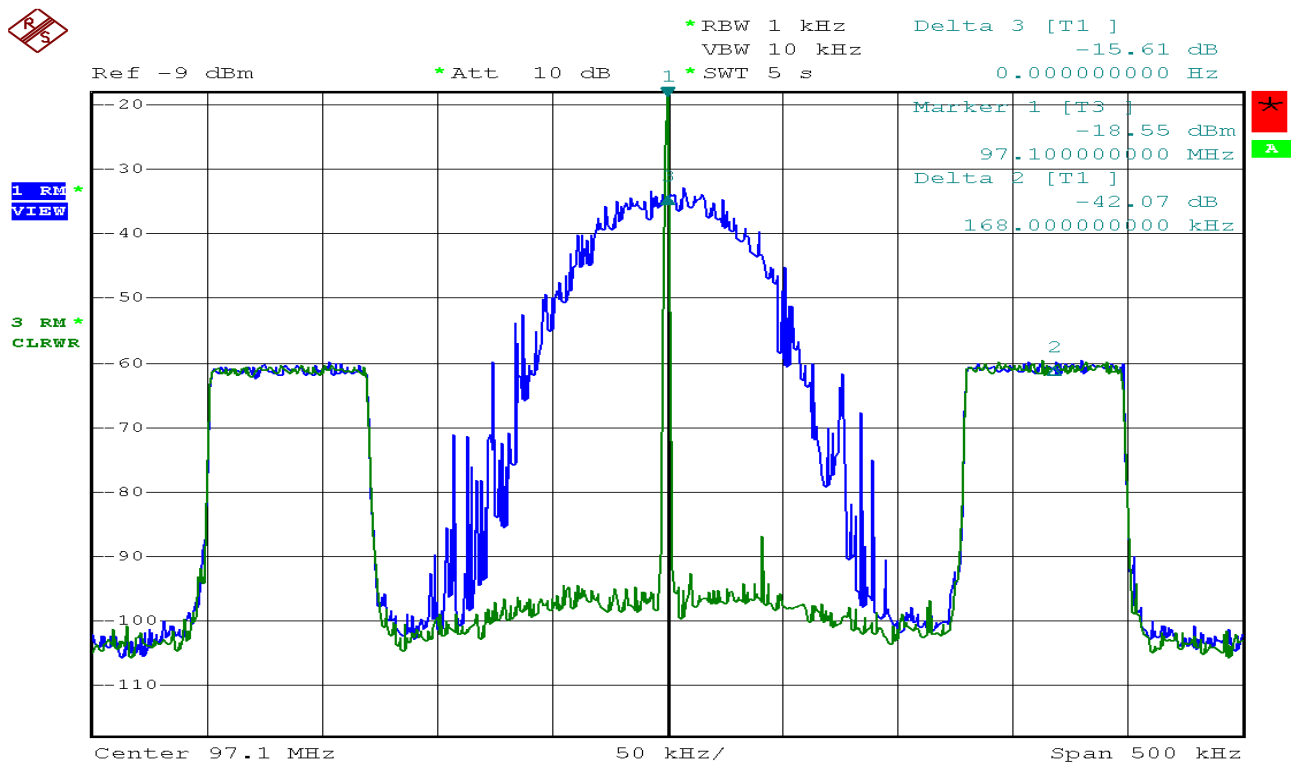


Abbildung 5.14.: Gemessenes HD-RadioTM-Spektrum. Messung 1 (blau): FM-Träger mit farbigem Rauschen moduliert, Hybridbetrieb. Messung 2 (grün): FM-Träger unmoduliert, Referenzpegel.

6. Schutzabstandsmessungen

6.1. Allgemeines

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Messungen in ihrem Ablauf dokumentiert und die wesentlichen Ergebnisse dargestellt. Die detaillierten Messungen sind in den entsprechenden Anhängen zu finden.

Allgemein wird eine Schutzabstandsmessung derart durchgeführt, daß das gewollte Signal mit einem ausreichenden, in der Regel normierten Pegel in einen Empfänger eingespeist wird, während die Leistung des Störsignals solange erhöht wird bis das jeweilige Störkriterium erreicht ist. Die HF-Leistungsdifferenz zwischen den beiden Signalpegeln $L_{soll} - L_{stoer}$ ergibt den Schutzabstand. Die Messung wird für verschiedene Frequenzdifferenzen wiederholt. Auf diese Weise entstehen die in den folgenden Abschnitten dargestellten Schutzabstandskurven.

Alle im Folgendem angegebenen Signalpegel sind Effektivwerte.

- Die Empfängereingangspegel der *BOS*-Geräte wurden derart gewählt, daß sie 10 dB über dem notwendigen Empfängermindesteingangspegel lagen. Somit sind Effekte durch die rauschbegrenzte Empfängerempfindlichkeit ausgeschlossen. Gleichzeitig ist der Pegel noch niedrig genug, um die Empfangssituation an der Grenze des Funkversorgungsgebietes simulieren zu können. Darüberhinaus ist der Betrieb im linearen Arbeitsbereich der Empfänger sichergestellt. Dieser Bereich beginnt in der Regel ca. 7 . . . 10 dB über der Empfindlichkeitsschwelle und endet an dem Bereich, in dem der Empfänger übersteuert wird.
- Bei den Messungen gegenüber dem *FM-Rundfunk* ist lt. [ITU02d] der Nutzsiegelpegel so gering zu wie möglich zu wählen, solange am Empfängerausgang ein gewichtetes S/N von 56 dB erreicht wird. Bei dem Gros der untersuchten Empfänger befindet sich dieser Punkt bei Empfängereingangspegeln von $-55 \dots -51$ dBm. Zur Prüfung der Linearität wurden zusätzliche Messungen mit einem um 10 dB bzw. 20 dB höherem Signalpegel durchgeführt.
- Im Falle der Messungen gegenüber dem *VOR-/ILS*-Dienst wurden die Empfängereingangspegel gemäß den Vorgaben aus [ITU95b] eingehalten. Bei VOR ist dies ein Pegel von -79 dBm. [ITU95b] gibt vier unterschiedliche Pegel vor. Bei -79 dBm war der Pegel erreicht, bei dem der Empfänger das Störkriterium „Kursabweichung“ einhalten konnte und gleichzeitig noch weit von der Übersteuerung war. Darüberhinaus wurde bei den Messreihen noch mit dem vorschriftsmäßig erhöhtem Pegel gemessen um die Operation des Empfängers im linearem Betrieb gegenzuprüfen.
- Der Pegel des Störsignals wurde immer durch die Nutzung variabler Dämpfungsglieder eingestellt um die ursprünglichen in Kap. 5 vermessenen Signalcharakteristika insbes. im Sinne des Seitenbandverlaufs beizubehalten.

6.2. Messaufbauten

6.2.1. FM-Rundfunk als Nutzsignal

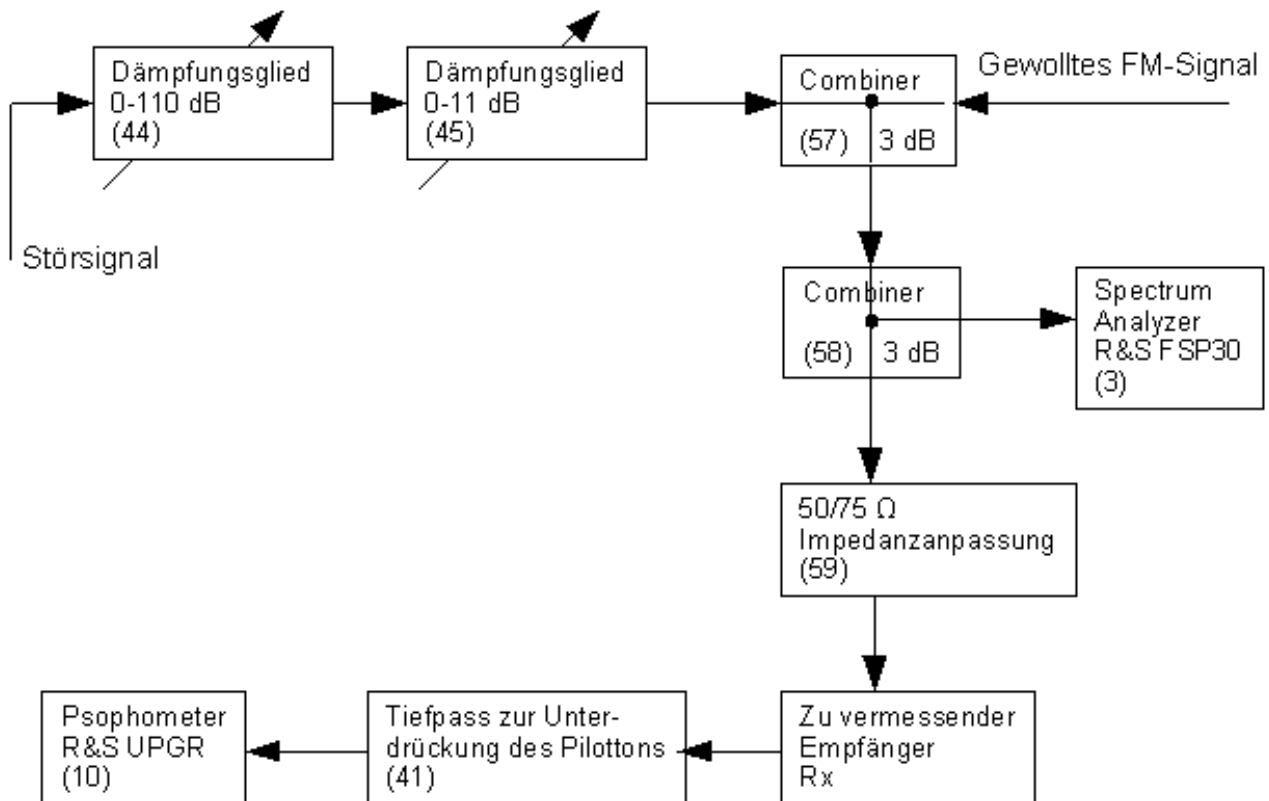


Abbildung 6.1.: Aufbau zur Messung des Schutzabstandes für den FM-Rundfunk. Die Zahlenangaben in Klammern beziehen sich auf die Geräteliste in Anhang A.

Mit dem in Abb. 6.1 dargestellten Aufbau gemäß [ITU02d] wurden die Schutzabstandsmessungen gegenüber dem FM-Rundfunk durchgeführt. Die jeweiligen Störsignale wurden jeweils über die variablen Dämpfungsglieder zugeführt und mittels eines Combiners zu dem Nutzsignal addiert. Über den nachfolgenden Signalteiler kann das Summensignal während der Messung an einem Spectrum Analyzer oder anderem Meßgerät in der Hochfrequenzebene beobachtet werden. Der andere Signalzweig wird über ein Impedanzanpassglied an den Empfängereingang geführt. Das NF-Signal wurde an der Line-out-Buchse (sofern vorhanden) bzw. den Lautsprecherausgang des Empfängers abgegriffen. Das nachgeschaltete Tiefpaßfilter unterdrückt den oftmals Empfängerseitig nur mäßig unterdrückten Steropilotton, so daß das mit dem Psophometer gemessene Signal auf die Bandbreite des tatsächlich übertragenen Audioanteils beschränkt wird.

6.2.2. BOS als Nutzsignal

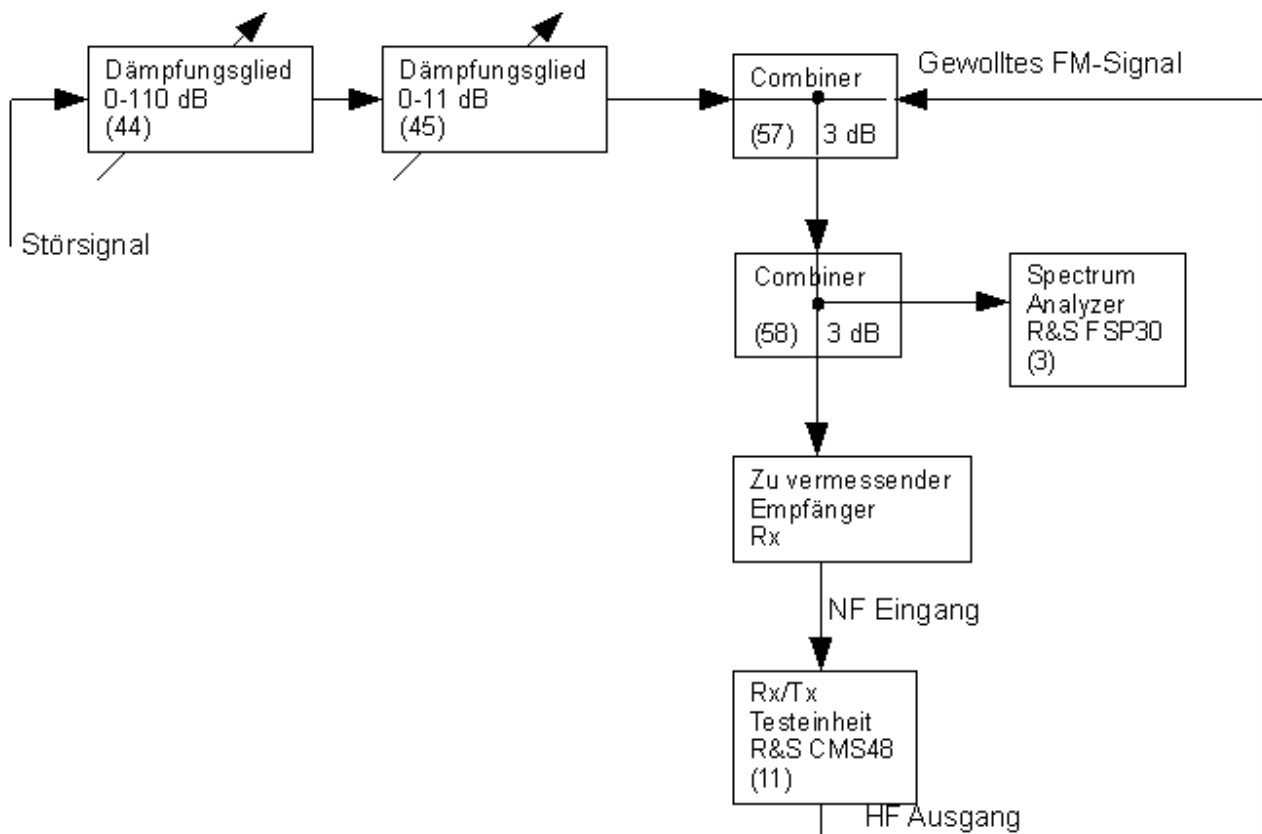


Abbildung 6.2.: Aufbau zur Messung des Schutzabstandes für den BOS-Funkdienst. Die Zahlenangaben in Klammern beziehen sich auf die Geräteliste in Anhang A.

Der Aufbau zu dieser Messung ähnelt dem aus dem vorigem Abschnitt. Der wesentliche Unterschied liegt in der Auswertungsmimik. Hierzu konnten die internen Funktionen des Sende-/Empfangstestgeräts R&S CMS48 direkt zur Messung der Audioqualität genutzt werden.

Die verfügbaren Empfänger decken den Frequenzbereich 84,015...87,255 MHz ab. Die niedrigste vergebare Frequenz für den FM-Rundfunk in Deutschland ist 87,6 MHz, so daß im realen Betrieb eine minimale Frequenzdifferenz von -345 kHz zwischen beiden Signalen in jedem Fall gegeben ist.

6.2.3. VOR bzw. ILS als Nutzsignal

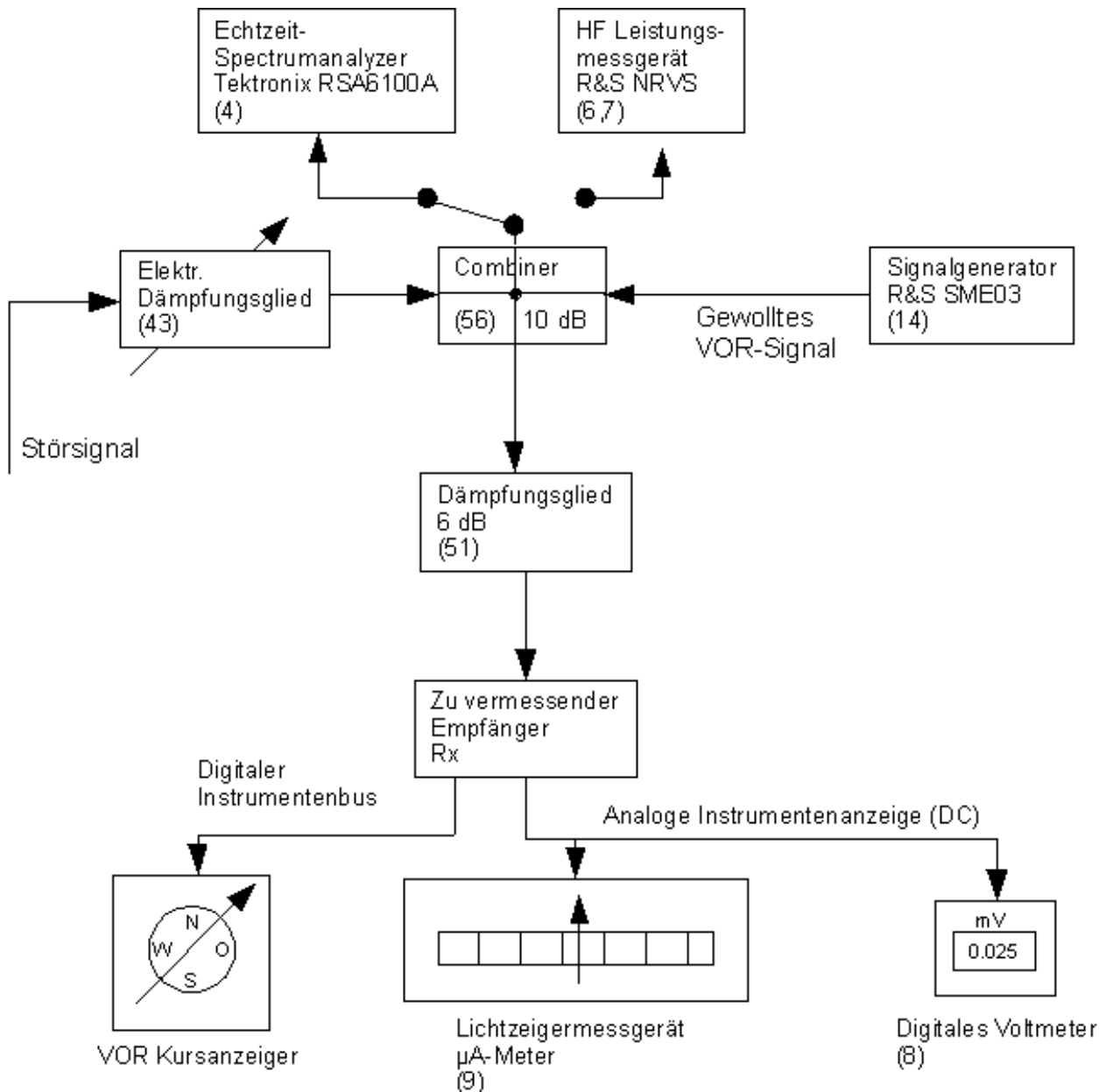


Abbildung 6.3.: Aufbau zur Messung des Schutzabstandes für den für den VOR bzw. ILS-Dienst. Die Zahlenangaben in Klammern beziehen sich auf die Geräteliste in Anhang A.

Im Gegensatz zu den beiden vorigen Meßaufbauten wird hier auf den Einsatz zweier Combiner verzichtet und direkt ein 4-Tor-Koppler verwendet. Die empfangenen VOR-/ILS-Signale werden über einen digitalen Instrumentenbus zum einen an den elektronischen Kompass gesendet, mit dem das Flaggenkriterium geprüft wird. Über das Lichtzeigermeßinstrument können die Schwankungen der Kursanzeige (schaltbar zwischen ILS und VOR) verfolgt werden; der dazugehörige Meßwert kann nach einer Strom-Spannungswandlung an einem digitalen Voltmeter abgelesen werden.

Im Falle des VOR-Signals entsprach der in [ITU95b] erlaubte Grenzfall einer Abweichung von $0,3^\circ$. Dies entspricht einer Variation des Stroms durch das Lichtzeigerinstrument von $\pm 0,25 \mu\text{A}$ bzw. einer Variation der Spannung um $\pm 0,025 \text{ mV}$ am Voltmeter.

Die niedrigste nutzbare VOR-Frequenz ist $108,0 \text{ MHz}$, die höchste Frequenz für den FM-Rundfunk $107,9 \text{ MHz}$. Von dieser Mindestfrequenzdifferenz von 100 kHz aus wurde die Frequenz des Störsignals nach unten verschoben, während der VOR-Empfänger auf seiner niedrigst möglichen Empfangsfrequenz ab-

gestimmt blieb.

Für den ILS-Empfang ist die niedrigst nutzbare Frequenz 108,1 MHz. Somit ergibt sich eine minimale Frequenzdifferenz von 200 kHz. Auch hier wurde die Frequenz des Störsignals von der ILS-Frequenz weggeschoben, während die Frequenz des ILS-Empfänger unverändert blieb.

Der Meßaufbau für den ILS-Dienst ist identisch mit dem des VOR-Dienstes. Die empfangenen Daten des Empfängers wurden auf das ILS-Anzeigeeinstrument gegeben, um das Störkriterium „Flagge“ zu prüfen. Der durch [ITU95b] maximal zugelassene Empfangsfehler entspricht einer Abweichung von $\pm 0,5 \mu\text{A}$ am Lichtzeigermeßgerät bzw. $\pm 0,025 \text{ mV}$. Hierbei wurde eine Standardabweichung von 0,093 ppm am Prüfsignalgenerator eingestellt. Der Sollanzeigewert am Lichtzeigermeßgerät (Mittelstellung) entspricht somit $90 \mu\text{A}$ bzw. 90 mV am Voltmeter.

[ITU95b] schreibt vier Nutzsiegel vor, die bei einer solchen Messung verwendet werden sollen. Der kleinste dort angegebene Wert für VOR ist -79 dBm , für ILS -86 dBm . Zur Prüfung des linearen Verhaltens der Empfänger wurden die meisten Messungen mit dem nächsthöherem angegebenen Signalpegel wiederholt. Für VOR ist dieser Pegel -63 dBm , für ILS -70 dBm .

In den folgenden Abschnitten werden die Zusammenfassungen der Ergebnisse dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse aller Schutzabstandsmessungen sind den Anhängen zu entnehmen.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist – unter der Voraussetzung, daß die jeweiligen Empfänger nicht übersteuert sind – zu beachten, daß die ermittelten Schutzabstände im Wesentlichen durch die jeweiligen Anteile des spektralen Seitenbandverlaufs der unterschiedlichen Signale auf den unterschiedlichen Empfängerfrequenzen geprägt sind. Um bei diesen Messungen praktisch verwertbare und realistische Ergebnisse zu erzielen, wurden – sofern verfügbar – Sendereinrichtungen verwendet, die den jeweiligen Stand der Technik widerspiegeln. Es ist wesentlich einfacher, ein hochreines FM Spektrum zu erzeugen als bei Verwendung digitaler Modulationsarten. Moderne FM-Sender erzeugen ein Ausgangsspektrum, dessen Seitenbandverlauf bis zu 40 dB unter der FM Spektrumsmaske liegt. In der Regel können OFDM-Sender die Maske oftmals nur mit entsprechender Filterung einhalten. Diese Tatsache ein wesentlicher Punkt für das scheinbar höhere Störpotential der digitalen Sendeformate im Vergleich zu FM-Rundfunksendern bei großen Frequenzabständen.

6.3. FM-Rundfunk als Störer

Der wesentliche Punkt, warum in dem vorliegenden Bericht die Verträglichkeit des FM-Rundfunks gegenüber den einzelnen Funkdiensten gemessen wurde ist vor allem der, daß er als das momentan verwendete Verfahren die quasi-Referenz für Messungen gegenüber den digitalen Sendeformate dient.

6.3.1. FM-Rundfunk vs. FM-Rundfunk

Die Zusammenfassung der Ergebnisse für das Störkriterium „S/N“ ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Messungen mit einem erhöhtem Nutzsignalpegel sind mit „Rx2 +20 dB“, „Rx4 +10 dB“ sowie „Rx4 +20 dB“ markiert. Darüberhinaus ist die in [ITU02a, Tabelle 3] angegebene Schutzabstandskurve für den FM Stereorundfunk im Falle einer dauerhaften Störung als Referenz eingetragen.

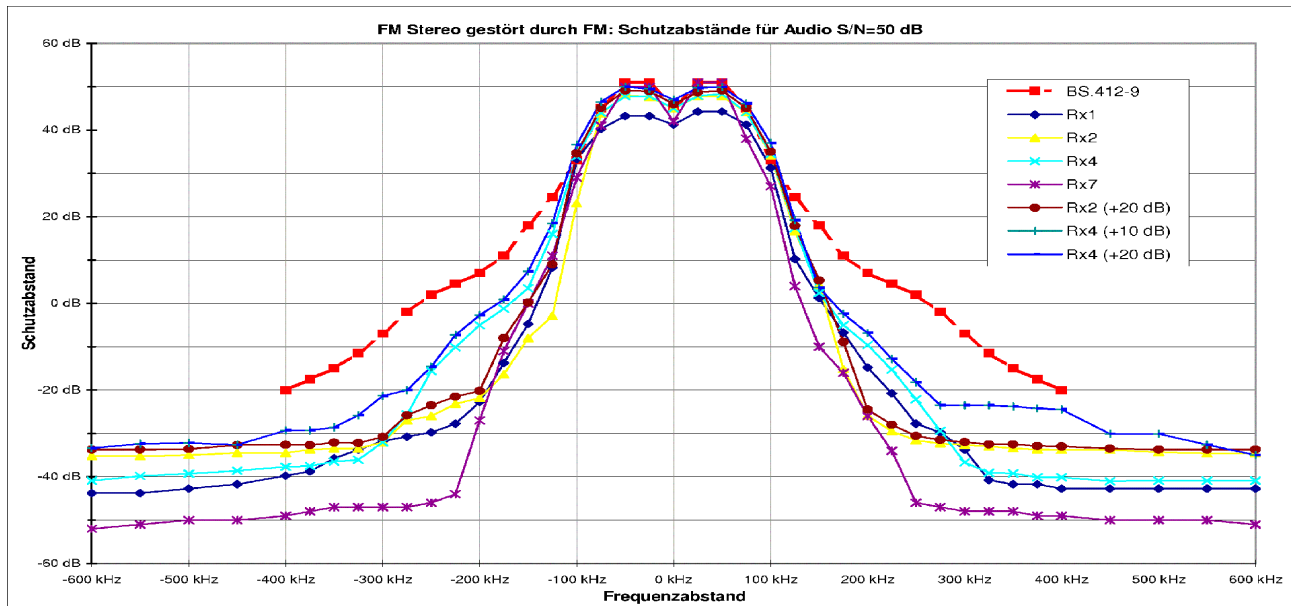


Abbildung 6.4.: Zusammenfassung der Schutzabstände für FM Stereo gestört durch FM (S/N Störung)

Anhand des Kurvenverlaufs ist erkennbar, daß die verwendeten Empfänger eine bessere Selektion als in [ITU02a] angegeben aufweisen. Abgesehen von der kleinen Erhöhung der Schutzabstände im Bereich zwischen 250 kHz–500 kHz bei Rx4 (+20 dB) weisen die Empfänger ein relativ gutes Linearitätsverhalten auf.

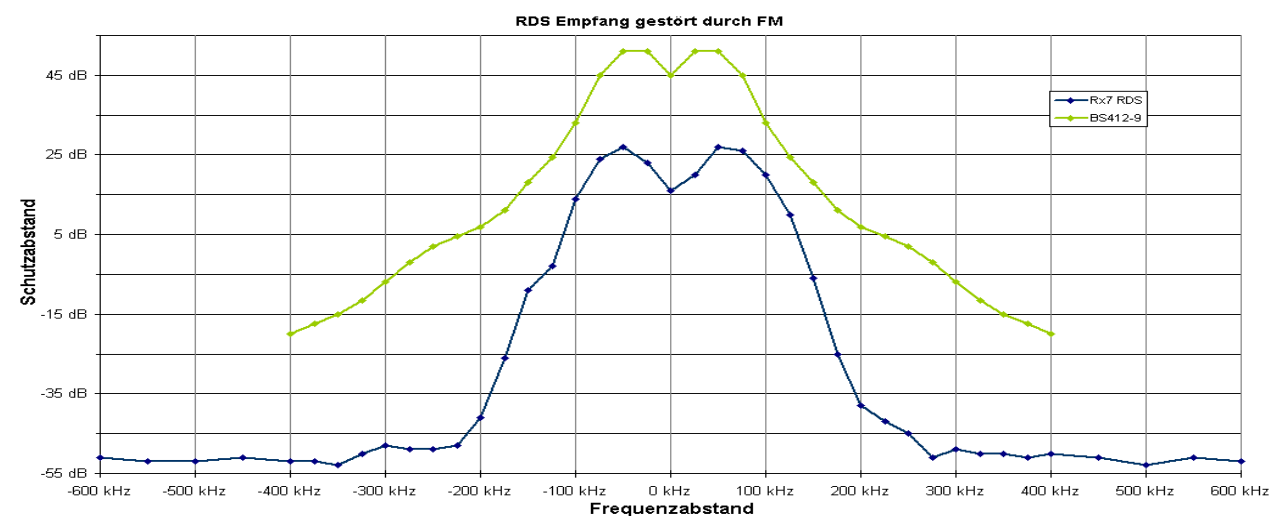


Abbildung 6.5.: Schutzabstände für den RDS-Empfang bei Störungen durch FM

Die Schutzabstände für den RDS-Empfang zeigen, daß dieser Dienst wesentlich robuster als die Audioübertragung ist. Er ist noch lange ungestört, wenn das S/N-Störkriterium schon längst nicht mehr erfüllt werden kann. Dieses Verhalten wurde mit dem Empfänger Rx6 verifiziert. Bei allen anderen Empfängern war die messtechnische Erfassung der RDS-Daten in Ermangelung eines physikalischen Zugriffspunktes nicht möglich.

6.3.2. FM-Rundfunk vs. BOS-Sprechfunk

Der nutzbare Frequenzbereich der bereitgestellten BOS-Empfänger ist 84,015 MHz–87,255 MHz. Die niedrigste in Deutschland an FM-Sender vergebare Sendefrequenz ist 87,6 MHz, so daß ein minimale Frequenzdifferenz von 345 kHz in jedem Fall gegeben ist. Auch wenn die Bestimmung der Schutzabstände FM-Rundfunk gegenüber BOS nicht zu der Kernaufgabe dieser Messreihe stand, wurde dennoch einer der verfügbaren Empfänger aus folgenden Gründen vermessen:

- Die Ergebnisse sind als Referenz im Vergleich zu den digitalen Sendeformaten nutzbar.
- Prüfung, ob sich die Empfänger auch bei großen Frequenzabständen noch im linearem Arbeitsbereich befinden, also nicht übersteuert sind.

Bei den Messungen wurde der in der Abbildung 6.2 gezeigte Messaufbau verwendet.

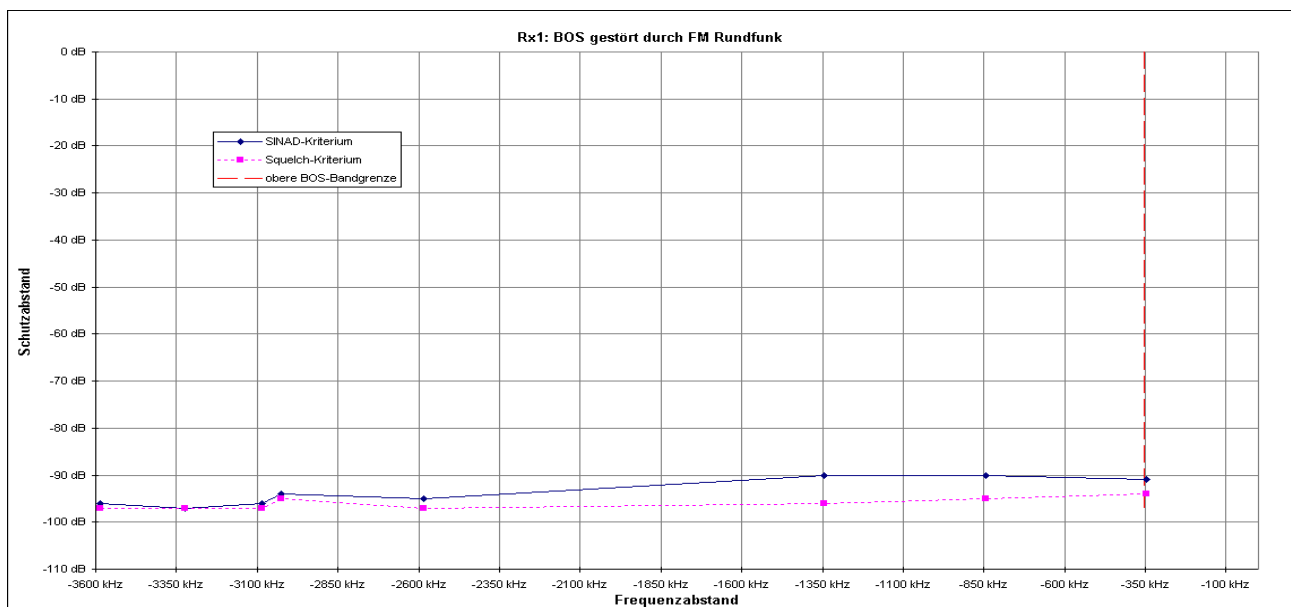


Abbildung 6.6.: Schutzabstände für BOS gestört durch FM-Rundfunk

Der Nutzsinalpegel zur Messung der SINAD-Störung betrug -104 dBm, bei der Squelch-Interferenz -100 dBm. Diese Pegel liegen 10 dB über der gemessenen Empfindlichkeit zur Erzielung eines SINAD von 20 dB und dem sicheren Öffnen der Rauschsperr.

Die Messbilder zeigen, daß es zu keinen unerwarteten Sprüngen in den den ermittelten Schutzabständen kommt. Dies läßt darauf schliessen, daß der Empfänger nicht übersteuert ist.

6.3.3. FM-Rundfunk vs. Flugfunk VOR

Die niedrigste nutzbare VOR Frequenz ist $108,0$ MHz, die höchste nutzbare FM-Rundfunkfrequenz $107,9$ MHz. von dieser minimalen Frequenzdifferen von -100 kHz ausgehend, wurde das FM-Signal in der Frequenz nach unten verschoben, während die Frequenz des VOR Empfängers fix blieb. Mithilfe des VOR-Kursanzeigers wurde die Flaggenstörung überwacht. Die Kursstörung würde gemäß der in [ITU95b] angegebenen Methode gemessen.

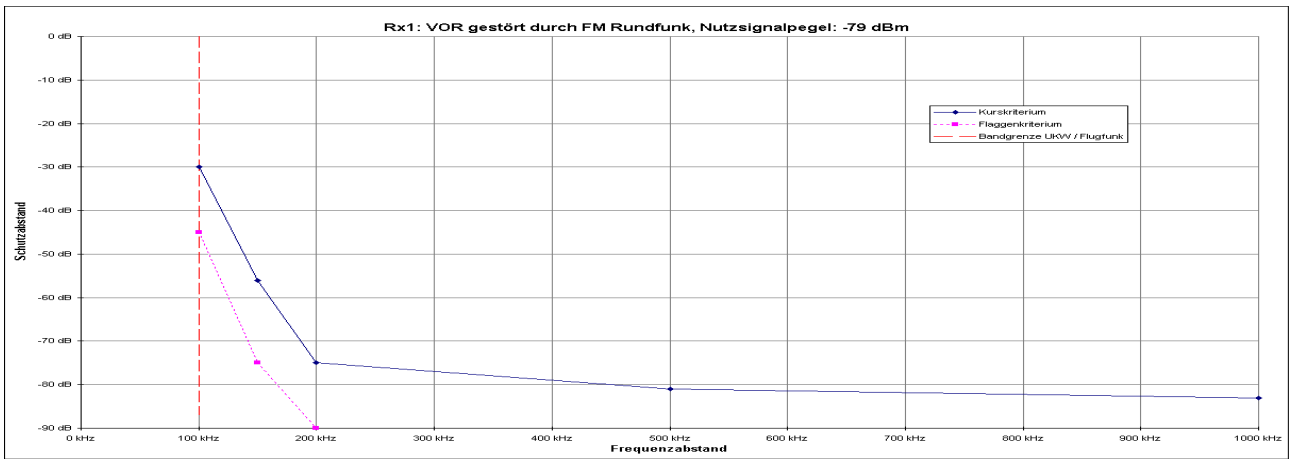


Abbildung 6.7.: Schutzabstände für den VOR-Dienst gestört durch FM-Rundfunk

6.3.4. FM-Rundfunk vs. Flugfunk ILS Localizer

Die niedrigste ILS-Frequenz ist 108,1 MHz, die höchste FM-Rundfunkfrequenz 107,9 MHz. Von dieser Konstellation (Offset = -200 kHz) ausgehend wurde die Frequenz des FM-Signals erniedrigt, während der ILS Empfänger fix in seiner Frequenz blieb.

Der Messaufbau ist identisch zur Messung der VOR-Schutzabstände, mit der Ausnahme, daß die Empfängerdaten durch das ILS-Kursanzeigeeinstrument dargestellt wurden.

Mit diesem Anzeigeeinstrument wurde das Flaggenkriterium überwacht. Der maximal erlaubte ILS Kursfehler gem. [ITU95b] entspricht einer Änderung des Messstroms durch das μA -Meßgerät von $4,5 \mu\text{A}$. Zur Messung wurde eine Nennabweichung vom Localizerkurs von $0,093 \text{ DDM}$ im Nutzsingenerator vorgegeben. Dies verursachte einen nominellen Meßstrom von $90 \mu\text{A}$ auf dem Lichtzeigermeßgerät, mit dem das Kurskriterium aufgenommen wurde.

Das Ergebnis der Messung ist in der folgenden Abbildung verzeichnet. Der Nutzsingepel betrug -86 dBm . [ITU95b] schreibt vier Nutzsingepel vor, die bei einer solchen Messung verwendet werden sollen. Der kleinste dort angegebene Wert für ILS ist -86 dBm . Zur Prüfung des linearen Verhaltens der Empfänger wurden die Messungen mit dem nächsthöherem angegebenen Signalpegel von ILS -70 dBm wiederholt. Die mit dem höherem Nutzsingepel gemessenen Schutzabstände unterscheiden sich nicht von denen bei geringerem Nutzsingepel.

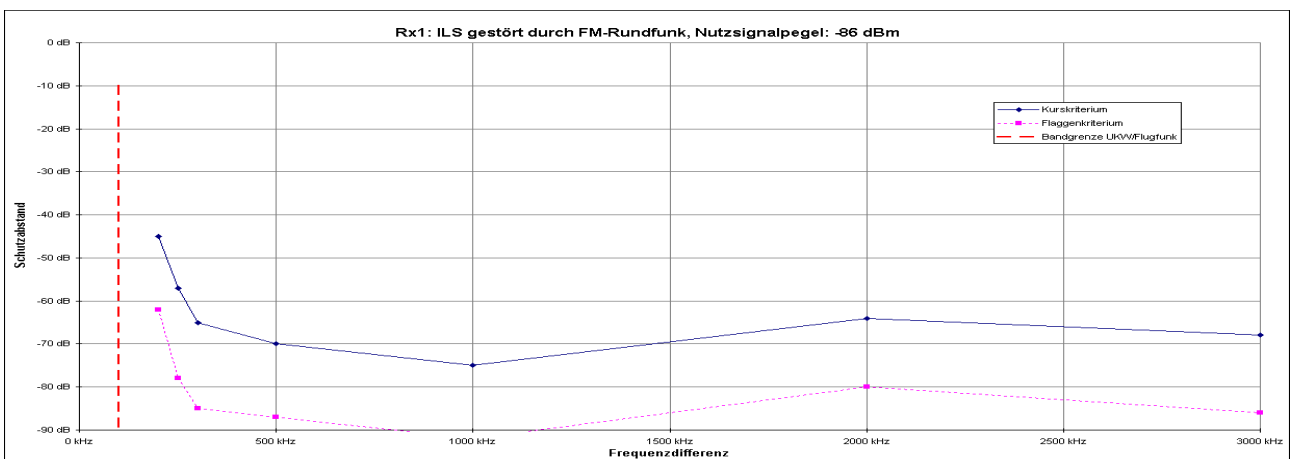


Abbildung 6.8.: Schutzabstände für den ILS-Dienst gestört durch FM-Rundfunk

In den Anhängen sind die detaillierten Ergebnisse der Messungen festgehalten. Wie auch bei VOR wurden zusätzliche Messungen durchgeführt bei denen der FM-Sender (Fxi-250) mit einem Rauschsignal gemäß [ITU02d] moduliert wurde. Ein Vergleich mit den Messungen mit einer Modulation

gem. [ITU95a] auf dem Itelco-Sender zeigt, wie stark Schutzabstände von der genauen Modulation und vor allem dem Anteil der Seitenbandaussendungen abhängt.

6.4. DRM120 als Störer

6.4.1. DRM120 vs. FM-Rundfunk

Zur Durchführung dieser Messreihe wurde der in Abschnitt 6.2.1 erläuterte Aufbau verwendet. Die Schutzabstandsmessungen wurden durchgeführt, indem die Frequenz des DRM120-Störers durch den Frequenzbereich des Empfängers geschoben wurde. Wie bereits in Abschnitt 5.3 erwähnt, wurde das Störsignal mit und ohne zusätzlicher senderseitiger Ausgangsfilterung in die Meßstrecke eingebracht.

In der folgenden Abbildung werden die Ergebnisse der S/N-Störung bei dem niedrigst möglichem Nutzsignalpegel dargestellt, soweit nicht anders vermerkt (s. auch Kap. 6.1).

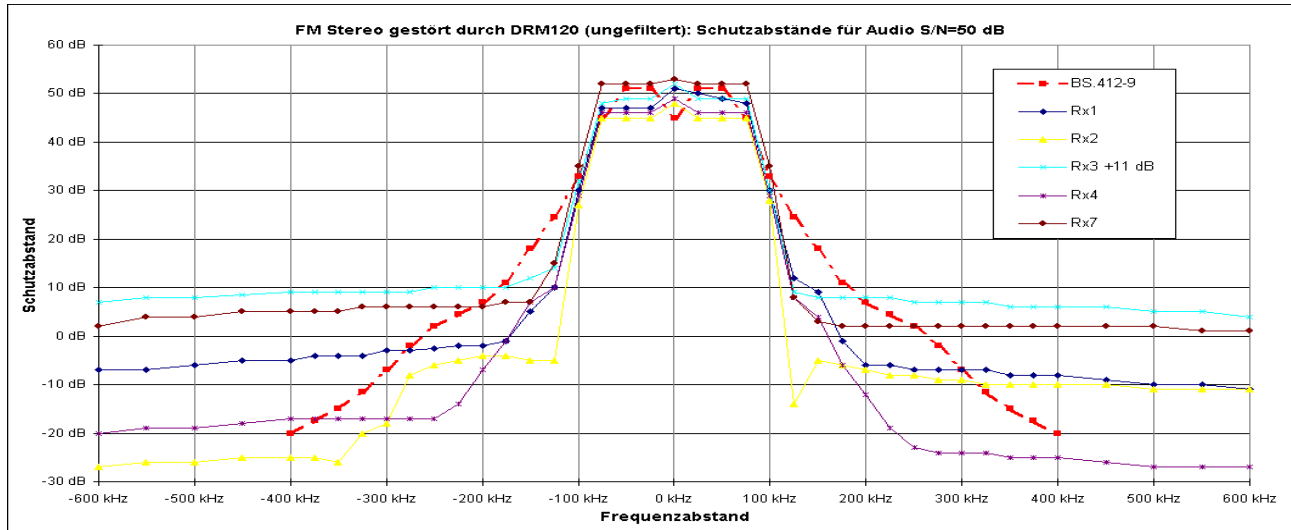


Abbildung 6.9.: Schutzabstände für den FM-Stereoempfang gestört durch DRM120 (ungefiltert)

Zum Vergleich ist die Schutzabstandskurve für den FM-Rundfunk bei dauerhafter Störung aus [ITU02a] in das Diagramm mit aufgenommen worden.

Man kann für Frequenzabstände von bis zu ± 200 kHz sehen, daß der störende Effekt von DRM120 (ungefiltert) sich fast genauso wie eine Störung durch ein FM-Rundfunksignal äussert. Bei größeren Frequenzablagen besteht eine hohe Abhängigkeit von dem jeweiligem Empfängeraufbau. Beispielsweise zeigt Rx7 eine um bis zu 25 dB höhere Empfindlichkeit gegenüber einem DRM120-Signal, während Rx4 nicht anders als durch ein FM-Rundfunksignal gestört. Für das Störsignal DRM120 (gefiltert) wurden die in Abb. 6.10 gezeigten Schutzabstände für den Empfänger Rx1 über eine größere Bandbreite ermittelt.

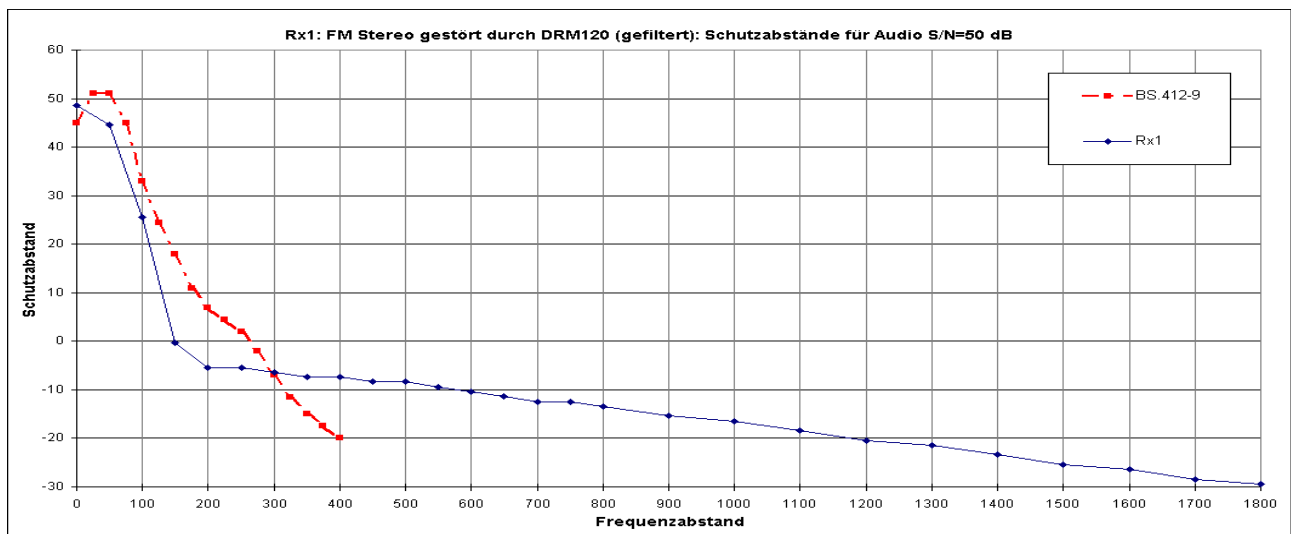


Abbildung 6.10.: Schutzabstände für FM Stereo gestört durch DRM120 (gefiltert), vergrößerte Messbandbreite

Man kann erkennen, daß die Filterung die Schutzabstände bei großen Frequenzabständen beeinflusst (weiter Details hierzu sind in Kap. 8 verzeichnet). Bei einem Abstand von 400 kHz ist der Schutzabstand von DRM120 um 12 dB höher im Vergleich zu einem FM-Rundfunkstörer. Gleiche Schutzabstände werden erst bei Frequenzdifferenzen von über 1200 kHz erreicht.

Messungen der Schutzabstände für den RDS-Dienst zeigen deutlich, daß dieser Dienst allgemein weniger anfällig für Störungen durch DRM120 im Vergleich zu der S/N Störung ist, was aus der folgenden Abbildung klar hervorgeht. Im Vergleich zu Abb. 6.5 sind die notwendigen Schutzabstände sogar niedriger.

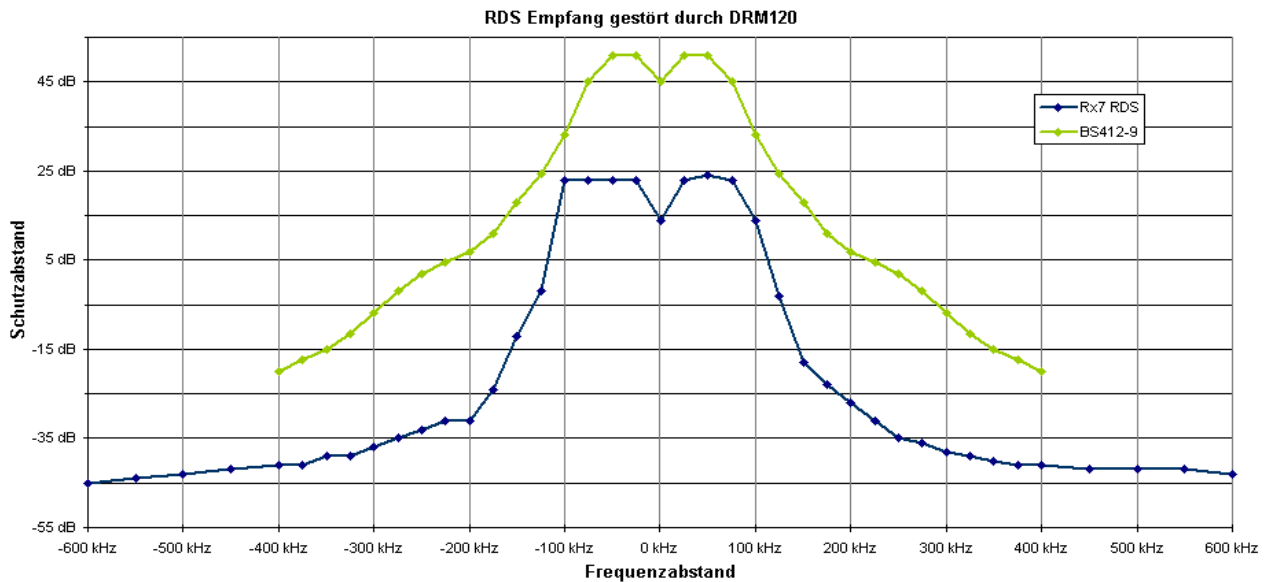


Abbildung 6.11.: Schutzabstände für den RDS-Empfang bei Störung durch DRM120

6.4.2. DRM120 vs. BOS-Sprechfunk

Zu dieser Messung wird der in Abb. 6.2 dargestellt Messaufbau verwendet. Die folgenden Abbildungen der Messergebnisse zeigen die Schutzabstände für das jeweils kritischste der in Abschnitt 4.2.2 definierten Störkriterien.

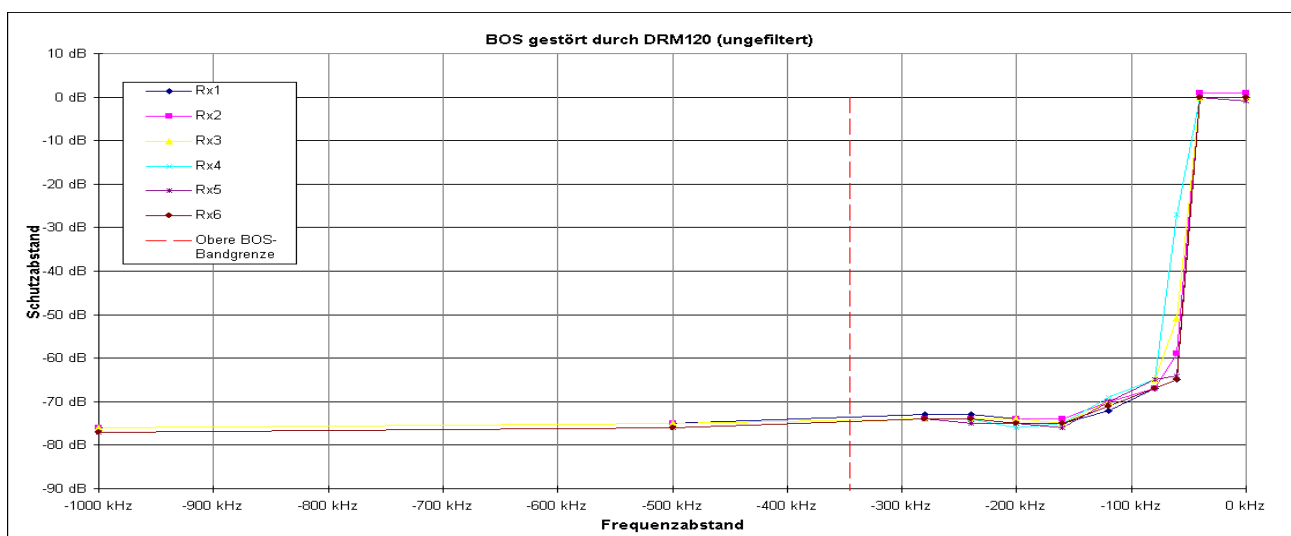


Abbildung 6.12.: Schutzabstände für BOS gestört durch DRM120 (ungefiltert)

Wie der Abbildung zu entnehmen ist, weisen die Schutzabstände aller Empfänger nur eine gerin-

ge Streuung auf. Die Unterschiede der Schutzabstände zwischen dem Nebenanfall und bei großen Frequenzabständen entsprechen ungefähr dem Seitenbandverlauf des DRM120-Signals. Daraus kann man schliessen, daß alle Empfänger in ihrem linearen Bereich arbeiten und das der einzige Störeinfluss auf die Geräte durch das Seitenbandrauschen des DRM120-Signals im Bereich der BOS-Kanäle gegeben ist. Die Schutzabstandsmessungen mit dem gefiltertem DRM120-Signal konnten nur für reale Frequenzabstände von -345 kHz und größer durchgeführt werden, da daß verfügbare Ausgangsfilter des DRM120-Signals während dieser Messreihe fix auf eine Frequenz von $87,6$ MHz abgestimmt ist. Die nachstehende Abbildung zeigt die Ergebnisse für das jeweils kritischste Interferenzkriterium.

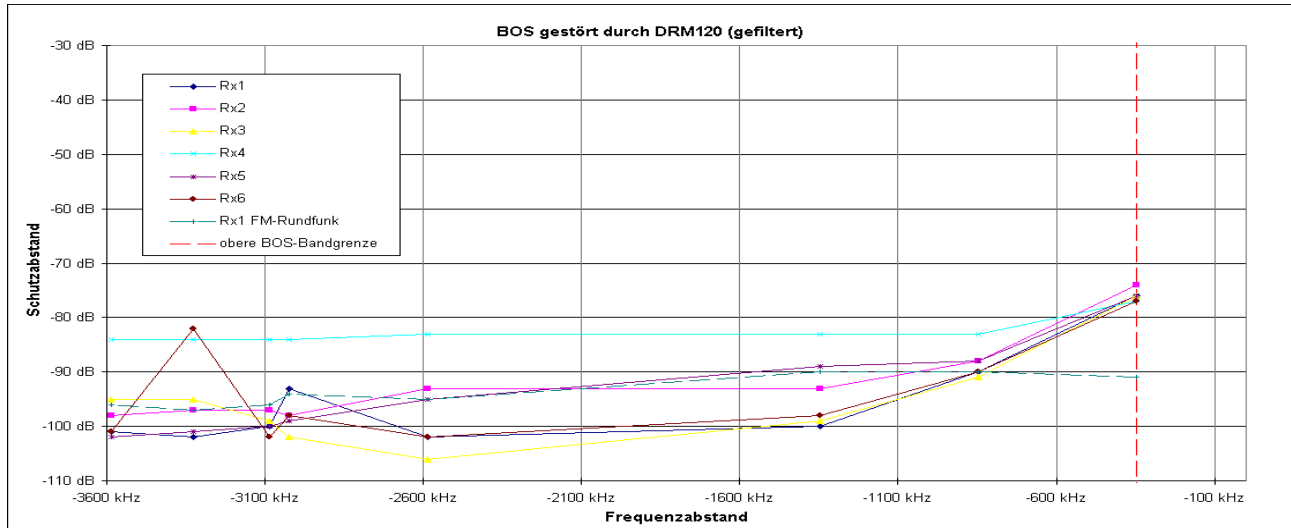


Abbildung 6.13.: Schutzabstände für BOS gestört durch DRM120 (gefiltert)

Anhand der Abbildung kann man erkennen das nach Ausfilterung des Seitenbandrestrauschens bereits die Anwesenheit eines hochpegeligen DRM120-Signals zu einem störendem Faktor wird. Inwiefern dieser Umstand sich auf die Empfänger auswirkt ist insbesondere durch den Aufbau des jeweiligen Geräts bedingt. Einige der Geräte (insbes. Rx4) scheinen in ein nichtlineares Verhalten aufgrund des hohen Summeneingangspegels überzugehen. Dies ist nicht weiter verwunderlich wenn man bedenkt, das bei einer Nutzsignalleistung von ca. -100 dBm das Störsignal mit ca. 0 dBm in den Empfänger eingespeist wird.

Zum Vergleich ist der gemessene Schutzabstand für FM-Rundfunksignale in der Abbildung mit angegeben (s. auch Kap. 6.3.2). Abgesehen von dem Verhalten im Frequenzbereich ab $86,755$ MHz und aufwärts sowie der geringeren Großsignalfestigkeit von Rx4 ist der störende Effekt eines gefilterten DRM120-Signals ungefähr gleich bis geringer im Vergleich zu FM-Rundfunksignalen.

6.4.3. DRM120 vs. Flugfunk VOR

Der Aufbau zu den Messungen der Schutzabstände gegenüber dem VOR-Dienst ist in Abb.6.3 dargestellt. Die VOR-Nutzfrequenz von $108,0$ MHz wurde während der Messung beibehalten, daß DRM120-Signal wurde von der Startfrequenz $107,9$ MHz nach unten verschoben. Die mit dem erhöhtem Nutzsignalpegel gemessenen Schutzabstände sind fast gleich denen der Messung bei niedrigem Nutzpegel. Somit kann angenommen werden, daß der Empfänger sich noch im linearen Betriebsbereich befindet und das der einzige störende Einfluß durch die Seitenbandaussendungen des DRM120-Signals gegeben ist.

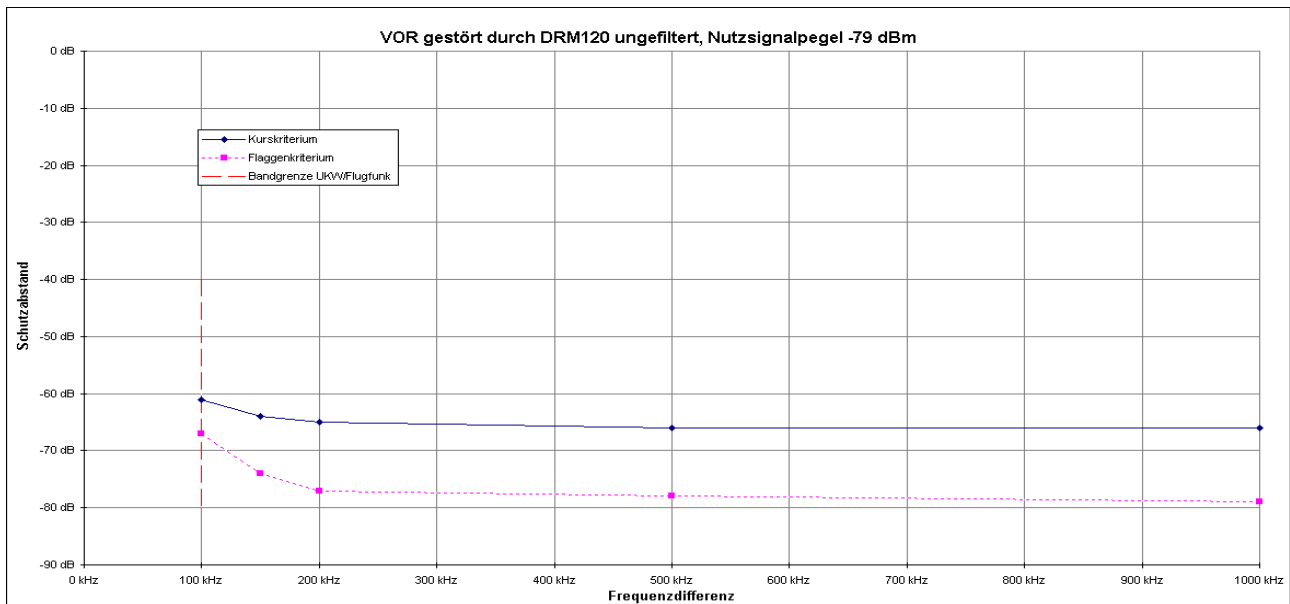


Abbildung 6.14.: Schutzabstände für den VOR-Dienst gestört durch DRM120

Zur Messung der Schutzabstände mit dem gefiltertem DRM120-Signal wurde ein durchstimmbares Bandpassfilter (Nr. 39 in Anhang A) als Ausgangsfilter verwendet. Im Frequenzbereich 108 MHz weist das Filter ungefähr die gleiche Bandbreite und Stoppbanddämpfung wie das auf 87,6 MHz fix abgestimmte Filter auf. Diese Maßnahme war notwendig, um bei den Messungen eine freie Wahl der Sendefrequenz inkl. Filtermittenfrequenz zu haben. Nach Einbau des Filters wurde zu den Messungen das Störsignal wiederum inkl. der Filtermittenfrequenz von 107,9 MHz aus abwärts verschoben. In der folgenden Abbildung ist wiederum nur das Störkriterium 'Kurs' inkl. einem Vergleich zu der Schutzabstandskurve FM-Rundfunk angegeben, da dieses das kritischere Störkriterium ist. Man kann erkennen, daß das FM-Signal für Bereiche von bis zu 200 kHz ein erheblich höheres Störpotential aufweist. An diesem Punkt wechselt das Verhalten. Das DRM120-Signal wird nun zur Quelle der stärkeren Störungen bei Frequenzabständen von 200 ··· 1000 kHz (zwischen 108,2 ··· 108,9 MHz). Jenseits dieses Frequenzbereichs weisen beide Signalarten das gleiche Störpotential auf. Die Messungen zu diesem höheren Frequenzbereich sind den Anhängen zu entnehmen. Es ist zu beachten, daß die Unterdrückung des Seitenbandausstrahlung am besten bei dem FM-Rundfunksignal ist. Dies ist der Hauptgrund für die niedrigeren Schutzabstände.

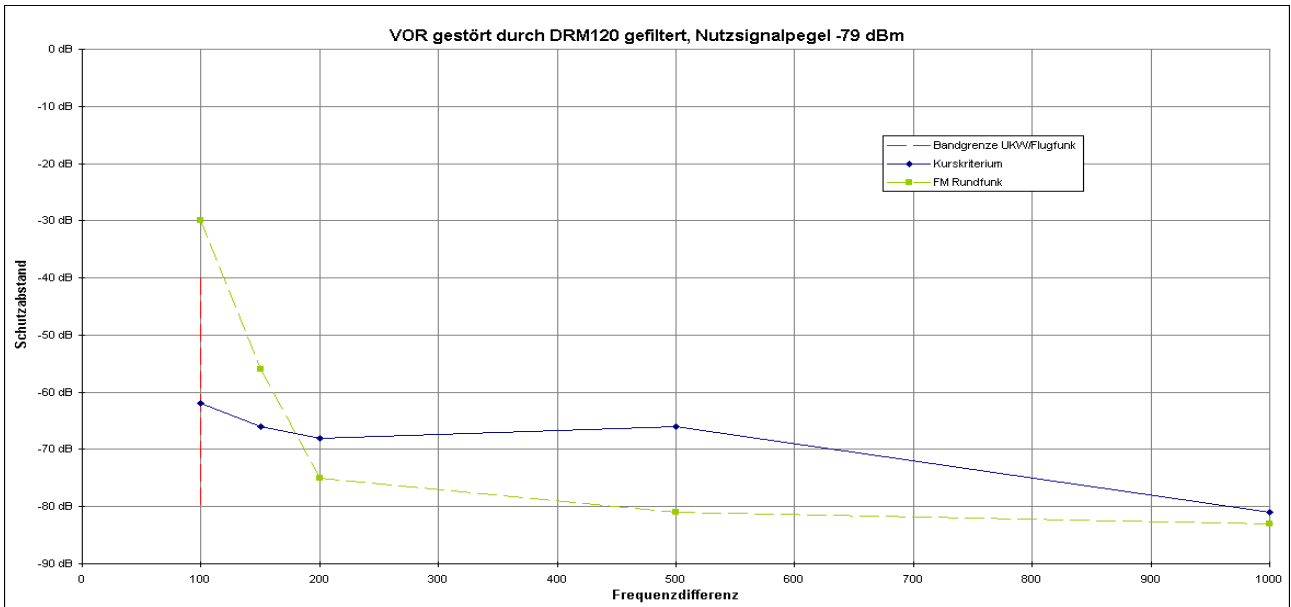


Abbildung 6.15.: Schutzabstände für den VOR-Dienst gestört durch DRM120, mit Ausgangsfilterung

Darüberhinaus wurde untersucht, inwiefern die Lage der Subträger des OFDM-Signals einen Einfluss auf den VOR-Empfang hat. Hierzu wurden zusätzliche Messungen bei Frequenzabständen zwischen 100 ··· 100,8 kHz mit einer Schrittweite von 20 kHz ausgeführt. Dabei ergab sich kein messbarer Unterschied der Schutzabstände. Dies beweist, daß das DRM120-Signal tatsächlich wie ein gleichmäßig über der Signalbandbreite verteiltes Rauschen auf den VOR-Empfänger wirkt. Entsprechend fiel während den Messungen im allgemeinen auf, daß bei Störungen durch digitale Systeme das Lichtzeigerinstrument aperiodische Schwankungen anzeigt.

In der folgenden Abbildung 6.16 ist die spektrale Situation bei Beginn der Kursstörung festgehalten.

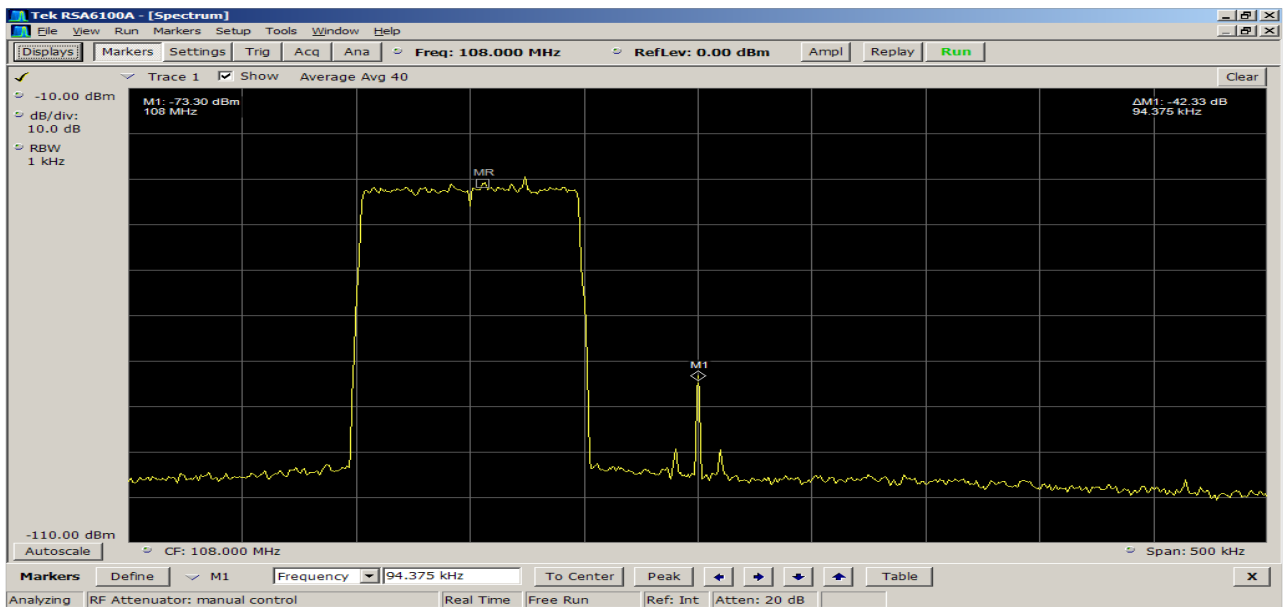


Abbildung 6.16.: Spektrum des ungewollten DRM120-Signals (107,9 MHz) und des gewollten VOR-Signals (108,0 MHz) bei Beginn der Kursstörung

6.4.4. DRM120 vs. Flugfunk ILS Localizer

Der Aufbau zu den Messungen der Schutzabstände gegenüber dem ILS-Dienst ist in Abb.6.3 dargestellt. In diesem Fall wurden die Empfängerdaten durch den ILS-Kursanzeiger dargestellt.

Die Frequenz des ILS-Nutzsignals wurde fix auf 108,1 MHz eingestellt. Die Frequenz des ungewollten DRM120-Signals wurde von der Frequenz 107,9 MHz an abwärts geschoben. Die Resultate sind der nachstehenden Abbildung 6.17 zu entnehmen.

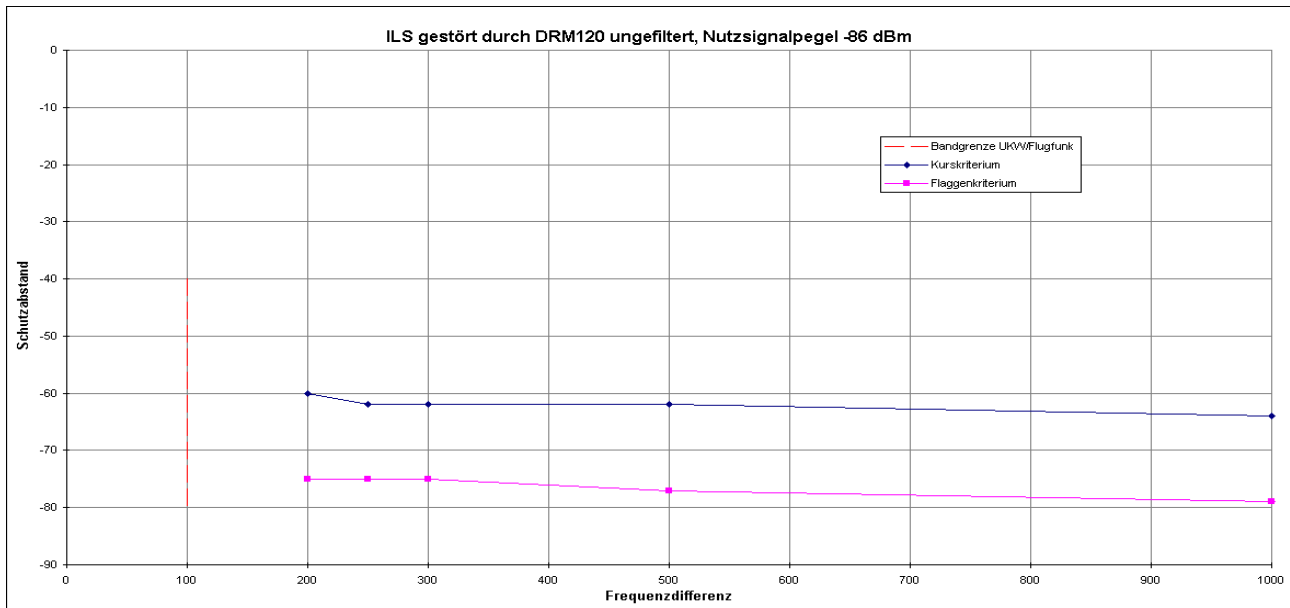


Abbildung 6.17.: Schutzabstände für den ILS-Dienst gestört durch DRM120

Zusätzliche Messungen mit dem erhöhten Signalpegel (s. Kapiteleinleitung) führten zu identischen Schutzabständen, so daß davon auszugehen ist, daß der Empfänger noch im linearem Bereich arbeitet und das der einzige störende Effekt durch den Seitenbandverlauf des DRM120-Signals gegeben ist. In der folgenden Abbildung 6.18 ist die Messung der Schutzabstände mit dem gefiltertem DRM120-Signal als Störquelle dargestellt. Das Interferenzpotential des DRM120-Signals ist bei kleinen Frequenzdifferenzen höher als das eines FM-Rundfunksignals. Die Graphen schneiden sich jedoch aufgrund der Filterung bei ca. 950 kHz, so daß die Störwirkung des gefilterten DRM120-Signals unterhalb der des FM-Signals absinkt. Auch hier ist der dominierende Störeffekt die Seitenbandaussendung des Signals, die bei dem FM-Signal geringer ist.

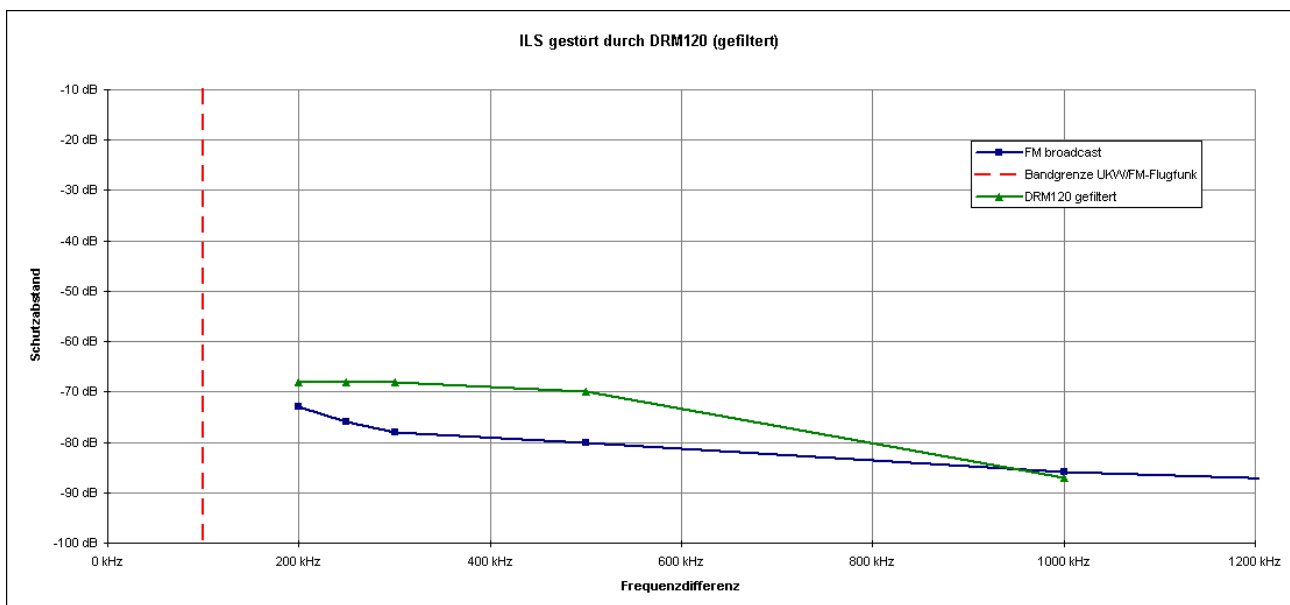


Abbildung 6.18.: Schutzabstände für den ILS-Localizer gestört durch DRM120 mit Ausgangsfilter

Darüberhinaus wurde untersucht, inwiefern die Lage der Subträger des OFDM-Signals einen Einfluss auf den ILS Localizer-Empfang hat, wurden zusätzliche Messungen bei Frequenzabständen zwischen $200 \dots 200,8$ kHz mit einer Schrittweite von 20 kHz ausgeführt. Dabei ergab sich kein messbarer Unterschied der Schutzabstände. Dies beweist, daß das DRM120-Signal tatsächlich wie ein gleichmäßig über der Signalbandbreite verteiltes Rauschen auf den ILS Localizer-Empfänger wirkt.

6.5. HD-Radio™ als Störer

6.5.1. HD-Radio™ vs. FM-Rundfunk

Zu dieser Messung wurde der in Abbildung 6.1 dargestellte Aufbau verwendet. Die Schutzabstandsmessungen wurden durchgeführt, indem das HD-Radio™-Signal im Frequenzbereich durch den Empfangsbereich des untersuchten FM-Empfängers geschoben wurde. Die folgende Abbildung fasst die Ergebnisse der S/N-Störung bei dem minimalen Empfängereingangspegel zusammen, s. auch Kap. 6.1. Zum Vergleich ist die Schutzabstandskurve für den FM-Rundfunk bei dauerhafter Störung aus [ITU02a] in das Diagramm mit aufgenommen worden.

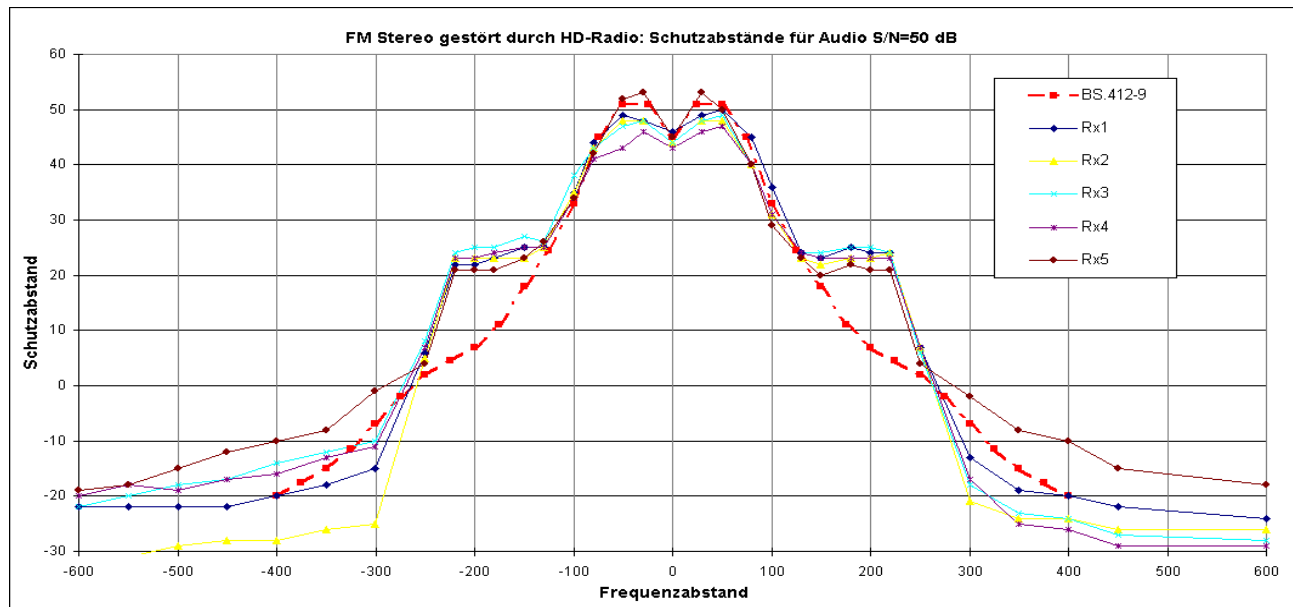


Abbildung 6.19.: Schutzabstände für FM-Stereoempfang gestört durch HD-Radio™

Bei Frequenzabständen von bis zu ± 150 kHz ist der störende Effekt des HD-Radio™-Signals vergleichbar mit einer Störung durch bisherigen FM-Rundfunk. Für Frequenzabstände im Bereich ± 150 kHz \cdots 250 kHz sind die notwendigen Schutzabstände um bis zu 20 dB höher als im bisherigen FM-Rundfunk. Da durch die Messungen aus Kap. 6.3.1 bekannt ist, daß für die verwendeten Empfänger im Mittel bessere Schutzabstände im Vergleich zur Nennkurve aus [ITU02a] gelten, kann aus den Messungen entnommen werden, daß das Störpotential von HD-Radio™ im Bereich von ca. ± 150 kHz \cdots 250 kHz höher als bei den bestehenden FM-Rundfunksendungen ist. Zusätzliche Messungen mit dem Empfänger Rx4 mit einem erhöhtem Nutzsignalpegel führten zu gleichen Schutzabständen. Somit ist gezeigt, daß der Empfänger sich im linearen Arbeitsbereich befindet und der einzige störende Effekt durch die digitalen Seitenbänder und Ausserbandaussendungen des HD-Radio™-Signals ist.

Die in Abb. 6.20 dargestellten gemessenen Schutzabstände für die Wirkung von HD-Radio™ auf das RDS-System zeigen das auch hier wiederum die Aussage gilt, daß der RDS-Dienst erst dann gestört wird, wenn das Störkriterium der Audioübertragung bereits überschritten ist. Der kritische Bereich, in dem die digitalen Seitenbänder in Abb. 6.19 über die Planungskurve hinausragen, tritt auch hier wieder deutlich in Erscheinung.

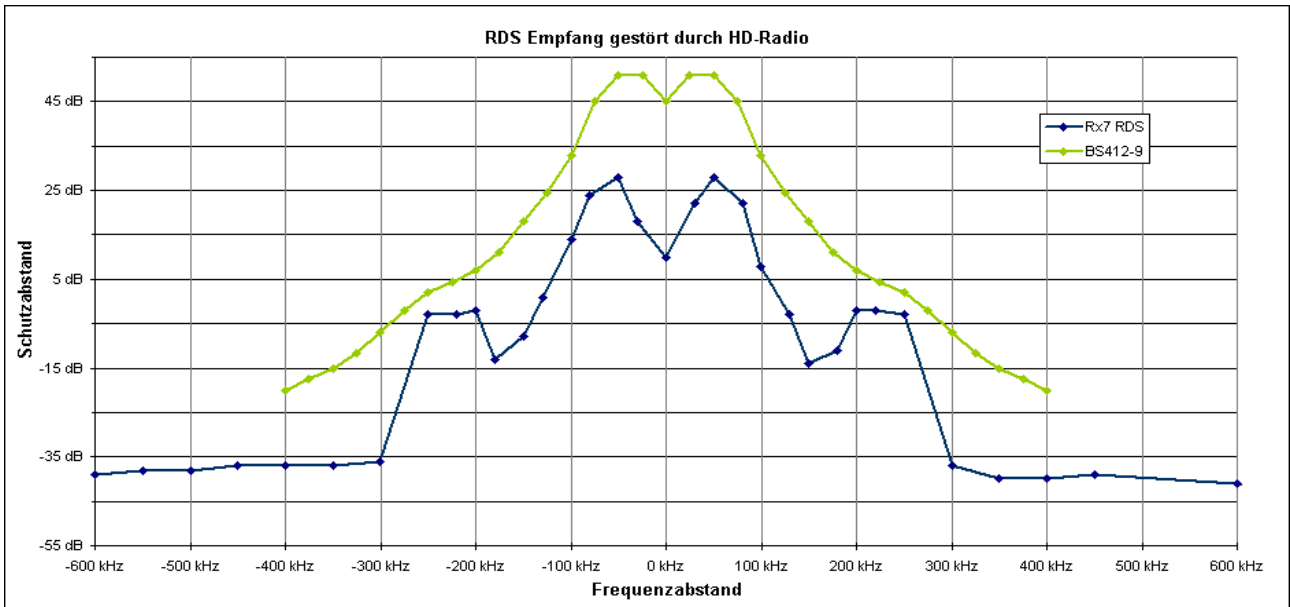


Abbildung 6.20.: Schutzabstände für den RDS-Empfang bei Störung durch HD-RadioTM

Die nachfolgende Abbildung 6.21 zeigt die Situation im Frequenzspektrum bei Beginn der S/N-Störung. Die HD-RadioTM -Sendung befindet sich dabei in einem Abstand von 200 kHz zu dem FM-Nutzsignal. Zum Vergleich ist zusätzlich die gleiche Situation für einen FM-Störer in grün dargestellt. Man kann erkennen, daß der Pegel des HD-RadioTM -Senders in diesem Fall um 39 dB geringer im Vergleich zu einem FM-Störer sein muss, um das Störkriterium einzuhalten.

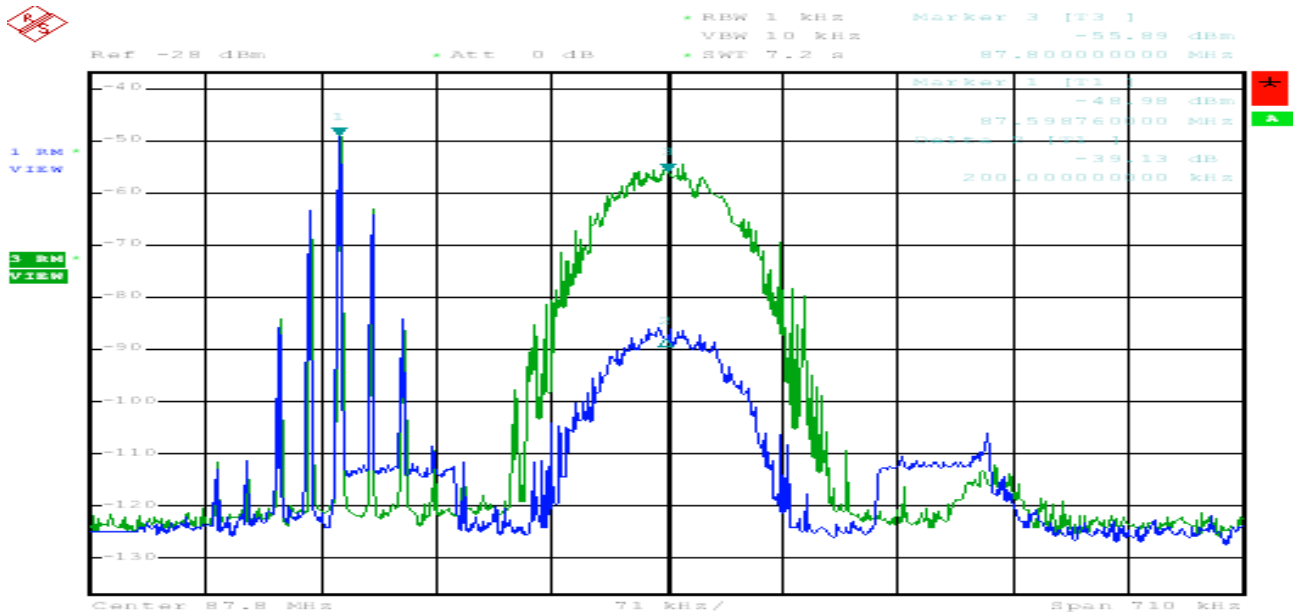


Abbildung 6.21.: Beginn der S/N-Störung: FM gestört durch HD-RadioTM (blau) bzw. FM (grün). Frequenz des Nutzsenders 87,6 MHz; Frequenz der Störsender jeweils 87,8 MHz

6.5.2. HD-RadioTM vs. BOS-Sprechfunk

Zu dieser Messung wird der in Abb. 6.2 dargestellt Messaufbau verwendet. Die folgenden Abbildungen der Messergebnisse zeigen die Schutzabstände für das jeweils kritischste der in Abschnitt 4.2.2 definierten Störkriterien.

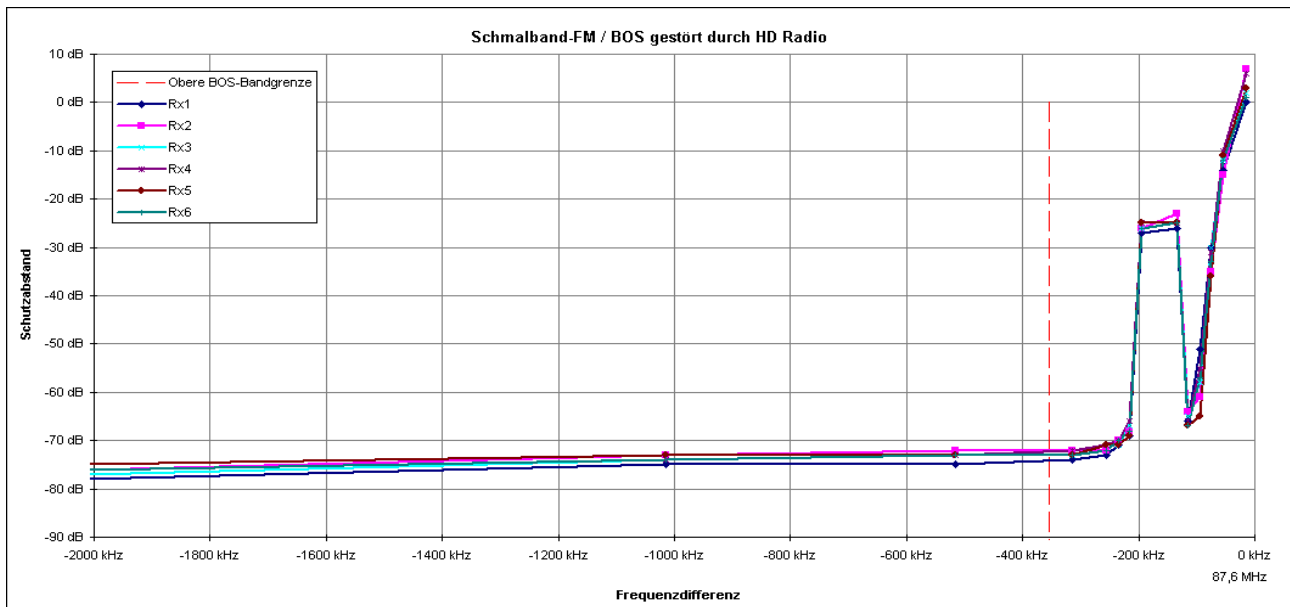


Abbildung 6.22.: Schutzabstände für den BOS-Dienst gestört durch HD-RadioTM

Wie der Abbildung zu entnehmen ist, weisen die Schutzabstände aller Empfänger nur eine geringe Streuung auf. Die Unterschiede der Schutzabstände zwischen dem Nebkanalfall und bei großen Frequenzabständen entsprechen ungefähr dem Seitenbandverlauf des HD-RadioTM-Signals. Daraus kann man schließen, daß alle Empfänger in ihrem linearen Bereich arbeiten und das der einzige Störeinfluss auf die Geräte durch das Seitenbandrauschen des HD-RadioTM-Signals im Bereich der BOS-Kanäle gegeben ist. Im Vergleich zum DRM120 (ungefiltert) weist HD-RadioTM keinen nennenswerten Unterschied im Bezug auf das Störpotential des BOS-Dienstes auf.

6.5.3. HD-RadioTM vs. Flugfunk VOR

Der Aufbau zu den Messungen der Schutzabstände gegenüber dem VOR-Dienst ist in Abb.6.3 dargestellt. Die VOR-Nutzfrequenz von 108,0 MHz wurde während der Messung beibehalten, daß HD-RadioTM-Signal wurde von der Startfrequenz 107,9 MHz aus nach unten verschoben. Die mit dem erhöhtem Nutzsignalpegel gemessenen Schutzabstände sind fast gleich denen in der obigen Abbildung. Somit kann angenommen werden, daß der Empfänger sich noch im linearen Betriebsbereich befindet und das der einzige störende Einfluß durch die Seitenbandaussendungen des HD-RadioTM-Signals gegeben ist.

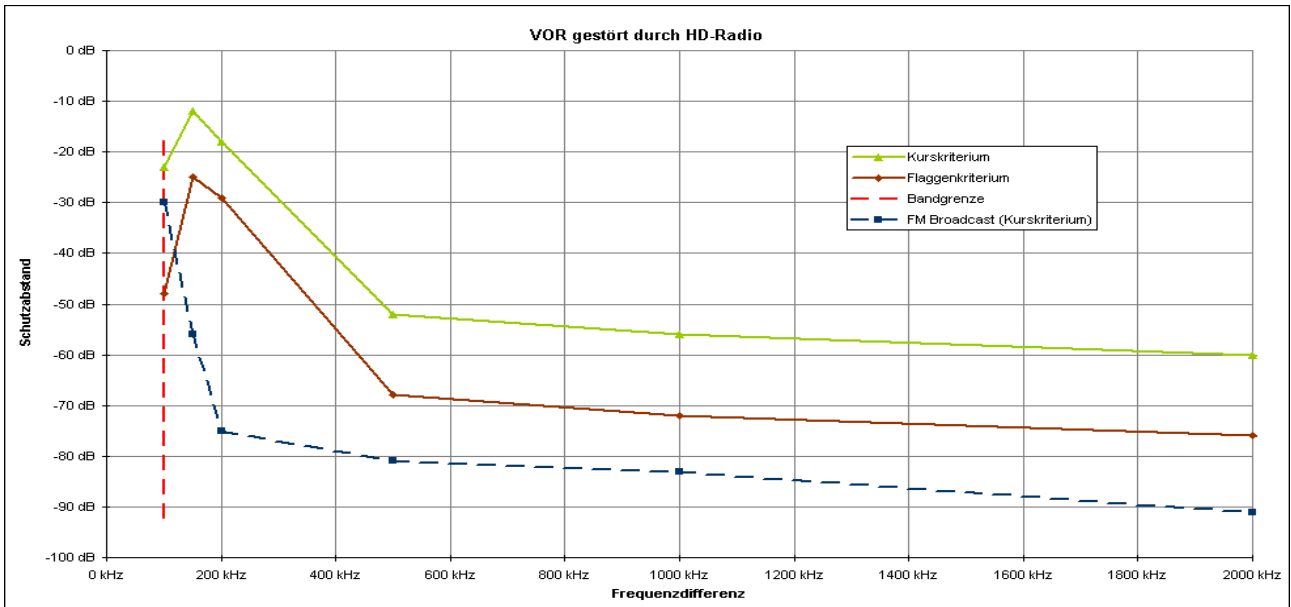


Abbildung 6.23.: Schutzabstände für den VOR-Dienst gestört durch HD-RadioTM

Zum Vergleich ist als Referenz die Schutzabstandskurve der Kursstörungen gegenüber dem FM-Rundfunksignal in der Abbildung enthalten. Man kann sehen, daß das Störpotential von HD-RadioTM im Vergleich dazu hier wesentlich höher ist. Es ist an dieser Stelle wichtig festzuhalten, daß bei den HD-RadioTM-Sende­frequenzen 107,9 MHz und 107,8 MHz das HD-RadioTM-Senderspektrum noch in den Bereich des ersten VOR-Kanals hineinragt. Anhand der Messdaten kann man erkennen, daß die Störungen durch das obere digitale Seitenband sich noch bei Frequenzabständen von bis zu 500 kHz bemerkbar machen. Auch bei größeren Frequenzabständen ist die störende Wirkung von HD-RadioTM höher im Vergleich zu einem FM-Rundfunksignal, was allerdings durch eine entsprechende senderseitige Filterung verbessert werden kann. In der in der folgenden Abbildung gezeigten Situation ist das Spektrum eines HD-RadioTM-Senders bei 107,8 MHz sowie einer VOR-Sendung bei 108,0 MHz zu sehen. Die dargestellten Pegelverhältnisse stellen den Punkt beim Beginn der Störung der Kursanzeige dar. Man kann deutlich erkennen, daß bei dieser Frequenzdifferenz das obere digitale Seitenband des HD-RadioTM-Senders sich im Flugfunkband befindet.

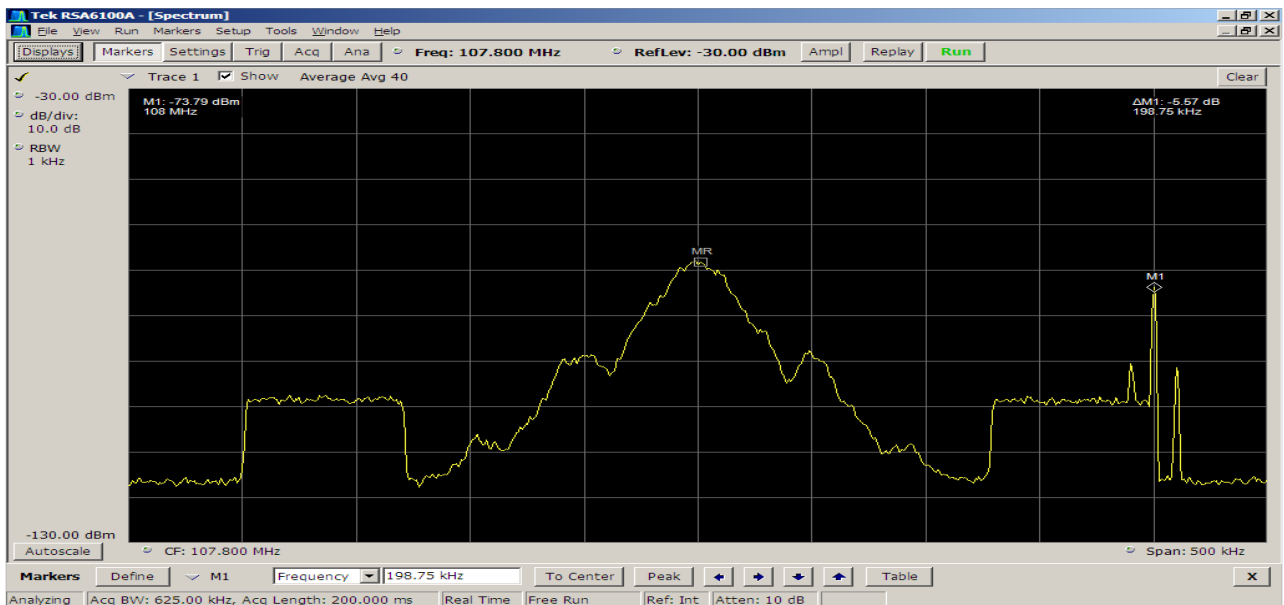


Abbildung 6.24.: Spektrum des ungewollten HD-RadioTM-Signals (107,8 MHz) und des gewollten VOR-Signals (108,0 MHz) bei Beginn der Kursstörung

6.5.4. HD-Radio™ vs. Flugfunk ILS Localizer

Der Aufbau zu den Messungen der Schutzabstände gegenüber dem ILS-Dienst ist in Abb.6.3 dargestellt. In diesem Fall werden die Empfängerdaten durch den ILS-Kursanzeiger dargestellt.

Die Frequenz des ILS-Nutzsignals wurde auf 108,1 MHz eingestellt. Die Frequenz des ungewollten HD-Radio™ -Signals wurde von der Frequenz 107,9 MHz an abwärts geschoben. Die Resultate sind der nachstehenden Abbildung zu entnehmen.

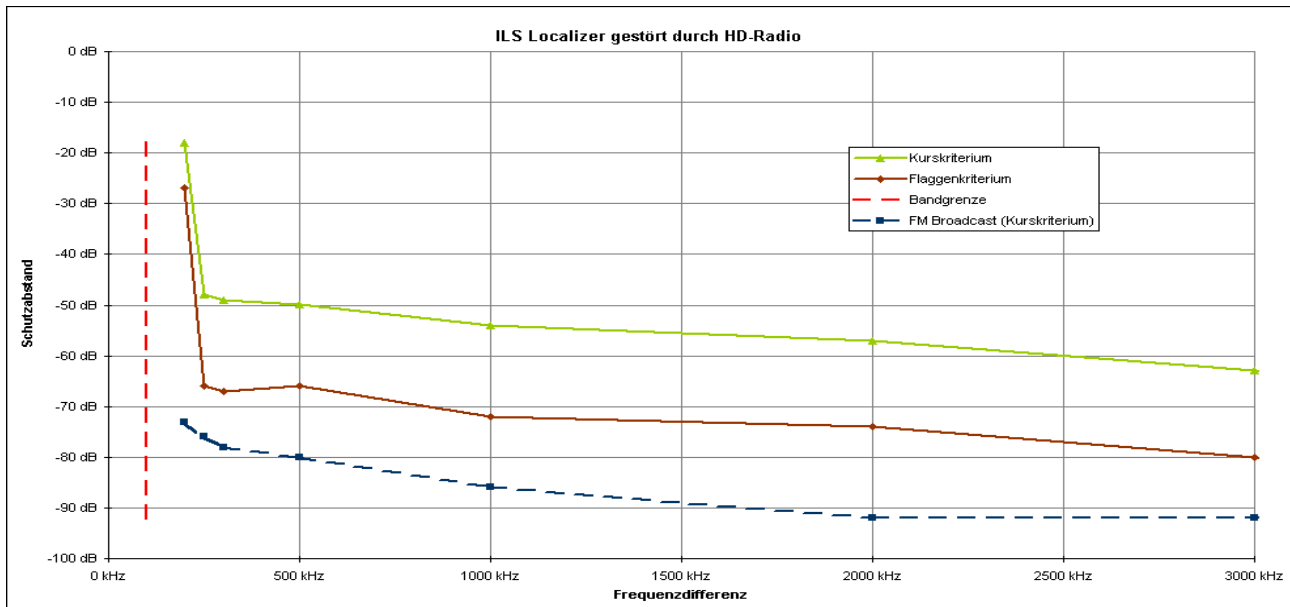


Abbildung 6.25.: Schutzabstände für den ILS-Dienst gestört durch HD-Radio™

Zusätzliche Messungen mit dem erhöhten Signalpegel (s. Kapiteleinleitung) führten zu identischen Schutzabständen, so daß davon auszugehen ist, daß der Empfänger noch im linearem Bereich arbeitet und das der einzige störende Effekt durch den Seitenbandverlauf des HD-Radio™ -Signals gegeben ist. Zum Vergleich sind in der Grafik die Schutzabstände für die Kursdetektion gegenüber dem FM-Rundfunkdienst dargestellt. Es ist erkennbar das der ILS Localizer im Vergleich dazu durch HD-Radio™ wesentlich stärker gestört wird. Dies trifft insbesondere für Frequenzabstände von bis zu 300 kHz zu. Der wesentlichste Grund hierfür ist die Tatsache, daß bei einer HD-Radio™ -Sendefrequenz von 107,9 MHz das Spektrum in den ersten ILS-Localizerkanal (108,1 MHz) hineinragt. Die Seitenbandaussendungen des zur Verfügung stehenden HD-Radio™ -Signals sind wesentlich höher im Vergleich zu dem des verwendeten FM-Signals. Dies ist der wesentliche Grund für das scheinbar höhere Störpotential von HD-Radio™ bei größeren Frequenzdifferenzen.

7. Vergleich der Messergebnisse

7.1. Schutz des FM-Rundfunks

Die folgende Abbildung fasst die Schutzabstände für den FM-Stereorundfunk gegenüber den untersuchten Sendeformaten zusammen. Die Grafik vergleicht die Messergebnisse für den Empfänger Rx1.

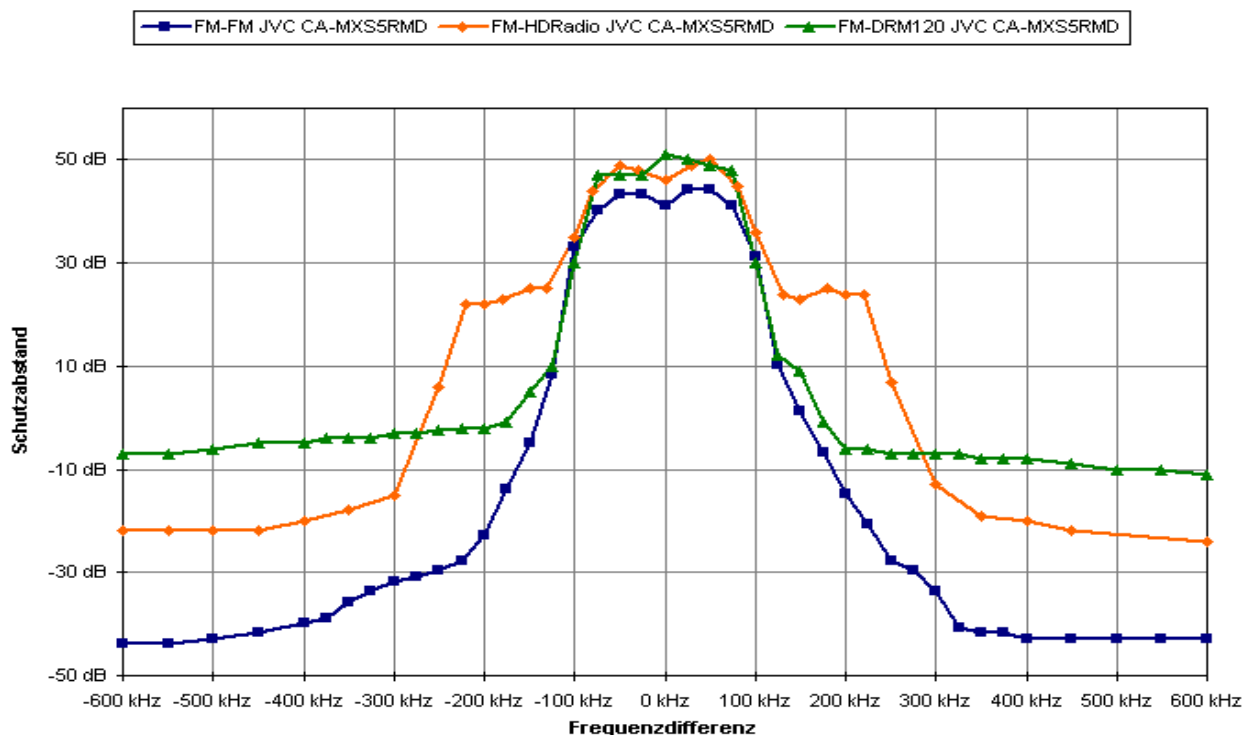


Abbildung 7.1.: Zusammenfassung: Schutzabstände für den FM-Rundfunk

Man kann erkennen, daß beide digitalen Systeme ein gewisses Störpotential gegenüber dem FM-Signal darstellen. Bei HD-RadioTM begründet sich dieses vor allem durch die höhere Signalbandbreite. Gegenüber dem FM-Signal zeigt DRM120 im Bereich ± 200 kHz ein vergleichbares Interferenzpotential. Für größere Frequenzabstände steigt dieses allerdings je nach Empfängertyp über das Maß des Störverhaltens des FM-Rundfunks und HD-RadioTM an. Hierbei ist zu bedenken, daß das DRM120-System komplett digital sendet, so daß die benötigten Sendeleistungen um ca. 20 dB geringer sind als im analogen Fall. Das heißt, daß trotz scheinbar schlechteren Schutzabständen es nicht zwangsweise zu einer Reduktion des Versorgungsgebietes kommt. Diese Option besteht aufgrund der hybriden Natur des Signals für HD-RadioTM nicht.

Bei HD-RadioTM trägt die analoge Aussendung den größten Anteil der Sendeleistung. Es ist davon auszugehen, daß der bei DRM120 sichtbare Effekt in den Nachbarkanälen daher nur maskiert ist. In Kap. 8 wird gezeigt, daß dieses Verhalten auch im volldigitalen Betrieb von HD-RadioTM zu erwarten ist.

In der folgenden Abbildung 7.2 sind die Schutzabstände für das RDS-System für alle vermessenen Störsignale zusammengefasst. Gegenüber allen Störsignalen ist dieser Dienst wesentlich robuster im Vergleich zu der Audioübertragung.

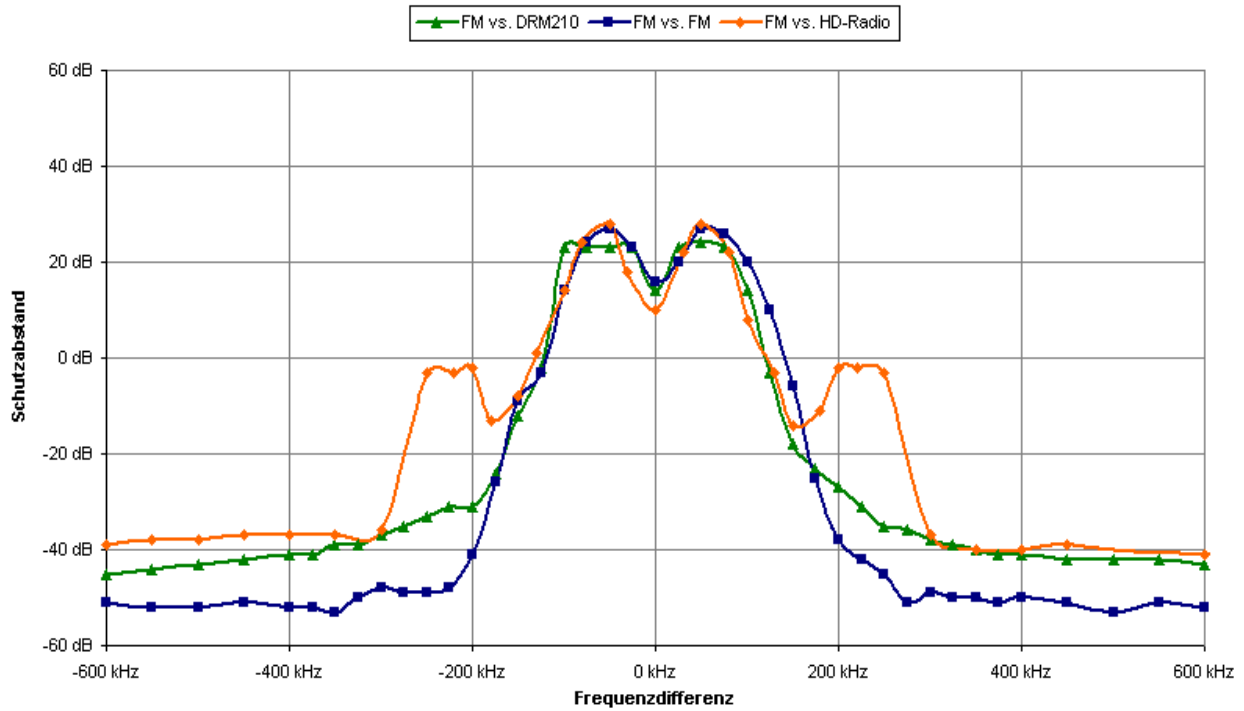


Abbildung 7.2.: Zusammenfassung: Schutzabstände für den RDS-Dienst

7.2. Schutz des BOS-Dienstes / Schmalband FM-Signale

Die folgende Abbildung fasst die Schutzabstände für den BOS-Funk gegenüber den untersuchten Sendeformaten zusammen. Die Grafik zeigt die Messergebnisse für den kritischsten Empfänger und das jeweils kritischste Störkriterium.

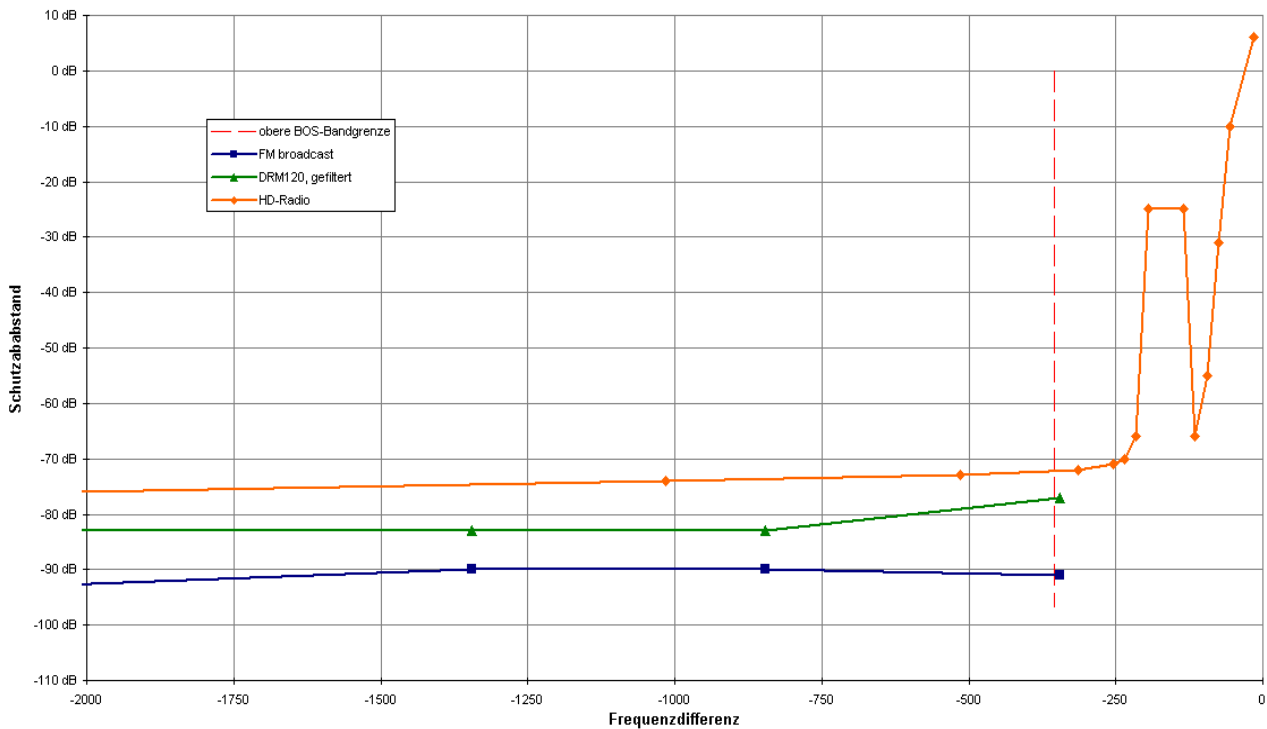


Abbildung 7.3.: Zusammenfassung: Schutzabstände für den BOS-Dienst

Alle untersuchten digitalen Systeme scheinen im Vergleich zu einem FM-Rundfunksignal ein höheres Störpotential zu haben. Zusätzliche Messungen mit einem erhöhtem Nutzsignalpegel haben gezeigt, daß alle Empfänger noch im linearen Bereich arbeiten. Dies bedeutet, daß der Schutzabstand lediglich durch die verbleibenden Seitenbandaussendungen auf den BOS-Frequenzen bestimmt wird. Somit kann diese Situation durch eine Filterung am Ausgang des digitalen Senders verbessert werden.

7.3. Schutz des Flugfunks (VOR)

Die folgende Abbildung zeigt die Schutzabstände für den VOR-Empfang gegenüber den untersuchten Sendeformaten. Die Darstellung zeigt nur die Schutzabstände für das Störkriterium 'Kurs', da dieses das wesentlich kritischere ist.

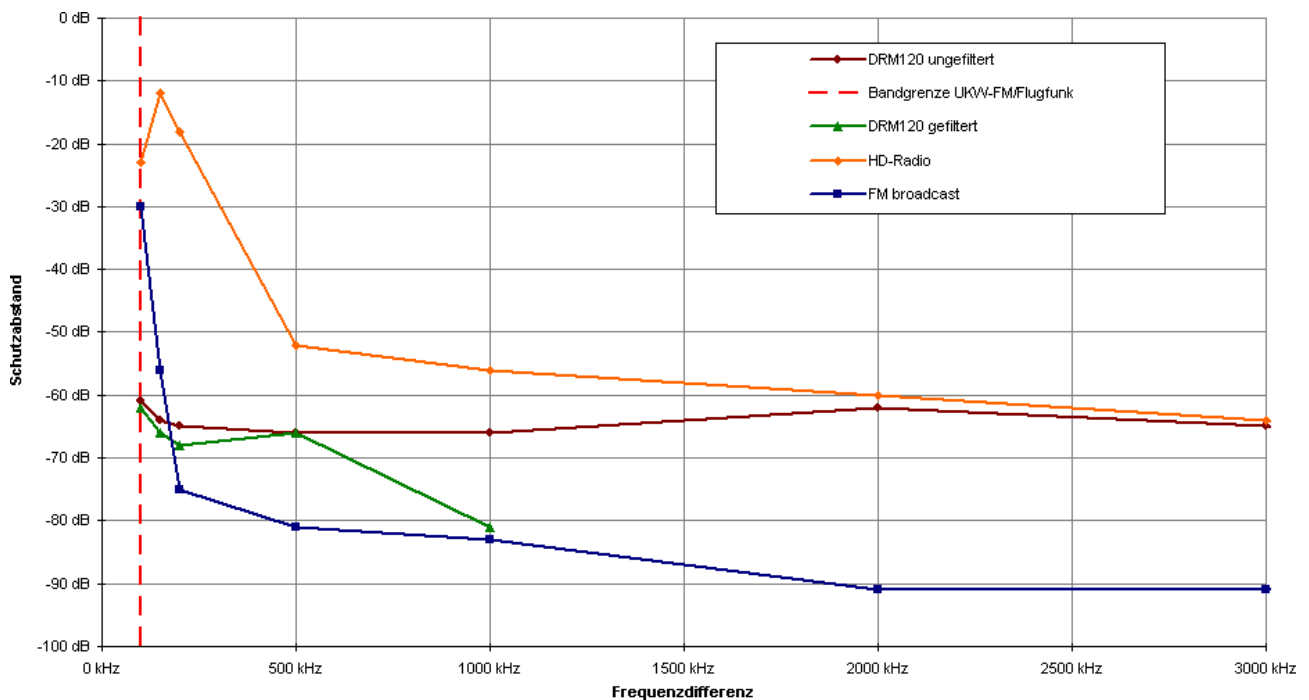


Abbildung 7.4.: Zusammenfassung: Schutzabstände für den VOR-Dienst

Anhand der Graphen ist erkennbar, dass alle untersuchten Systeme ein tendenziell höheres Störpotential im Vergleich zum FM-Rundfunk haben. Messungen mit einem erhöhtem Signalpegel führten zu den gleichen Schutzabständen. Somit ist gezeigt, dass der Empfänger noch im linearen Bereich arbeitet. Dies bedeutet, dass die Schutzabstände lediglich durch die Seitenbandaussendungen auf der jeweiligen VOR-Frequenz der digitalen Sender bestimmt werden. Somit kann die Situation durch eine senderseitige Filterung verbessert werden. An der Tendenz des Kurvenverlaufs 'DRM120 gefiltert' ist zu erkennen, dass die Kurve den Graphen 'FM broadcast' knapp oberhalb vom 1 MHz womöglich sogar schneidet. Darüberhinaus ist in Bezug auf die Verträglichkeit von HD-RadioTM und dem VOR-Empfang festzuhalten, dass ein Betrieb von HD-RadioTM oberhalb der Sendefrequenz 107,7 MHz nicht möglich ist, da das HD-RadioTM-Nutzspektrum in die unteren VOR-Kanäle hineinragt.

7.4. Schutz des Flugfunks (ILS Localizer)

Die folgende Abbildung zeigt die Schutzabstände für den ILS-Empfang gegenüber den untersuchten Sendeformaten. Die Darstellung zeigt nur die Schutzabstände für das Störkriterium 'Kurs', da dieses das wesentlich kritischere ist.

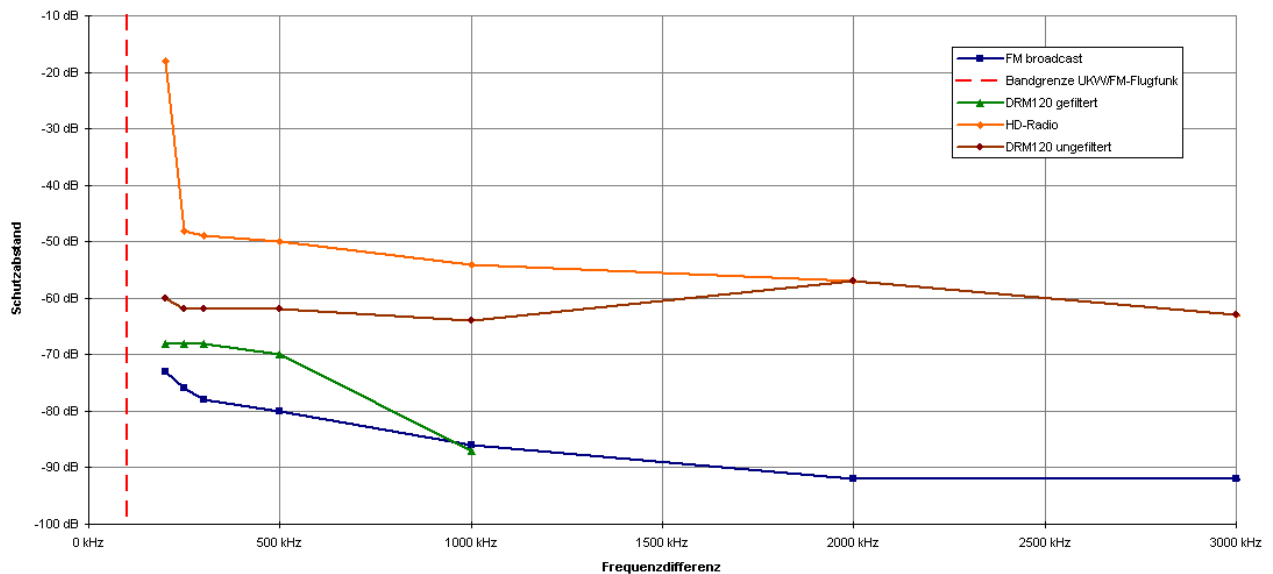


Abbildung 7.5.: Zusammenfassung: Schutzabstände für den ILS-Localizer-Dienst

Gegenüber dem Empfang von ILS-Localizer-Signalen scheint HD-RadioTM ein erheblich höheres Störpotential als der bisherige FM-Rundfunk aufzuweisen. Bei dem DRM120-Signal zeigt sich die Tendenz, daß die Schutzabstände im Vergleich zum FM-Rundfunk noch geringer sind. Messungen mit einem erhöhtem Signalpegel führten zu den gleichen Schutzabständen. Somit ist gezeigt, daß der Empfänger noch im linearem Bereich arbeitet. Dies bedeutet, daß die Schutzabstände lediglich durch die Seitenbandaussendungen auf der jeweiligen VOR-Frequenz der digitalen Sender bestimmt werden. Somit kann die Situation durch eine senderseitige Filterung verbessert werden, was im Falle von DRM120 gezeigt wurde.

Darüberhinaus ist in Bezug auf die Verträglichkeit von HD-RadioTM und dem VOR-Empfang zu sehen, daß ein Betrieb von HD-RadioTM oberhalb der Sendefrequenz 107,8 MHz nicht möglich ist, da das HD-RadioTM-Nutzspektrum in die untersten ILS-Localizerkanäle hineinragt.

8. Analyse des Verhaltens von FM-Empfängern gegenüber DRM120-Signalen

8.1. Einleitung

Vergleicht man die in Kapitel 6.4.1 gegebenen Ergebnisse mit den theoretischen Vorhersagen aus [Poo06, Ber05], so zeigen sich Unterschiede zwischen den vorhergesagten und tatsächlich gemessenen Schutzabständen. Im Gleichkanalbetrieb decken sich die Rechnungen mit den Messdaten, bei Frequenzdifferenzen $\Delta f > \pm 100$ kHz werden Effekte deutlich, die vor allen durch den Unterschied von realen und ideellen Empfänger geprägt sind. Um diese Diskrepanz zu begründen, wurden verschiedene Versuche angestellt. Darüberhinaus ist zu untersuchen, ob die Schutzabstände für Frequenzablagen $\Delta f > \pm 400$ kHz gemäß [ITU02a, Abschnitt 2.4] wesentlich unterhalb -20 dB liegen. Aus diesem Grund wurde eine Messreihe auf eine wesentlich größere Bandbreite ausgedehnt. Zudem wurde der Einfluß unterschiedlicher Crest-Faktoren, spektralen Formen (z.B. dreiecksförmiger Verlauf zur Annäherung an ein typisches FM-Leistungsdichtespektrum) von OFDM-Signalen und Modulationstypen im Hinblick auf den Schutzabstand gegenüber dem FM-Rundfunkdienst untersucht. In diesem Kapitel werden die wesentlichen Eckpunkte und Erkenntnisse dieser Untersuchungen niedergelegt, s.a. [SSRK07]. Gleichzeitig sind diesem Kapitel die Schutzabstände DRM120 gegenüber FM im UKW für große Frequenzdifferenzen verzeichnet.

8.2. Klassifizierung und Analyse verschiedener Bereiche von Schutzabstandsregionen

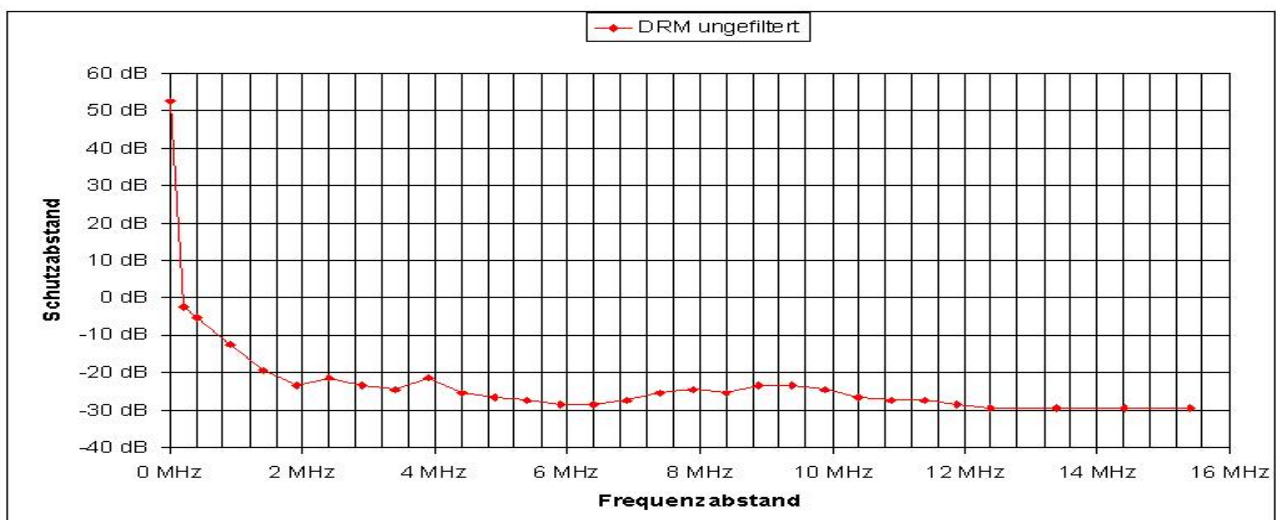


Abbildung 8.1.: Ausweitung der Schutzabstandmessung auf einen großen Frequenzbereich, Empfänger: Rx1

Die in Abb. 8.1 dargestellte Schutzabstandskurve zeigt die Ausdehnung der Messungen auf einen größeren Frequenzbereich. Nach Gegenprüfung mit einem Empfänger aus der Klasse der Autoradios konnte

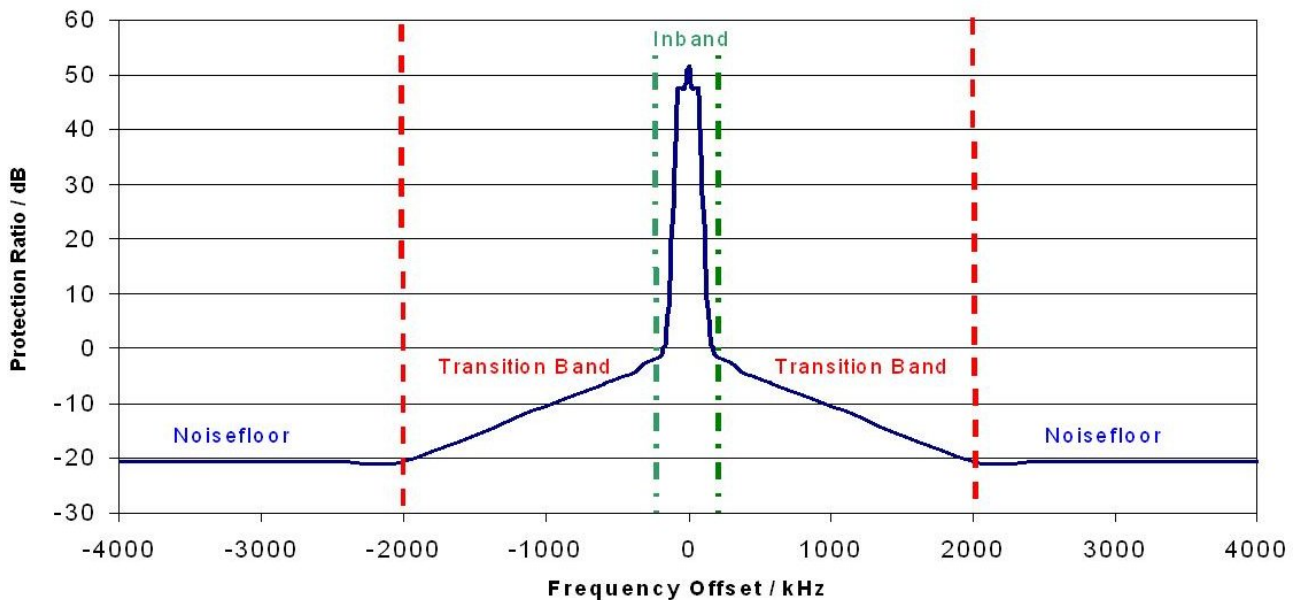


Abbildung 8.2.: Schematische Darstellung verschiedener Schutzabstandsregionen aus Empfängersicht

die Messkurve in drei unterschiedliche Bereiche eingeteilt werden, in denen verschiedene Effekte das Verhalten des Empfängers bestimmen. Diese drei unterschiedlichen Zonen gemäß der schematischen Darstellung in Abb. 8.2 sind:

- Gleichkanal („In-Band“)
- Übergangsband / Nachbarkanal („Transition Band“)
- Rauschbegrenzter Bereich („Noisefloor“)

Diese Teilbereiche werden in den folgenden Abschnitten separat diskutiert.

8.2.1. Gleichkanal

Dieser Bereich betrifft die Region mit Frequenzdifferenzen von bis zu $\Delta f > \pm 200$ kHz um den FM-Träger herum. In dieser Region decken sich die gemessenen Werte mit den Vorhersagen sowie der in [ITU02a] dokumentierten Schutzabstandskurve für FM-Störer gegenüber dem FM-Rundfunk. Auf nähere Untersuchungen kann an dieser Stelle somit verzichtet werden.

8.2.2. Rauschbegrenzter Bereich

In Abb. 8.1 ist erkennbar, dass der Schutzabstand mit steigender Frequenzdifferenz stetig abnimmt. Beginnend mit einer Frequenzdifferenz von $\Delta f > 2$ MHz geht die Meßkurve in einen Bereich über, in dem sich der Schutzabstand wesentlich langsamer ändert bzw. in einem konstantem Bereich einpendelt. Dieser „Sättigungseffekt“ begründet sich durch die Signalerzeugungskette, s. Abb. 5.6. Der Signalgenerator arbeitet im Quadraturmodus und erzeugt dabei einen breitbandigen Rauschteppich. Die damit assoziierte Rauschleistungsdichte steigt mit steigender Generatorausgangsleistung, auch wenn die Basisbandeingänge nicht angesteuert werden. Ebenso ist er von der Art der verwendeten digitalen Modulationsart unabhängig. Der Rauschteppich ist eine logische Folge des Mischungsprozesses und tritt nachweisbar auch bei anderen Signalgeneratoren auf, als Vergleichsgerät wurde ein Signalgenerator vom Typ Agilent E4433B herangezogen. Der Rauschanteil deckt sich mit den Angaben aus dem Datenblatt des SMU200A [Roh05]. Dieser Überlegung nach sind die in Abb. 8.1 gezeigten Schutzabstände im Bereich $|\Delta f| > 2$ MHz nicht durch die Reaktion des Empfängers auf das DRM120-Signal, sondern durch Rauschen bestimmt.

Zur Korrektur dieses Messfehlers und als Beweis dieser Überlegung wurde die Signalerzeugung auf

die in Abb. 5.6 (rechts) dargestellte Konfiguration umgestellt. Die Auswirkung auf den senderseitigen Rauschteppich durch das Bandpassfilter ist in Abb. 8.3 dargestellt.

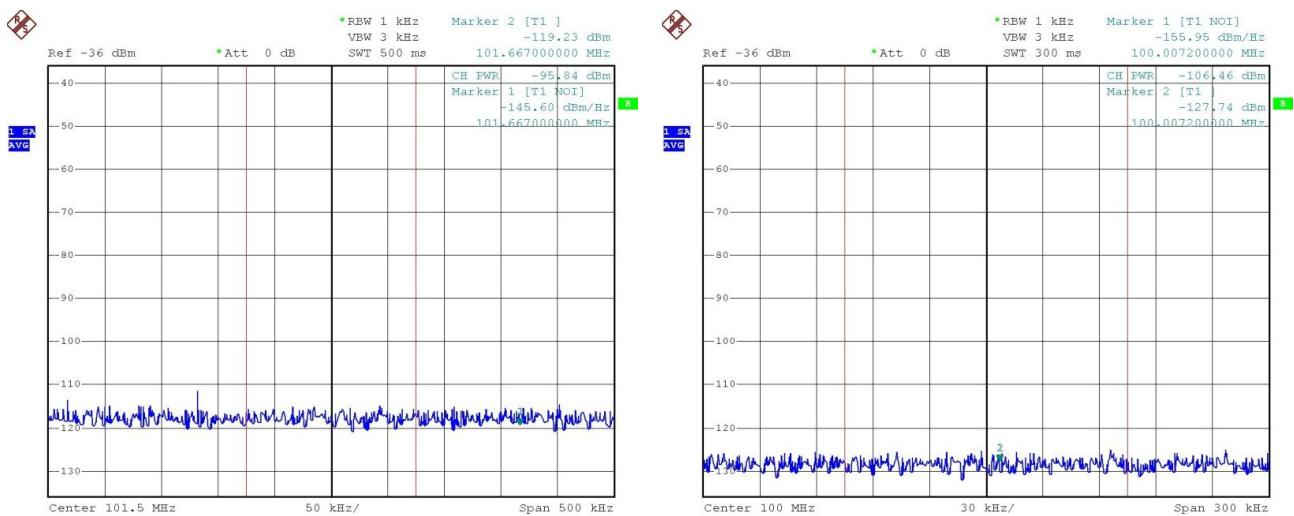


Abbildung 8.3.: Rauschteppich des DRM120-Senders ($f=87,6$ MHz) vor (links) und nach (rechts) der Filterung

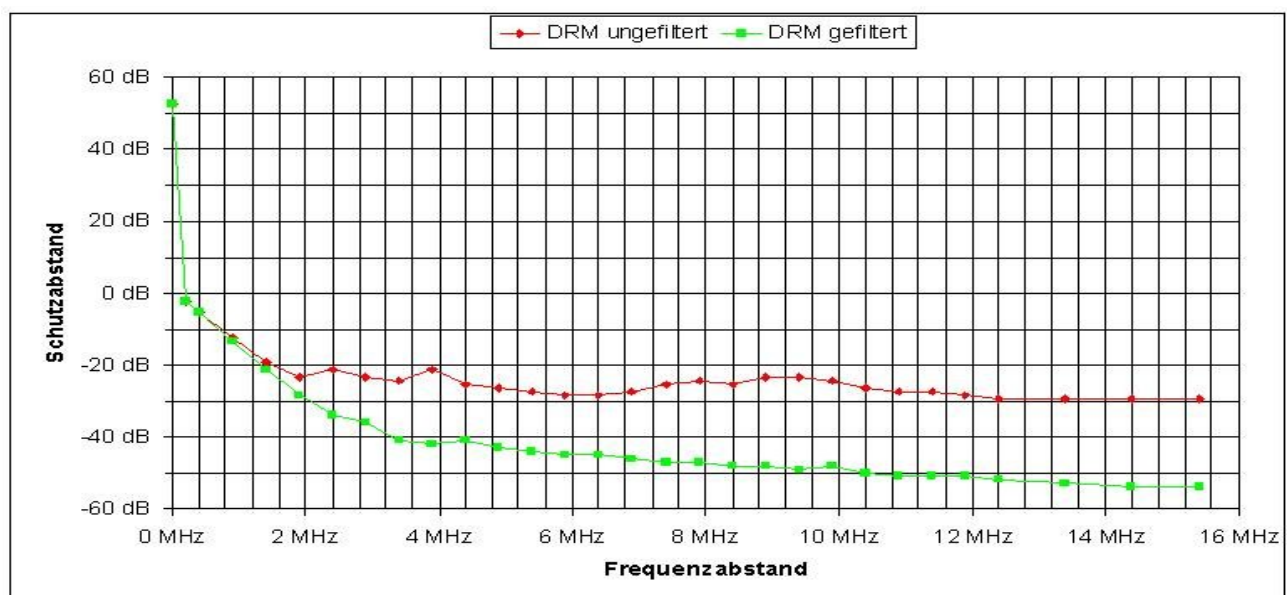


Abbildung 8.4.: Schutzabstand DRM120 gegenüber dem FM-Rundfunk bei großen Frequenzablagen, Empfänger: Rx1

Da das Filter fix auf die Mittenfrequenz 87,6 MHz abgestimmt ist, wurde zur Messung der Schutzabstände in dieser Konfiguration nicht die Frequenz des Störsignals, sondern die des gewollten Signals verschoben. Die Empfängerfrequenz folgte dabei der des Nutzsignals. Die zusätzliche Filterung stellt gemäß [ITU02d, S. 5, Gerät M] keine Verfälschung der Messung dar. Der Richtlinie zufolge soll zur Unterdrückung ungewollter Aussendungen ein durchstimmbares Bandpassfilter mit einer 3 dB-Bandbreite von 300 kHz verwendet werden. Die resultierenden Schutzabstände sind in Abb. 8.4 dargestellt. Die Messung erfolgte nur von der DRM120-Sendefrequenz 87,6 MHz ab aufwärts, da das UKW-Band – und somit auch der Abstimmbereich des Empfängers – bei 87,5 MHz endet. Das Meßergebnis zeigt eindeutig, daß

- die oben genannte Hypothese bestätigt ist

- die Schutzabstände bei Frequenzdifferenzen > 2 MHz wesentlich unter -20 dB liegen und somit als unproblematisch eingestuft werden können.

8.2.3. Übergangsband

Die im vorigen Abschnitt gezeigten Erkenntnisse wurden auch auf den Bereich des Übergangsbandes ($\pm 200 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq \pm 2 \text{ MHz}$) angewandt. Um die Filterwirkung auszunutzen, wurde das DRM120-Signal im Spektrum an der obere Filterflanke bei $88,0 \text{ MHz}$ platziert. Zusätzlich zu dem Rauscheffekt kommt in diesem Bereich die Erwägung das eine Verbesserung der Schutzabstände aus messtechnischer Sicht durch die Elimination von evtl. vorhandenen unerwünschten Nebenaussendungen erreicht werden kann.

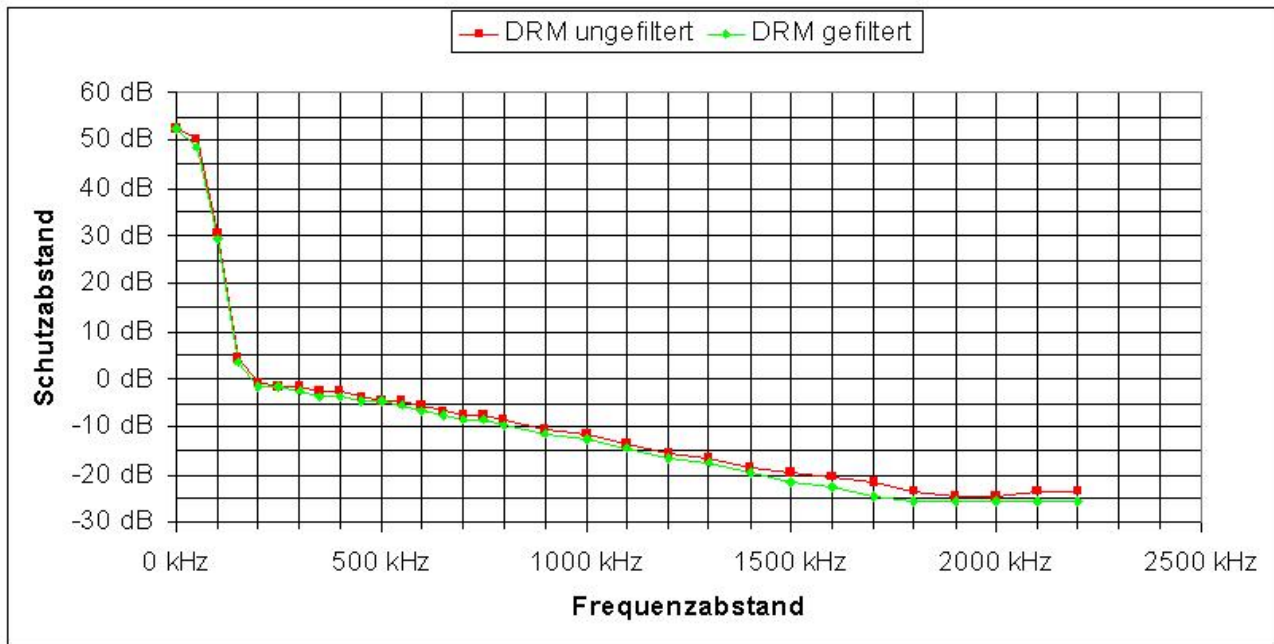


Abbildung 8.5.: Schutzabstand DRM120 gegenüber dem FM-Rundfunk bei mittleren Frequenzablagen, Empfänger: Rx1

Gemäß dem Ergebnis in Abb. 8.5 ist das Verhalten der Schutzabstände in diesem Bereich unabhängig von Rausch- oder sonstigen senderseitigen Störeffekten, da sich die Schutzabstände in beiden Meßreihen decken.

Weitergehende Untersuchungen mit verschiedenen Signalformen und Modulationsarten zeigten, daß im wesentlichen eine Verbesserung des Schutzabstandes durch Senkung des Crestfaktors erreicht werden kann. Zu diesem Zweck wurde ein Vielträgersignal mit dauerhaften Sinusträgern erzeugt, dessen Crestfaktor über die Phasenlage der einzelnen Träger zueinander beeinflussbar ist. Um eine Vergleichbarkeit mit DRM120 zu erreichen, wurden in Anlehnung an [SKL⁺06] folgende Parameter am Signalgenerator R&S SMU200A verwendet:

Modulation Type: Multicarrier Continuous Wave

Number of Carriers: 111

Carrier Spacing: 857,11 Hz

DC Carrier: Supressed

Crest factor optimization: variabler Wert durch autom. Berechnung der Phasenlage der einzelnen Träger zueinander einstellbar

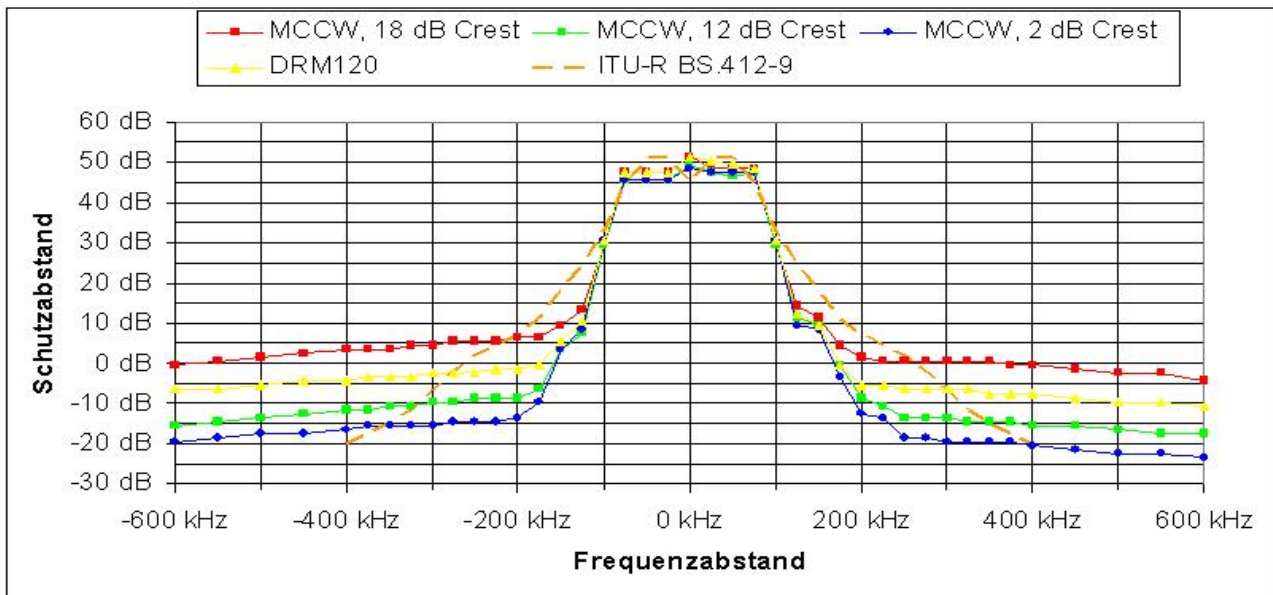


Abbildung 8.6.: Auswirkung verschiedener Crestfaktoren auf den Schutzabstand, Empfänger: JVC CA-MXS5RMD

Die Abhängigkeit der Schutzabstände von dem Parameter Crestfaktor ist in Abb. 8.6 dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, daß ein hoher Crestfaktor mit einer Verschlechterung des Schutzabstandes einhergeht. Gegeben dem Fall, daß beide Signalformen am Empfängereingang anliegen und die Summenleistung im wesentlichen von der FM-Leistung bestimmt wird, so können aufgrund der hohen Spitzenleistung die Amplituden des DRM120 -Signal dennoch über der FM-Spitzenleistung liegen. Aus diesem Grunde tritt in ständiger Folge eine Übersteuerung des Mischers auf, wobei eine Vielzahl von Intermodulationsprodukten entsteht. Somit besteht eine klare Beziehung zwischen den Parametern Crestfaktor und Schutzabstand: je höher der Crestfaktor, desto höher das Störpotential und desto höher der einzuhaltende Schutzabstand. Dieser Umstand verdeutlicht auch den Umstand der Verschlechterung der Schutzabstände bei Messungen FM vs. DRM120 mit erhöhtem Nutzsignalpegel. Diese Erkenntnis wurde durch Analyse des ZF-Spektrums vor dem ZF-Filter eines älteren KFZ-Empfängers (Typ: Blaupunkt Windsor SQR38) vertieft.

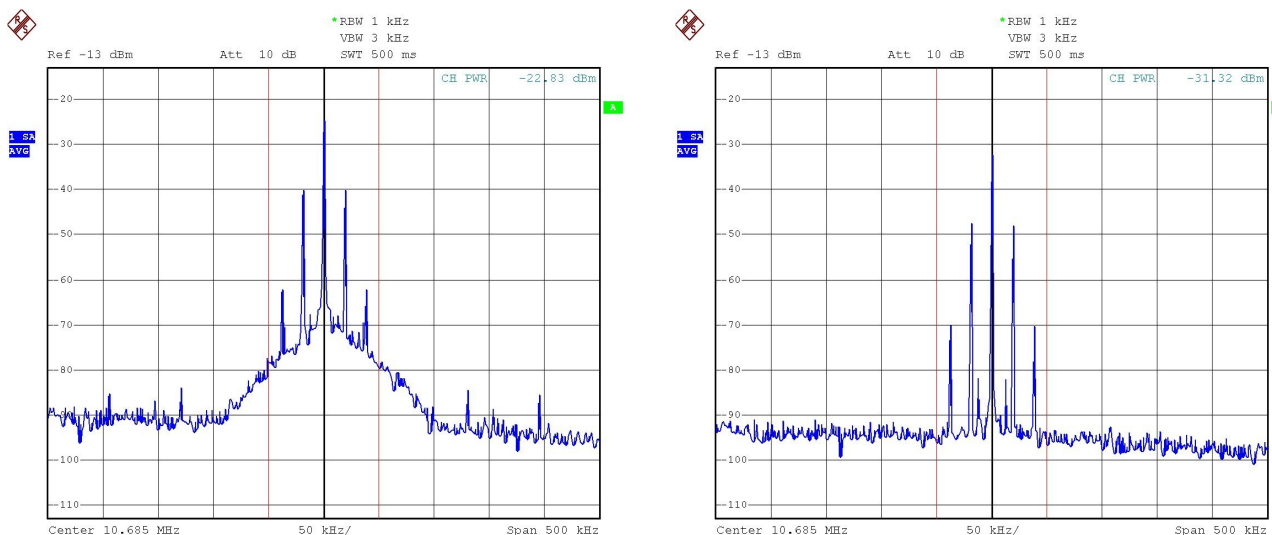


Abbildung 8.7.: Intermodulation im ZF-Spektrum eines FM-Empfängers durch spektrale Nachbarschaft eines DRM120 -Signals (links); Reduktion der Intermodulationsprodukte durch Ausserkraftsetzung der AGC-Schaltung (rechts). Empfänger: Blaupunkt Windsor SQR38

Bei der Messung von Abb. 8.7 wurde ein DRM120-Signal ca. 200 kHz relativ zu dem gewollten FM-Signal positioniert. Aufgrund der (für DRM120) mangelhaften Vorselektion des Empfängers kann das starke DRM120 -Signal zum ersten Abwärtsmischer des Empfängers gelangen. Der Empfänger „sieht“ somit nicht nur das gewünschte Signal, sondern die Summe des gewünschten und ungewollten Sendesignals. Die hochpegeligen Signalspitzen des DRM120 -Signals treten in einer solchen Form auf, daß die automatische Verstärkungsregelung des FM-Empfängers aufgrund ihrer zu geringen Bandbreite nicht folgen kann. Der Vergleich der linken und rechten Bildhälfte von Abb. 8.7 zeigt deutlich das nicht-lineare Verhalten: im linken Teil der Abbildung beträgt die Leistung des FM-Trägers ca. -25 dBm, die Störprodukte erreichen Signalpegel von bis zu -70 dBm. Im folgenden Schritt wurde die Regelschleife des AGC-Kreises aufgetrennt, und die Verstärkung am Empfängereingang manuell kontrolliert. Nach Reduktion der Eingangsverstärkung um ca. 7 dB (rechter Bildteil) beträgt die FM-Trägerleistung -32 dBm, der Pegel der Störprodukte ist überproportional auf -90 dBm abgefallen. Dies bestätigt deutlich das Vorhandensein nichtlinearer Effekte in der Empfängereingangsstufe.

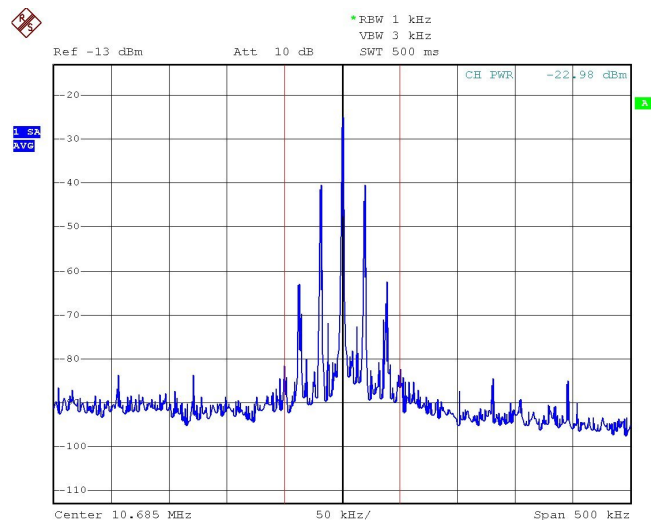


Abbildung 8.8.: Reduktion von Intermodulationsprodukten durch die Reduktion des Crestfaktors (vgl. Abb. 8.7), Empfänger: Blaupunkt Windsor SQR38

Anschliessend wurde der Regelkreis wieder geschlossen und das DRM120 -Signal durch das oben beschriebene Vielträgersignal mit einem Crestfaktor von 2 dB ersetzt. Das Ergebnis ist in Abb. 8.8 zu sehen: obwohl die Eingangsverstärkung genauso hoch wie in Abb. 8.7 (links) ist, treten nur wenige Intermodulationsprodukte im Spektrum auf.

Aufgrund der Abhängigkeit des Schutzabstandes vom Crestfaktor wurde die in Abb. 8.6 auf einen feineren Bereich von Crestfaktoren ausgedehnt. Das Ergebnis ist in Abb. 8.9 dargestellt. Es ist erkennbar, daß ein DRM120 -Signal (gemessener Crestfaktor: 12 dB) mit einem MCCW-Signal mit 14 dB vergleichbar ist. Man sieht, daß bei einer Reduzierung von hohen Crestfaktoren um 4 dB der Schutzabstand überproportional sinkt. Bei weiterer Senkung des Crestfaktors geht dieser Effekt in einen Bereich anhöhernd linearer Änderung über. Eine Absenkung des Crestfaktors auf einen Wert kleiner als 8 dB bringt keinen großen Gewinn mehr. Dies würde bei einem DRM120-Signal einem Crestfaktor von ca. 6 dB entsprechen.

Bei HD-RadioTM wird dieser Effekt durch die Addition des leistungsmässig weit über den Signalspitzen stehenden FM-Trägers verdeckt. In Bezug auf die Wirkung eines DRM120 -Signals auf Empfänger in einer realen Situation ist somit zu bedenken, daß der Empfänger ebenfalls ein vergleichbares Summensignal an seinem Eingang sieht: ein starker FM-Sender, dessen Frequenz benachbart zu einem (um 20 dB) abgesenkten DRM-Sender liegt, könnte somit zu einer Verminderung des Crestfaktors am Empfängereingang beitragen, wie es auch konzeptionell bei HD-RadioTM geschieht.

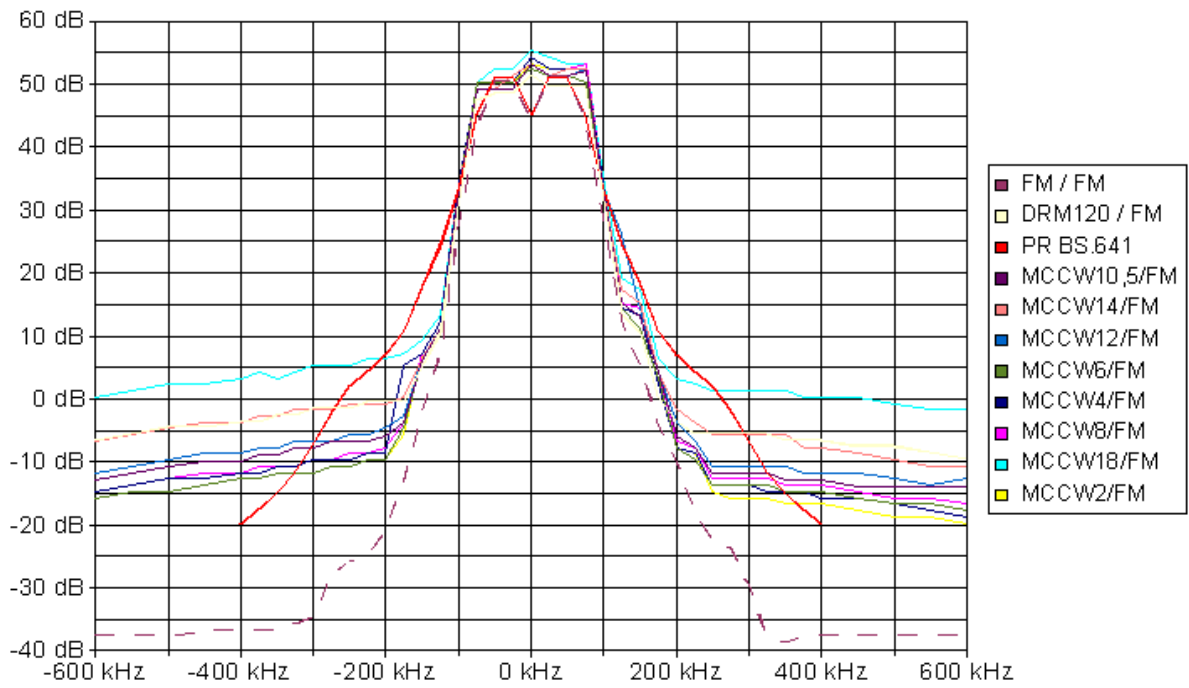


Abbildung 8.9.: Auswirkung verschiedener Crestfaktoren auf den Schutzabstand, Detailaufnahme.
Empfänger: Empfänger: Rx1

9. Subjektive Beurteilung der Störwirkungen durch Hörtests mit realem, komprimiertem Audiomaterial

9.1. Einleitung

Zur qualitativen Untersuchung des Einflusses der verschiedenen Störsignale auf ein reales Radiosignal wurden Hörproben durchgeführt. Hintergrund dieser Vorgehensweise ist die Tatsache das Messungen nach [ITU02d] zu reproduzierbaren, vergleichbaren Ergebnissen führen, die heutige Realität von Rundfunksendungen hierdurch allerdings nur bedingt abgedeckt wird. Während der Labormessungen der Schutzabstände des FM-Rundfunks wurden von den Autoren in der Regel die empfangenen Signale über einen Lautsprecher direkt mitgehört, so daß in diesem Kapitel zusätzlich ein kleiner Einblick über die dabei entstandenen Erfahrungen mit den unterschiedlichen Störwirkungen gegeben wird.

Aufgrund der oben diskutierten Beschränkungen der Richtlinie [ITU02d] ist es teilweise jedoch umstritten, inwieweit die Messwerte die momentan aktuelle Wirklichkeit im Rundfunk abbilden, vor allem da die Wirkung von Audiokompressoren durch die einschlägigen Richtlinien nicht berücksichtigt wird. Die Resultate sind somit nicht als konkrete Messungen sondern als Testreihen zu verstehen, die eine hörbare, subjektive Vorstellung der abstrakte Größe „Schutzabstand“ vermitteln sollen. Um eine große Bandbreite reeller Sendeszenarien abzudecken wurde ein Mischung aus verschiedenen Musik-Stilen erstellt. Hierfür wurde Material aus verschiedenen inhaltlichen Kategorien zusammengeschnitten:

Hörspiel: Wickie und die starken Männer, Dauer: 50 s

Pop: Ace of Base – Life is a flower, Dauer: 30 s

Rock: AC/DC – Highway to Hell, Dauer: 23 s

Pop: Bon Jovi – Bed of Roses, Dauer: 29 s

Synthetische Tanzmusik: Scooter (Jam & Spoon Remix) – Age of Love, Dauer: 20 s

Chanson / Klassik: Lara Fabian, Dauer: 47 s

Die Musikkzusammenstellung wurde auf einem Laptop abgespielt und über einen Optimod 8200 dem FM-Sender R&S SU155 zugeführt. Auf der Empfängerseite wurde das Signal über den Line-out-Ausgang des JVC-Empfängers abgenommen und auf einem Laptop-PC aufgezeichnet. Der Optimod-Signalprozessor wurde auf moderates Kompressionsmaß parametrisiert. Zu den wesentlichen Einstellungen zählen:

- Werksvoreinstellung: 5 Band, Medium fast
- Audioprocessing Level: 1

Dieser senderseitige Aufbau soll auf diese Weise die im Rundfunk heutzutage übliche Praxis simulieren. Je nach Sendeformat des Anbieters ist dies sicherlich als überaus konservativ (zu geringe Kompression) oder auch als inakzeptabel (zu hohe Kompression) einzustufen.

Das Störsignal wurde wie in Kap. 5 beschrieben generiert und über einen Combiner dem Empfänger zugeführt. Daraufhin wurde ermittelt, welcher Störpegel für ein bestimmtes Audio-SNR erforderlich ist. Für jedes der drei Störsignale wurde eine Messreihe aufgenommen, bei der der Störer

- im Gleichkanal sendete bzw.
- 200 kHz versetzt zum Nutzsender betrieben wurde.

Zur Ermittlung der Audio-S/N-Werte wurde das gleiche Messverfahren wie in Kapitel 4.1.4 angegeben verwendet. Durch Variation der Störerleistung wurde das jeweils gewünschte S/N geregelt. Aufgrund der naturgemäßen Dynamik der bei der Aufnahme der Hörproben verwendeten Signale ist diese gemessene Größe kein fixer Wert, sondern lediglich nur ein Anhaltspunkt. Das Audio-S/N wurde in einem Wertebereich von 50, 40, 30, 20 und 10 dB variiert. Das resultierende Audiosignal wurde am Line-Out-Ausgang des Empfängers (Rx1) abgenommen und mit einem PC aufgezeichnet. Die resultierenden Dateien wurden in das MP3-Format gewandelt. Dabei wurden die Kompressionsparameter so gewählt, dass eine hörbare Beeinträchtigung des aufgenommenen Signals ausgeschlossen werden kann:

- Encodersoftware: Lame, s. <http://lame.sourceforge.net/>
- Samplerate: 44,1 kHz
- Bitrate: 160 kbit/s

Die Dateinamen kennzeichnen jeweils die Modulation des Störsenders (DRM120, FM, HD-RadioTM), den Frequenzoffset und das eingestellte SNR. Der Dateiname „HD-0-10dB.mp3“ kennzeichnet eine Störung durch HD-RadioTM, 0 kHz Offset und 10 dB SNR.

9.2. Wirkung der Störsignale

9.2.1. Störungen durch FM-Signale

Im Gleichkanalbetrieb (Nutz- und Störsignal senden auf der gleichen Frequenz) wird das Nutzsignal durch Rauschen überlagert. Bei einem Frequenzoffset von 200 kHz sind impulsartige Störungen hörbar. Es fallen nur gelegentlich Elemente des Störsignals in das Band des Nutzsignals. Dadurch ist der SNR nur schwer zu ermitteln, da die Messung mit einem Spitzenwertgleichrichter vorzunehmen ist. Die Störimpulse (welche insbes. in den Modulationspausen deutlich hervortreten) nehmen somit mit sinkendem Audio-SNR zu, im mittleren ist das Audio-SNR allerdings besser als durch den Dateinamen angegeben.

9.2.2. Störungen durch DRM120

Im Gleichkanal ist die Störung durch diese Signalart ähnlich der Situation mit FM im Gleichkanalbetrieb, das Rauschen klingt jedoch schärfer bzw. höherfrequent und damit störender als das Rauschen durch FM-Überlagerung. Bei 200 kHz Offset äußert sich die Störung durch das OFDM-Signal ähnlich wie bei dem FM Signal.

9.2.3. Störungen durch HD-RadioTM

Die Störung bei im Gleichkanal der bei FM, da die Parameter des FM-Trägers identisch sind. Bei einem Offset von 200 kHz befindet sich das untere digitale Seitenband des HD-Signals im Nutzband. Dadurch ist dort auch eine Rauschstörung vergleichbar mit dem DRM120 -Störer wahrzunehmen. Die hörbare knistern, die das FM-Störsignal ohne die digitale Modulation verursacht (s.o.) werden dadurch vollständig verdeckt.

9.2.4. Allgemeine Beobachtungen

Generell sind die Störungen in leisen Passagen am deutlichsten wahrzunehmen. Beim Hörspiel und bei der klassischen Musik fallen die Störungen am ehesten auf, wohingegen die elektronische Tanzmusik sehr lange ungestört klingt. Diese Erkenntnis steht nicht im Gegensatz zu [KP97], da diese sich nur auf die Störungen durch die zusätzlichen OFDM-Seitenbänder auf die mitgeführte FM-Übertragung bezieht (sog. „host-compatibility“) und darüberhinaus nur auf Simulationsdaten basiert. Bemerkenswert ist die Tatsache das die hörbaren Anteile der Störungen relativ ähnlich klingen, die erforderlichen Störpegel – und somit der jeweilige Schutzabstand – jedoch sehr unterschiedlich sind. Die Details sind in Tab. 9.1 dokumentiert. Zur besseren Übersicht ist die Tabelle in Abb.9.1 visualisiert. Die dargestellten Kurvenscharen gelten jeweils für einen Frequenzversatz von 0 kHz bzw. 200 kHz.

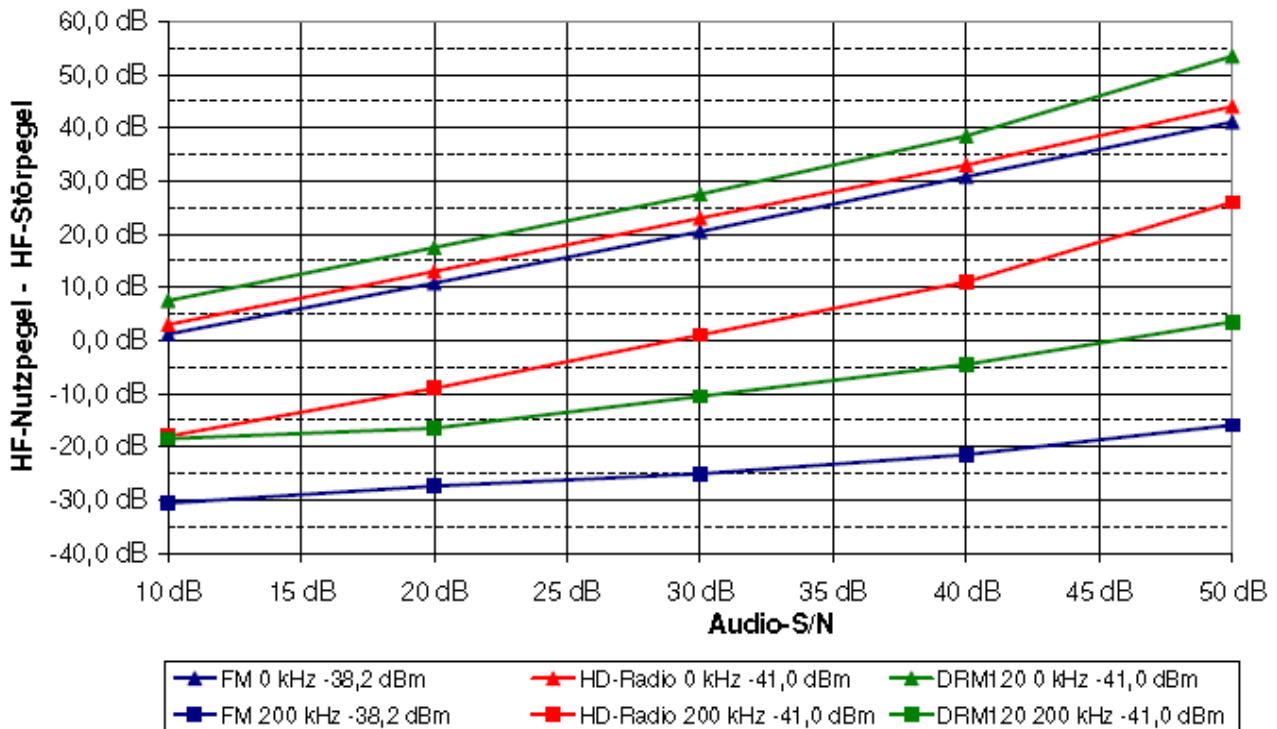


Abbildung 9.1.: Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen Schutzabstand und Audio-S/N anhand der Werte aus Tabelle 9.1

Es ist zu beachten, daß in dieser Messreihe nur statische Störungen auftreten. In einer realen Situation sind darüberhinaus noch Störungen durch weitere Quellen (Troposphäre, Man-made-Noise, sporadisch auftretende Überreichweiten, etc.) existent, die das SNR weiterhin verringern. Selbst wenn nach Begutachtung der vorliegenden Aufnahmen der Hörer empfindet, daß ein S/N von n dB als Störungsfrei empfunden wird, sollte eine gewisse Reserve in Bezug auf diese dynamischen Störungen nicht ausser Acht gelassen werden.

Störsignal	Offset/ kHz	Nutzpegel/ dBm	Störpegel/ dBm	Pegeldifferenz/dB	Audio-SNR/ dB
FM	0	-38,2	-79,3	41,1	50
FM	0	-38,2	-69,0	30,8	40
FM	0	-38,2	-58,7	20,5	30
FM	0	-38,2	-49,0	10,8	20
FM	0	-38,2	-39,4	1,2	10
FM	200	-38,2	-22,3	-15,9	50
FM	200	-38,2	-16,7	-21,5	40
FM	200	-38,2	-13,1	-25,1	30
FM	200	-38,2	-10,8	-27,4	20
FM	200	-38,2	-7,6	-30,6	10
HD-Radio TM	0	-41,0	-85,0	44,0	50
HD-Radio TM	0	-41,0	-74,0	33,0	40
HD-Radio TM	0	-41,0	-64,0	23,0	30
HD-Radio TM	0	-41,0	-54,0	13,0	20
HD-Radio TM	0	-41,0	-44,0	3,0	10
HD-Radio TM	200	-41,0	-67,0	26,0	50
HD-Radio TM	200	-41,0	-52,0	11,0	40
HD-Radio TM	200	-41,0	-42,0	1,0	30
HD-Radio TM	200	-41,0	-32,0	-9,0	20
HD-Radio TM	200	-41,0	-23,0	-18,0	10
DRM120	0	-41,0	-94,5	53,5	50
DRM120	0	-41,0	-79,5	38,5	40
DRM120	0	-41,0	-68,5	27,5	30
DRM120	0	-41,0	-58,5	17,5	20
DRM120	0	-41,0	-48,5	7,5	10
DRM120	200	-41,0	-44,5	3,5	50
DRM120	200	-41,0	-36,5	-4,5	40
DRM120	200	-41,0	-30,5	-10,5	30
DRM120	200	-41,0	-24,5	-16,5	20
DRM120	200	-41,0	-22,5	-18,5	10

Tabelle 9.1.: Übersicht der Schutzabstände verschiedener Audio-SNRs nach Modulationsart

10. Intermodulationsmessungen

10.1. Allgemeines

In der Realität sind im UKW-Band eine Vielzahl sehr leistungsstarker Sender gleichzeitig in Betrieb. Gelangen Anteile dieser Signale an die Mischerstufe der Flugfunkempfänger, kann der Empfang des VOR- bzw. ILS-Dienstes durch Intermodulation mit diesen Signalen beeinträchtigt bzw. stark gestört werden. Die Fähigkeit eines Empfängers unter diesen Bedingungen den Empfang der Flugfunksignale zu gewährleisten, wird als „FM immunity“¹ bezeichnet. Die Frequenzen der Intermodulationsprodukte können anhand der Sendefrequenzen im UKW-Band berechnet werden. Der ungünstigste Fall besteht durch die Intermodulationsprodukte 3ter Ordnung. Diese kann durch drei gleichzeitig aktive Sender im UKW-Band hervorgerufen werden, s.a.[MS91, S. 167] Um den Einfluß digitaler Funkssysteme auf die FM-Beständigkeit der Flugfunkempfänger zu untersuchen, wurden verschiedene Messungen vorgenommen und mit dem Verhalten gegenüber einem FM-Rundfunksignal verglichen. Als Störsignale wurden die Sendeformate

- FM-Rundfunk (als Referenzmessung zur Dokumentation des „Ist-Standes“)
- DRM120
- HD-RadioTM

verwendet. Die Signale wurden gemäß den Angaben in Kapitel 5 erzeugt. Zur Erzeugung des FM-Störers wurde der Aufbau in Abb. 5.2 (rechts) verwendet.

10.2. Messaufbau und Ablauf der Messung

Der Messaufbau und die Messprozedur sind in [ITU95b] beschrieben. In diesem konkreten Fall wurde der in Abb. 10.1 dargestellte Aufbau verwendet. Die Frequenzen die im UKW-Band belegt sein sollen sind in Abb. 10.1 mit f_1 , f_2 sowie f_3 bezeichnet. Der ungünstigste Fall ist dann gegeben, wenn f_2 und f_3 jeweils nur mit den unmodulierten Trägern belegt sind und nur das Signal auf der Frequenz f_1 moduliert wird. Unter diesen Umständen tritt bei f_2 , f_3 die größte Leistung auf; die Intermodulationsprodukte weisen somit den höchsten Pegel auf. In der hier vorliegenden Situation wurde die Frequenz f_1 dem Störsignal zugeordnet. Als relevante Störsignale wurden entsprechend der FM-Rundfunk (zu Vergleichszwecken), DRM120 und HD-RadioTM eingespeist. Durch die Bandsperre werden gezielt evtl. vorhandene Nebenaussendungen und das Restrauschen der drei Sender unterdrückt, so daß Empfangsstörungen eindeutig auf die Intermodulationen im Empfänger zurückzuführen sind.

In [ITU95b] sind für diese Messung vier verschiedene Frequenzkombinationen angegeben. Für die hier vorliegende Messungen wurden lediglich diejenigen Frequenzkombinationen $f_1 \cdot \cdot \cdot f_3$ ausgewählt, deren Intermodulationsprodukte am nächsten bzw. direkt auf der Empfangsfrequenz des Flugfunkempfängers (108,2 MHz bzw. 108,1 MHz) entstehen.

Das Nutzsignal wird gemäß [ITU95b] derart eingeppegelt, daß der Empfänger überhalb des in Kap. 4.3.2.2 bzw. Kap. 4.3.1.2 Störkriteriums betrieben wird. Dieser Empfängereingangspegel beträgt -79 dBm für VOR und -86 dBm für ILS. Darüberhinaus wurde vorschriftsgemäß eine zweite Messung durchgeführt,

¹engl.: Unempfindlichkeit gegenüber FM-Rundfunksignalen, FM-Beständigkeit (frei übersetzt)

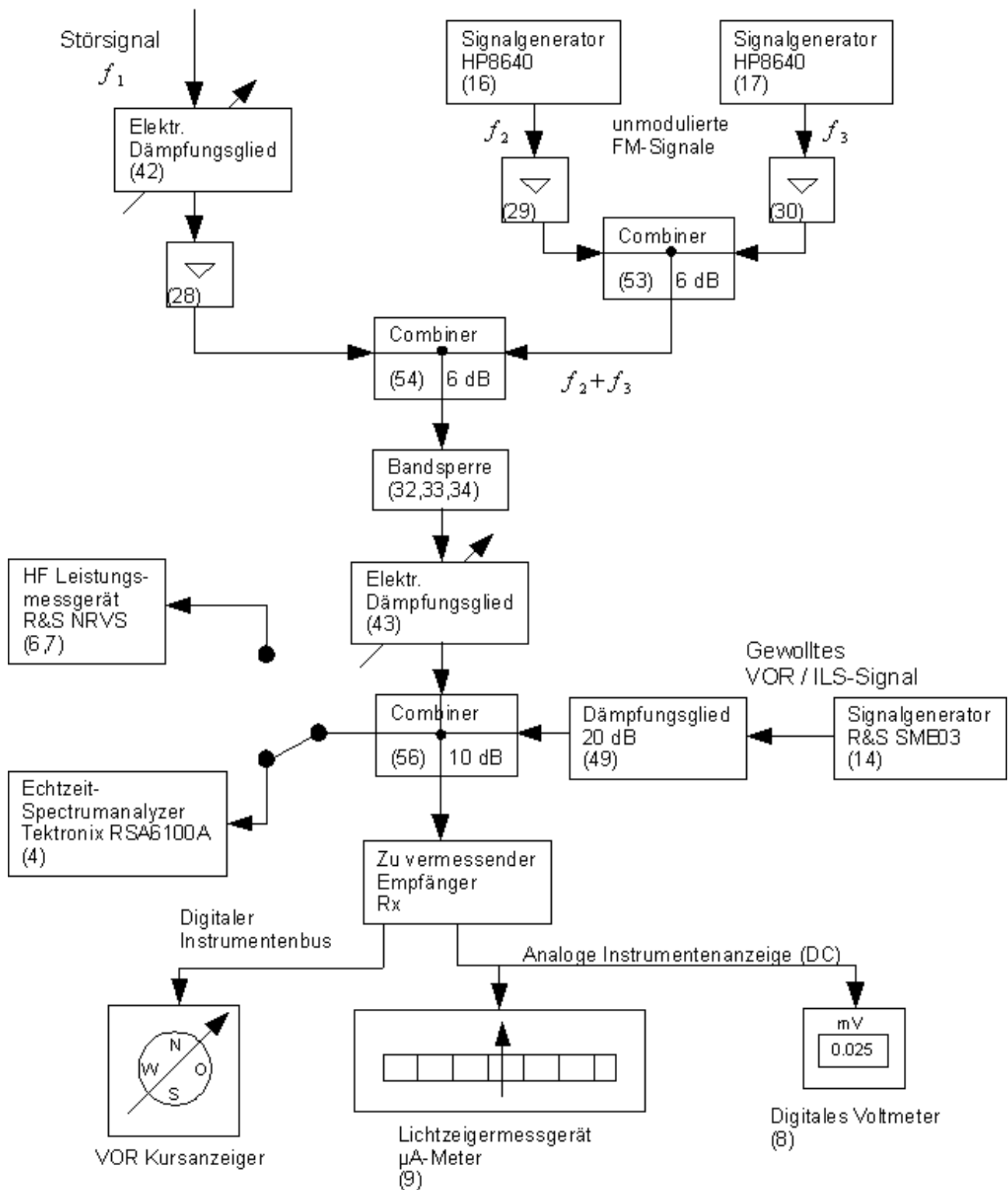


Abbildung 10.1.: Messaufbau zur Intermodulationsmessung gem. [ITU95b]. Die Zahlenangaben in Klammern beziehen sich auf die Geräteliste in Anhang A.

bei der die Eingangspegel jeweils um 16 dB erhöht wurden. Der Empfängereingangspegel der Trägersignale f_2 und f_3 betrug +2 dBm. Der Pegel des Störsignals f_1 wurde nach Einrichtung des Meßaufbaus solange erhöht bis das Störkriterium erreicht war. In diesem Zustand wurde der Nutz- und Störpegel festgehalten. Die Differenz dieser beiden Werte ergibt den gemessenen Schutzabstand.

10.3. Verhalten gegenüber dem VOR-Dienst

Abbildung 10.2 zeigt die Messresultate der Dreisendermessung in Bezug auf die Störungen des VOR-Empfangs. In der Grafik ist lediglich der Schutzabstand für das Kriterium „Kursabweichung“ angegeben, da dieses das im Sinne des Schutzabstandes kritischere Kriterium ist.

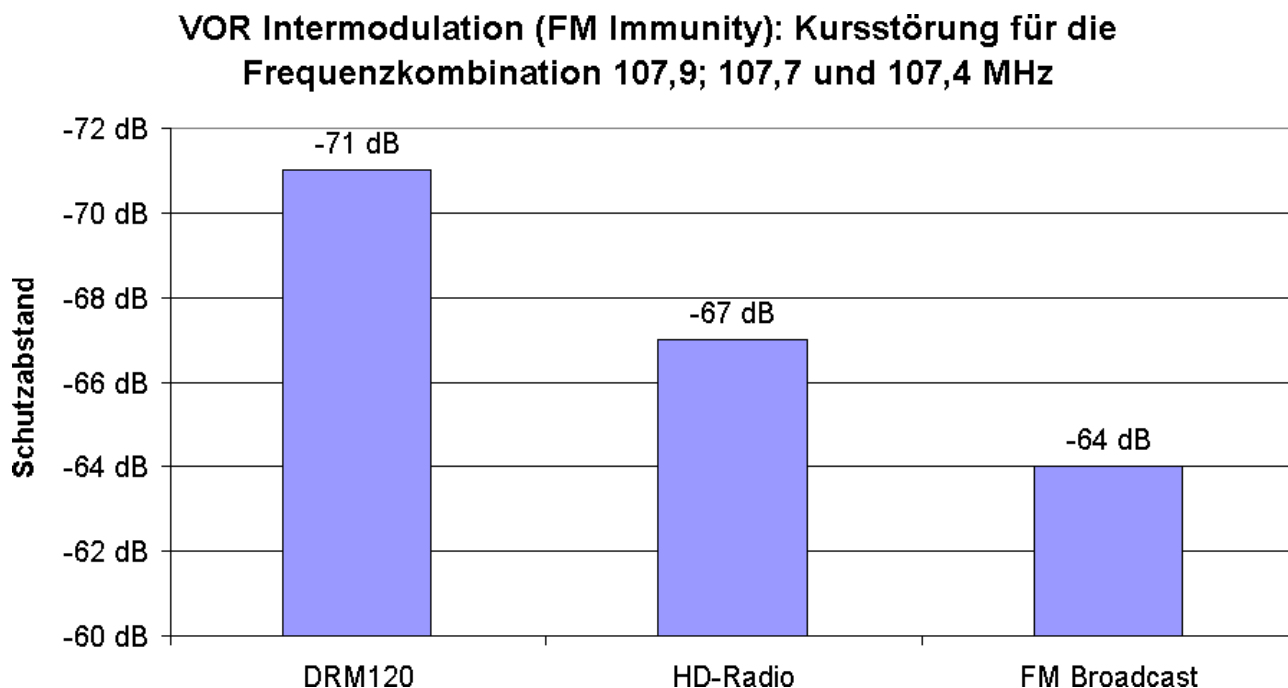


Abbildung 10.2.: Schutzabstand des VOR-Dienstes: Großsignal- bzw. Intermodulationsfestigkeit gegenüber starken analogen und digitalen Sendeformaten (Störkriterium: Kursabweichung)

Aus der Abbildung geht hervor, daß das DRM120-Signal ein noch geringeres Störpotential als der FM-Rundfunk im Sinne der Intermodulationstendenz aufweist. Das Störpotential von HD-RadioTM sollte ungefähr gleich zu dem des FM-Signals sein, da der größte Teil seiner Leistung durch FM-Anteil getragen wird, welcher die Störung verursacht. Die gemessene Differenz zwischen diesen beiden Signalformen ist in der unterschiedlichen Modulation der beiden FM-Träger zu begründen, da unterschiedliche Sender verwendet wurden. Die Details sind in den Anhängen verzeichnet.

Messungen mit dem erhöhtem Nutzsignalpegel -60 dBm ergaben aufgrund der Empfängernichtlinearitäten andere Schutzabstände (s. Anhänge), so daß die Ergebnisse nicht direkt auf andere Nutzsignalpegel skaliert werden können.

10.4. Verhalten gegenüber dem ILS-Localizer-Dienst

Abbildung 10.3 zeigt die Messresultate der Dreisendermessung in Bezug auf die Störungen des ILS-Empfangs. In der Grafik ist lediglich der Schutzabstand für das Kriterium „Kursabweichung“ angegeben, da dieses das im Sinne des Schutzabstandes kritischere Kriterium ist.

ILS Intermodulation (FM Immunity): Kursstörung für die Frequenzkombination 107,9; 107,5 und 107,3 MHz

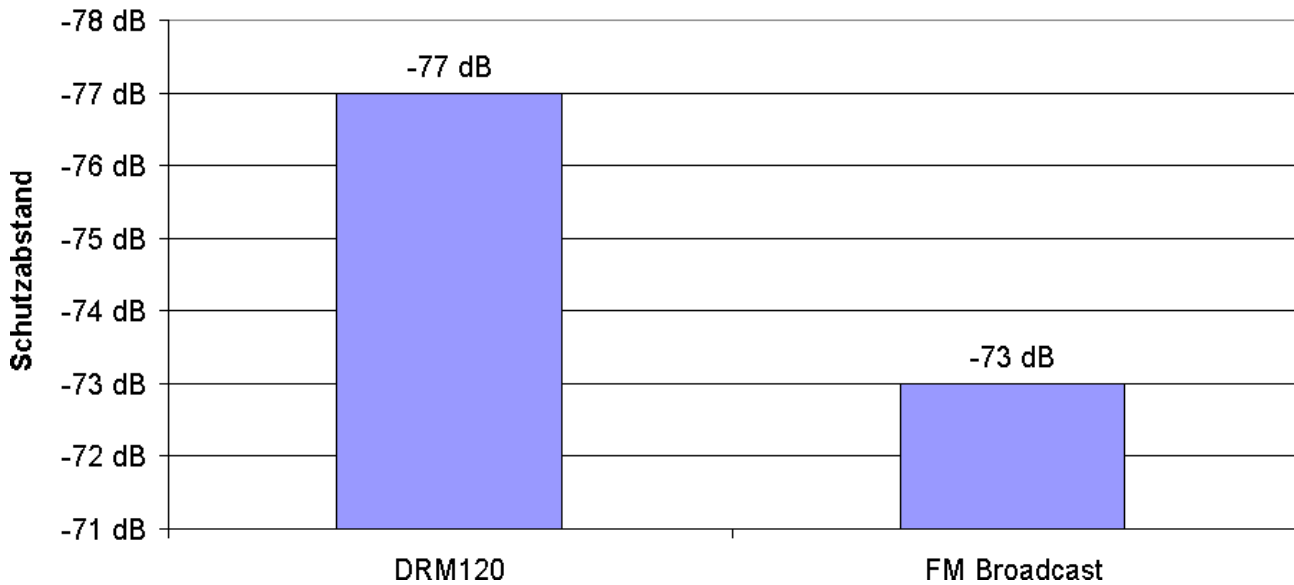


Abbildung 10.3.: Schutzabstand des ILS-Dienstes: Großsignal- bzw. Intermodulationsfestigkeit gegenüber starken analogen und digitalen Sendeformaten (Störkriterium: Kursabweichung), Frequenzkombination 1

Bei dieser Messreihe ist zu beachten, daß sie für die in [ITU95b] vorgegebene kritischste Frequenzkombination mit $f_1 = 107,9$ MHz nur begrenzt durchführbar ist, da das HD-Radio™ -Spektrum würde aufgrund seiner Bandbreite sich in diesem Fall mit dem ILS-Signal überlappen würde. Daher wurde die zweitkritischste in der Richtlinie angegebene Frequenzkombination verwendet. Die Resultate sind in Abb.10.4 dargestellt.

ILS Intermodulation (FM Immunity): Kursstörung für die Frequenzkombination 107,5; 106,5 und 105,9 MHz

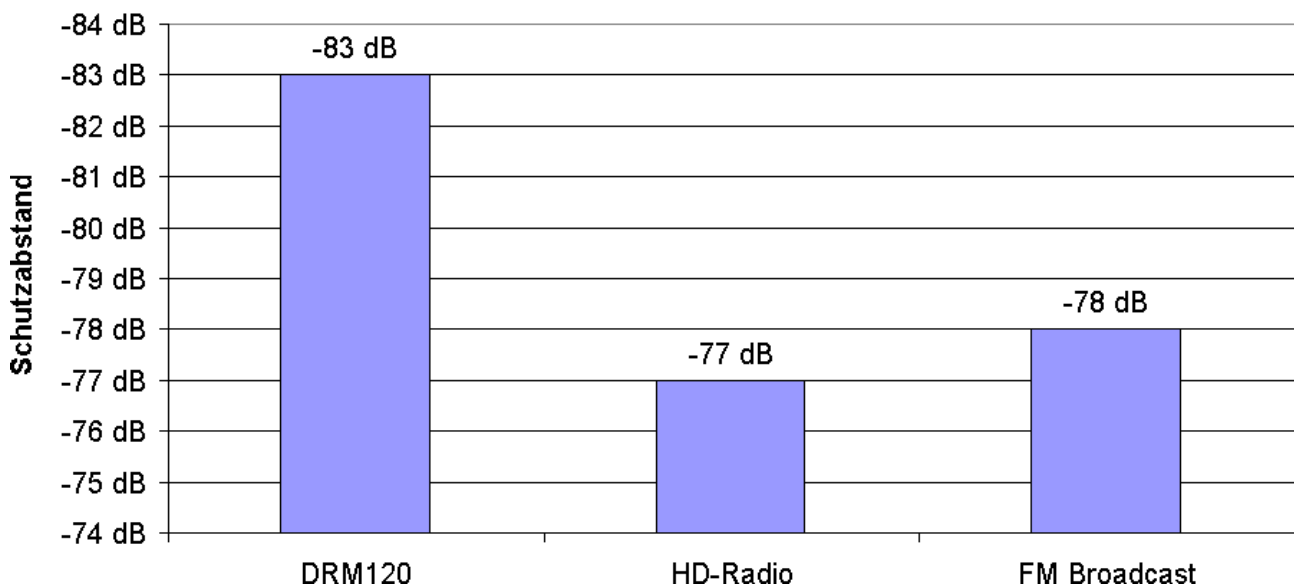


Abbildung 10.4.: Schutzabstand des ILS-Dienstes: Großsignal- bzw. Intermodulationsfestigkeit gegenüber starken analogen und digitalen Sendeformaten (Störkriterium: Kursabweichung), Frequenzkombination 2

Aus der Abbildung geht hervor, daß das Störpotential des DRM120-Signal geringer noch als von dem bestehendem FM-Rundfunk ist. HD-RadioTM zeigt das annähernd gleiche Verhalten wie das FM-Signal, da in diesem Fall der Anteil der analogen Sendung der hauptsächliche Bestandteil des HD-RadioTM -Signals ist und aufgrund seiner höheren Leistung im Vergleich zu den digitalen Anteilen derjenige Signalanteil ist, der die Interferenz verursacht.

Auch hier haben die Messungen mit dem erhöhtem Nutzsignalpegel ergeben, daß die Ergebnisse aufgrund der nichtlinearen Effekte im Empfänger nicht skaliert werden können. Somit ändert sich der Schutzabstand, wenn der Nutzsignalpegel (in diesem Fall) um 16 dB geändert wird. Die entsprechenden einzelnen Messungen inkl. der graf. Aufbereitung sind in den Anhängen festgehalten.

Anhang A.

Liste der verwendeten Geräte

Lfd. Nr.	Gerätename
1	Test Receiver R&S ESVP
2	Spectrum Analyzer R&S FSIQ
3	Spectrum Analyzer R&S FSP
4	Realtime Spectrum Analyzer Tektronix RSA 6114A
5	Deviation Measurement R&S FAB
6	RF Power Meter R&S NRVS
7	RF Power Probe R&S NRV-Z 51
8	Digital Multimeter Fluke 75
9	Light beam measurement instrument Gossen 200 $\mu\text{A}/1\text{ k}\Omega$
10	Psophometer R&S UPDR
11	Rx/Tx Tester R&S CMS48
12	Network Analyzer HP3577A
13	Audio Processor Orban Optimod FM8200
14	Signal Generator R&S SME03
15	Vector Signal Generator R&S SMU200A
16	Signal Generator HP 8640B
17	Signal Generator HP 8640B
18	Signal Generator R&S SMH
19	Signal Generator Tektronix AFG3252
20	Noise Generator Wandel&Goldermann RG-1
21	Noise Generator Wandel&Goldermann RG-32
22	D/A-A/D Converter Card 24 Bit 200 kHz National Instruments NI4461
23	Stereo Coder R&S GC003
24	Stereo Coder R&S MSC BN4192
25	FM Transmitter 50W R&S SU155
26	HD-Radio Exporter Broadcast Electronics FSI-10 (s/w version 2.2.5)
27	FM/HD Radio Exiter Broadcast Electronics Fxi-250 (s/w version 2.21.30)
28	RF Amplifier 30 dB Kalmus Model 102
29	RF Amplifier 30 dB Kalmus Model 102
30	RF Amplifier 30 dB Kalmus Model 102
31	RF Amplifier 10 W R&S HVV10
32	Variable notch filter Sinclair FR20207
33	Variable notch filter Sinclair FR20207
34	Variable notch filter Sinclair FR20207
35	Texscan Bandpass 5VF75/150-1-50-AA
36	Texscan Bandpass 5VF75/150-1-50-AA
37	Highpass filter 230 MHz Wainwright
38	4-cavity band pass filter RVR 87, 6 MHz

Lfd. Nr.	Gerätename
39	Notch Filter Kathrein 717756
40	Coloured Noise Filter according to ITU-R BS.468
41	15 kHz Audio low pass filter according to ITU-R BS.468 [Sch07a]
42	Variable Attenuator R&S RSP
43	Variable Attenuator R&S RSG
44	Variable attenuator Agilent 8496B
45	Variable attenuator Agilent 8494B
46	Variable Attenuator 50 dB Spinner
47	Variable Attenuator 80 dB Texscan BMA570
48	Dummy Load Microset CF300
49	Attenuator 20 dB 11 W Radial
50	10 dB/50 W Dämpfungsglied Spinner BN 745363
51	6 dB Variable Attenuator Radial R 414706000
52	30 dB Attenuator R&S RBU
53	Directional Bridge Agilent 8721 A
54	Directional Bridge Agilent 8721 A
55	Directional Bridge Agilent 8721 A
56	4-way Coupler R&S
57	Power Splitter 3 dB Mini Circuits ZFD-2-1W+
58	Power Splitter 3 dB Mini Circuits ZFD-2-1W+
59	Impedance Converter 50 to 75 Ω Mini Circuits BMP-5075
60	Laptop Computer IBM Thinkpad / Windows XP professional
61	RDS Coder RE Technology RE532
62	Franken RDS-Decoder, s/w version 2.02D, incl. RS-232-Adapter

Literaturverzeichnis

- [ACPA04] AERONAUTICAL COMMUNICATIONS PANEL (ACP), Working Group-F/11: Digital Broadcasting Systems in the 87 – 108 MHz Band. (2004)
- [BDH⁺96] BRECHMANN ; DZIEIA ; HÖRNEMANN ; HÜBSCHER ; JAGLA ; PETERSEN: *Elektrotechnik Tabellen Kommunikationselektronik*. 3. Auflage. Westermann Schulbuchverlag Braunschweig, 1996
- [Ber05] BERNHARDT, Frank: *Untersuchung zur Implementierung eines digitalen Übertragungssystems auf OFDM-Basis im UKW-Frequenzbereich*, Fachhochschule Kaiserslautern, Diplomarbeit, November 2005
- [Com05] COMMISSION, Federal C.: Code of Federal Regulations: Radio Broadcast Services – FM transmission system requirements (47CFR73.317). 4 (2005), Oktober
- [Eur06] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE: ETSI EN 302018-1 V1.2.1: Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Transmitting equipment for the Frequency Modulated (FM) sound broadcasting service; Part 1: Technical characteristics and test methods. (2006), 03
- [Fei05] FEILEN, Michael: *Objektorientierte Implementierung eines Sendesystems für Digital Radio Mondiale*, Fachhochschule Kaiserslautern, Diplomarbeit, Oktober 2005
- [ftz] FTZ 17TR2049.
- [Ins04] INSTITUTE, European Broadcasting Union & European Telecommunications S. ; EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE (Hrsg.): *ETSI ES 201 980 – Digital Radio Mondiale (DRM): System Specification*. V2.1.1. 650 Route des Lucioles F-06921 Sophia Antipolis Cedex - FRANCE: European Telecommunications Standards Institute, Juni 2004
- [ITU95a] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, ITU: ITU-R IS.1009-1: Compatibility between the sound-broadcasting service in the band of about 87 – 108 MHz and the Aeronautical services in the band 108 – 137 MHz. (1995)
- [ITU95b] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, ITU: ITU-R IS.1140: Test Procedures for measuring aeronautical receiver characteristics used for determining compatibility between the sound-broadcasting service in the band of about 87 – 108 MHz and the Aeronautical services in the band 108 – 118 MHz. (1995)
- [ITU02a] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, ITU: ITU-R BS.412-9: Planning standards for terrestrial FM sound broadcasting at VHF. (1986, 2002)
- [ITU02b] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, ITU: ITU-R BS.468-4: Measurement of audio-frequency noise voltage level in sound broadcasting. (1986, 2002)
- [ITU02c] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, ITU: ITU-R BS.559-2: Objective measurement of radio-frequency protection ratios in LF, MF and HF broadcasting. (1986, 2002)

- [ITU02d] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, ITU: ITU-R BS.641: Determination of radio-frequency protection ratios for frequency-modulated sound broadcasting. (1986, 2002)
- [ITU02e] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, ITU: ITU-R BS.643-2: System for automatic tuning and other applications in FM radio receivers for use with the pilot-tone system. (1995, 2002)
- [ITU04] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, ITU: ITU-R BS.1114-5: Systems for terrestrial digital sound broadcasting to vehicular, portable and fixed receivers in the frequency range 30 – 3000 MHz. (2004)
- [KP97] KROEGER, Brian W. ; PEYLA, Paul J.: Compatibility of FM Hybrid In-Band On-Channel (IBOC) System for Digital Audio Broadcasting. In: *IEEE Transactions on Broadcasting* 43 (1997), Dezember, Nr. 4, S. 421–430
- [MS91] MÄUSL, Rudolf ; SCHLAGHECK, Erhard: *Meßverfahren in der Nachrichtenübertragungstechnik*. 2. Auflage. Hüthig Verlag, 1991. – ISBN 3-7785-2057-1
- [Mäu88] MÄUSL, Rudolf: *Analoge Modulationsverfahren*. Hüthig Verlag, Heidelberg, 1988
- [Poo06] POOLE, Ranulph: DRM transmissions on VHF: Do FM protection ratios still apply? DRM_cm_326 / BBC British Broadcasting Corporation, Research & Development Department. 2006. – Forschungsbericht
- [Roc] ROCKWELL COLLINS AIR TRANSPORT DIVISION: *What is VOR/ILS? – Instruction guide*
- [Roh05] ROHDE UND SCHWARZ (Hrsg.): *Vector Signal Generator SMU 200A - Manual*. Rohde und Schwarz, 2005
- [Sch07a] SCHAD, Felix: *Entwicklung eines NF-Tiefpasses zur Pilottonunterdrückung – Schutzabstandsmeßstrecke FM/DRM+ : NF-Tiefpass „T“*. April 2007
- [Sch07b] SCHAD, Felix: *Generierung und Mischung von DRM-Signalen zur Senderansteuerung*, Fachhochschule Kaiserslautern, Diplomarbeit, 2007
- [SKL⁺06] STEIL ; KREUTZER ; LEHNERT ; FEILEN ; URBANSKY ; SAUER-GREFF: Technical feasibility study and field trial concept for DRM-based digital radio in the VHF-FM radio band. In: *7th Workshop on Digital Broadcasting*, 2006, S. 67ff.
- [SSRK07] SCHAD, F. ; STEIL, A. ; ROSENBAUM, M. ; KREUTZER, M.: Protection Ratio Measurements: DRM+ into FM. DRM_Document tc_cm_381 / Fachhochschule Kaiserslautern. 2007. – Forschungsbericht

Abbildungsverzeichnis

4.1. Aufbau des Signalspektrums eines FM-Rundfunksenders bei stereophoner Audioübertragung im Basisband, aus: [BDH ⁺ 96, S. 173]	15
4.2. Erzeugung des FM-Nutzsignals	16
4.3. Antennendiagramm des ILS-Localizers und ILS-Gleitpfadgebers	18
4.4. Antennendiagramm zur Abstrahlung des VOR-Signals	19
5.1. Blockschaltbild zur hochdynamischen Vermessung der Signalspektren	21
5.2. Erzeugung des FM-Störsignals	22
5.3. Spektrumsmasken für den FM-Rundfunk, jeweils für ITU-Region I und II	23
5.4. Spektrum des FM-Störsignals (Messdetektor: RMS-Detektor)	24
5.5. Spektrum des FM-Störsignals nach ITU-R IS.1140	24
5.6. Erzeugung des DRM120-Störsignals	26
5.7. Spektrumsmaske für DRM120 und den FM-Rundfunk	27
5.8. Gemessenes DRM120 -Signalspektrum	28
5.9. Schematische Darstellung der spektralen Anteile eines HD-Radio TM -Signals, Hybrid-Betrieb, aus: [ITU04, Abb. 32]	29
5.10. Schematische Darstellung der spektralen Anteile eines HD-Radio TM -Signals, erweiterter Hybrid-Betrieb, aus: [ITU04, Abb. 33]	29
5.11. Schematische Darstellung der spektralen Anteile eines HD-Radio TM -Signals, Volldigitaler Betrieb, aus: [ITU04, Abb. 34]	29
5.12. Erzeugung des HD-Radio TM -Störsignals	30
5.13. Spektrumsmasken für HD-Radio TM	31
5.14. Gemessenes HD-Radio TM -Spektrum	32
6.1. Aufbau zur Messung des Schutzabstandes für den FM-Rundfunk	34
6.2. Aufbau zur Messung des Schutzabstandes für den BOS-Funkdienst	35
6.3. Aufbau zur Messung des Schutzabstandes für den VOR bzw. ILS-Dienst	36
6.4. Zusammenfassung der Schutzabstände für FM Stereo gestört durch FM (S/N Störung)	38
6.5. Schutzabstände für den RDS-Empfang bei Störungen durch FM	38
6.6. Schutzabstände für BOS gestört durch FM-Rundfunk	39
6.7. Schutzabstände für den VOR-Dienst gestört durch FM-Rundfunk	40
6.8. Schutzabstände für den ILS-Dienst gestört durch FM-Rundfunk	40
6.9. Schutzabstände für den FM-Stereoempfang gestört durch DRM120 (ungefiltert)	42
6.10. Schutzabstände für FM Stereo gestört durch DRM120 (gefiltert), vergrößerte Messbandbreite	42
6.11. Schutzabstände für den RDS-Empfang bei Störung durch DRM120	43
6.12. Schutzabstände für BOS gestört durch DRM120 (ungefiltert)	43
6.13. Schutzabstände für BOS gestört durch DRM120 (gefiltert)	44
6.14. Schutzabstände für den VOR-Dienst gestört durch DRM120	45
6.15. Schutzabstände für den VOR-Dienst gestört durch DRM120, mit Ausgangsfilterung	46
6.16. Spektrum DRM120 / VOR bei Beginn der Kursstörung	46
6.17. Schutzabstände für den ILS-Dienst gestört durch DRM120	47
6.18. Schutzabstände für den ILS-Localizer gestört durch DRM120 mit Ausgangsfilter	47

6.19. Schutzabstände für FM-Stereoempfang gestört durch HD-Radio TM	49
6.20. Schutzabstände für den RDS-Empfang bei Störung durch HD-Radio TM	50
6.21. Beginn der S/N-Störung: FM vs. HD-Radio TM sowie FM	50
6.22. Schutzabstände für den BOS-Dienst gestört durch HD-Radio TM	51
6.23. Schutzabstände für den VOR-Dienst gestört durch HD-Radio TM	52
6.24. Spektrum HD-Radio TM / VOR bei Beginn der Kursstörung	52
6.25. Schutzabstände für den ILS-Dienst gestört durch HD-Radio TM	53
7.1. Zusammenfassung: Schutzabstände für den FM-Rundfunk	54
7.2. Zusammenfassung: Schutzabstände für den RDS-Dienst	55
7.3. Zusammenfassung: Schutzabstände für den BOS-Dienst	56
7.4. Zusammenfassung: Schutzabstände für den VOR-Dienst	57
7.5. Zusammenfassung: Schutzabstände für den ILS-Localizer-Dienst	58
8.1. Ausweitung der Schutzabstandmessung auf einen großen Frequenzbereich, Empfänger: Rx1	59
8.2. Schematische Darstellung verschiedener Schutzabstandsregionen aus Empfängersicht .	60
8.3. Rauschteppich des DRM120 -Senders (f=87,6 MHz) vor (links) und nach (rechts) der Filterung	61
8.4. Schutzabstand DRM120 gegenüber dem FM-Rundfunk bei großen Frequenzablagen, Empfänger: Rx1	61
8.5. Schutzabstand DRM120 gegenüber dem FM-Rundfunk bei mittleren Frequenzablagen, Empfänger: Rx1	62
8.6. Auswirkung verschiedener Crestfaktoren auf den Schutzabstand, Empfänger: JVC CA- MXS5RMD	63
8.7. Intermodulation im ZF-Spektrum eines FM-Empfängers	63
8.8. Reduktion von Intermodulationsprodukten durch die Reduktion des Crestfaktors . . .	64
8.9. Auswirkung verschiedener Crestfaktoren auf den Schutzabstand, Detailaufnahme . . .	65
9.1. Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen Schutzabstand und Audio-S/N an- hand der Werte aus Tabelle 9.1	68
10.1. Messaufbau zur Intermodulationsmessung gem. [ITU95b]	71
10.2. Schutzabstand VOR: Großsignal- bzw. Intermodulationsfestigkeit	72
10.3. Schutzabstand ILS: Großsignal- bzw. Intermodulationsfestigkeit	73
10.4. Schutzabstand ILS: Großsignal- bzw. Intermodulationsfestigkeit	73

Tabellenverzeichnis

3.1. FM-Empfängertypen	13
5.1. Spektrumsmaske für DRM120 und den FM-Rundfunk	27
5.2. Spektrumsmasken für HD-Radio TM	31
9.1. Übersicht der Schutzabstände verschiedener Audio-SNRs nach Modulationsart	69