

Abschlußbericht zum

technisch-wissenschaftlichen Vergleich der
Verträglichkeit von UKW-FM mit HD-
Radio und mit DRM+

Oberscheidweiler, 18.09.2008

Verfasser: Mark Rosenbaum, TU Kaiserslautern
Im Auftrag der Landeszentrale für Medien und Kommunikation
(LMK) Rheinland-Pfalz

Betreuer:

Dipl.-Ing. Joachim Lehnert (LMK)
Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky (TU Kaiserslautern)
Dr.-Ing. Wolfgang Sauer-Greff (TU Kaiserslautern)

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Möglichkeiten der Integration der digitalen Rundfunksysteme DRM+ und HD-Radio in die jetzige Rundfunklandschaft im Band II. Die Arbeit entstand im Rahmen der Kooperation zu DRM+ der LMK, der TU Kaiserslautern und der Fachhochschule Kaiserslautern.

Zuerst werden die grundlegenden Techniken der Netzplanung vorgestellt. Hier wird besonders auf das Ausbreitungsmodell nach ITU und die entsprechenden Empfangsszenarien eingegangen. Nachdem die Grundlagen der Verträglichkeit vorgestellt wurden, wird die Verträglichkeit der einzelnen Systeme (DRM+ und HD-Radio) betrachtet und gewertet. Dabei stellt sich heraus, dass DRM+ mit einer Leistungsabsenkung von 5 dB gegenüber einem entsprechenden FM-Sender netzverträglich betrieben werden könnte. Bei HD-Radio liegt diese erforderliche Absenkung wesentlich höher, systembedingt wird zusätzlich die FM-Leistung und damit die Reichweite massiv eingeschränkt.

Abschließend werden Möglichkeiten zur Verbesserung der Verträglichkeit von DRM+ mit FM vorgestellt. Da der hohe Crestfaktor von DRM+ ein Problem darstellt, werden verschiedene Verfahren zu dessen Senkung betrachtet. Zusätzlich werden Methoden zur Minimierung des effektiven Crestfaktors am Empfängereingang auf ihre Anwendbarkeit geprüft. Hierbei ergeben sich durch den Aufbau von Gleichwellennetzen oder den Einsatz des Hybrid-Modus signifikante Verbesserungen. Der Hybrid-Modus optimiert neben der Verträglichkeit auch noch die Kompatibilität zu alten FM-Empfängern, da hier ein FM-Signal mit einem DRM+-Signal kombiniert wird.

Unter Beachtung der Ergebnisse dieser Arbeit ist es möglich, DRM+ verträglich im Band II einzusetzen. Bei HD-Radio ist die Situation schwieriger, da unter den jetzigen regulatorischen Randbedingungen extreme Leistungsabsenkungen, die sowohl den Digitalteil als auch den FM-Träger treffen, erforderlich sind.

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Arbeit selbstständig angefertigt habe und keine anderen als die angegebenen Quellen, Hilfen und Hilfsmittel benutzt habe.

Mark Rosenbaum

Oberscheidweiler, 18.09.2008

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Vorgehensweise	4
1.2	Kurze Vorstellung der Systeme	5
1.2.1	FM-Rundfunk	5
1.2.2	DRM+	5
1.2.3	HD-Radio	6
1.2.4	DAB	6
2	Techniken der Netzplanung	8
2.1	Historische Betrachtung	8
2.1.1	Herkunft und Entstehung der Planungskriterien	8
2.1.2	Planungskonferenzen	9
2.2	Ausbreitungsmodell nach ITU-R BS.1542-1	10
2.2.1	Wahrscheinlichkeitstheoretische Grundlagen	10
2.2.2	Ortswahrscheinlichkeit	14
2.2.3	Zeitwahrscheinlichkeit	14
2.2.4	Das Ausbreitungsmodell	15
2.2.5	Korrekturfaktoren	17
2.3	Rausch- und interferenzbegrenzte Systeme	20
2.4	Mindestnutzfeldstärken	20
2.5	Empfangsszenarien	22
2.6	Rautenplanung	24
2.7	Hexagonplanung	24
3	Grundlagen der Verträglichkeit	27
3.1	Der Schutzabstand	27
3.1.1	Definition	27
3.1.2	Messverfahren	28
3.2	Normen	31
4	Einflussgrößen auf die Verträglichkeit	32
4.1	FM-Rundfunk	32
4.1.1	Modulationsverfahren	32
4.1.2	Spektrumsmaske	34
4.1.3	Spektrum eines FM-Senders	35
4.2	DRM+	37
4.2.1	Technische Grundlagen	37
4.2.2	Planungsparameter	41
4.3	HD-Radio	43

4.3.1	Technische Grundlagen	43
4.3.2	Planungsparameter	48
5	Verträglichkeitsmessungen	49
5.1	FM gegenüber DRM+	49
5.1.1	Theoretische Betrachtung	49
5.1.2	Ergebnisse der Laboruntersuchungen an der FH Kaiserslautern	51
5.1.3	Störmechanismen	56
5.1.4	Ergebnisse des Feldversuchs in Kaiserslautern	60
5.2	DRM+ gegenüber FM	62
5.3	FM gegenüber HD-Radio	65
5.3.1	Ergebnisse der Laboruntersuchungen	65
5.3.2	Auswirkungen auf die Planungsparameter	66
5.4	HD-Radio gegenüber FM	66
5.5	Zusammenfassung	67
6	Verbesserung der Verträglichkeit	68
6.1	Effektiver Crestfaktor	68
6.1.1	Crestfaktor bei Überlagerung von FM-Signalen	69
6.1.2	Crestfaktor bei der Überlagerung von DRM+-Signalen mit FM-Signalen	70
6.2	Techniken zur Reduktion des Crestfaktors des DRM+-Signals	71
6.2.1	Verzerrungs-Verfahren	72
6.2.2	Codierung zur Reduktion des Crestfaktors	73
6.2.3	Verwürfelungsverfahren	73
6.2.4	Anwendbarkeit bei DRM+	74
6.3	Gleichwellennetze	75
6.3.1	Kleine Gleichwellennetze	75
6.3.2	Große Gleichwellennetze	76
6.4	Hybrid-Modus	76
6.4.1	Technische Parameter	77
6.4.2	Planungstechnische Gesichtspunkte	79
6.5	Zusammenfassung	80
7	Schlußbetrachtungen	81
7.1	Eignung der Verfahren für die Rundfunkversorgung	81
7.1.1	DRM+	81
7.1.2	HD-Radio	81
7.1.3	Vergleich	82
7.2	Regulatorische Randbedingungen	82
7.3	Weitere Arbeiten	83
7.4	Schlusswort	84
	Literaturverzeichnis	84
	Abbildungsverzeichnis	87
A	Tabellen	89
A.1	Schutzabstand nach ITU [5]	89

A.2	Schutzabstand DRM+ (16-QAM) gestört durch FM	90
A.3	Schutzabstand DRM+ (4-QAM) gestört durch FM	91
A.4	Schutzabstand FM gestört durch DRM+ (Messwerte)	92
A.5	Schutzabstand FM gestört durch DRM+ (Planungsvorschlag)	93

Kapitel 1

Einleitung

Neben den übertragungstechnischen Vorteilen eines digitalen Systems ist die Digitalisierung des Rundfunks ein politisches Ziel auf europäischer, aber auch auf Bundesebene. Im TKG (§ 63, Abs. 5) ist geregelt, dass die Frequenzzuteilungen für den analogen Hörrundfunk spätestens 2015 auslaufen. Es ist jedoch vorauszusehen, dass eine vollständige Digitalisierung bis zu diesem Datum unmöglich ist. Beim Fernsehen ist diese Digitalisierung längst im Gange, beim Hörrundfunk jedoch konnte sich das Digitalsystem Digital Audio Broadcast (DAB) bislang nicht durchsetzen. Dies liegt unter anderem daran, dass DAB die vorhandenen Strukturen im Rundfunk nicht zu vertretbaren Kosten abbilden kann. Durch die Multiplexbildung müssen sich mehrere Programmveranstalter einigen, lokale und regionale Sender sind dort nicht mit vertretbarem Aufwand abbildbar. Außerdem ist DAB ein System für den Einsatz im Band III und im L-Band. Für das Band II ist es aufgrund seiner hohen Bandbreite nicht geeignet. Deshalb wird ein rasterkonformes System benötigt, das die Verhältnisse im Band II abbilden kann und sich auch für einen schrittweisen Umstieg eignet. Zur Zeit sind Digital Radio Mondiale + (DRM+) und HD-Radio die interessantesten Kandidaten für solch ein System. Sie werden im Rahmen dieser Diplomarbeit vorgestellt und auf ihre Eignung für den Einsatz im Band II untersucht. Zum besseren Verständnis werden zusätzlich die Grundlagen der Rundfunkversorgung und grundsätzliche Verträglichkeitsbetrachtungen aufgeführt.

1.1 Vorgehensweise

Ausgehend von den Grundlagen der Rundfunkversorgung und den übertragungstechnischen Eigenschaften der drei Systeme (FM-Rundfunk, DRM+, HD-Radio) werden die Verträglichkeitskriterien im Rundfunk dargestellt und auf ihre Anwendbarkeit in den betrachteten Fällen untersucht. Der eigentliche Kern der Arbeit ist die Analyse der beiden Systeme (DRM+, HD-Radio) bezüglich ihrer Eignung für die Ablösung des analogen FM-Rundfunks. Dazu werden die Ergebnisse der bereits durchgeführten Verträglichkeitsmessungen analysiert [1] und besonders die planungstechnischen Besonderheiten der Systeme aufgezeigt. Danach wird eine Versorgungsrechnung der einzelnen Systeme spezifische Eigenschaften darstellen. Dabei wird auch untersucht, ob die Möglichkeit besteht, eine überregionale Senderkette in der heutigen Umgebung auf eines der beiden digitalen Systeme umzustellen. Abschließend erfolgt eine Bewertung von DRM+ und HD-Radio in Bezug auf ihre Eignung für die Rundfunkversorgung.

1.2 Kurze Vorstellung der Systeme

1.2.1 FM-Rundfunk

Mit dem Kopenhagener Wellenplan von 1948 verlor Deutschland fast alle der damals genutzten Lang- und Mittelwellenrundfunkfrequenzen. Bis dahin wurde Rundfunk nur auf Lang- Mittel- und teilweise Kurzwelle durchgeführt. Zur Sicherstellung einer guten Versorgung der Bevölkerung mussten Alternativen gefunden werden. Als einzig mögliche Lösung blieb Ultrakurzwellen-Rundfunk (UKW) in Band II. Die Position als einziges von den Hörern bevorzugtes Band für Hörrundfunk hat das UKW-Band bis heute inne.

Die technischen Randbedingungen in der ITU-Region 1 sind:

- Frequenzbereich 87,5 bis 108,0 MHz
- Modulationsart FM (Stereo, RDS im Multiplex)
- Kanalraster 100 kHz
- Frequenzhub maximal 75 kHz

UKW-Rundfunk ist fast überall empfangbar, und es gibt eine große Vielzahl an Empfangsgeräten. Nachteilig ist die dichte Belegung des Bandes, die zur Zeit wenig Platz für neue Programmveranstalter bietet. Die grundlegenden Frequenzpläne stammen aus der Zeit vor der Einführung des Privatrundfunks (Ergebnisse der RRC Genf 84). In Rheinland-Pfalz existieren zum Beispiel vier landesweite öffentlich-rechtliche Senderketten und zwei landesweite private Ketten. Aufgrund der rheinland-pfälzischen Grenzlage sind hier weniger Frequenzen verfügbar als in anderen Bundesländern. Eine Vergrößerung der Programmviefalt ist nur unter großem Aufwand und in sehr begrenztem Rahmen möglich.

1.2.2 DRM+

DRM+ ist eine Erweiterung des Digital Radio Mondiale Standards (DRM) für den Frequenzbereich von 30 bis 108 MHz. Das DRM-System ist als Nachfolger des AM-Rundfunks auf Lang-, Mittel- und Kurzwelle entwickelt worden. Das DRM+-System wird zur Zeit im Rahmen von zwei Feldtests in Kaiserlautern und Hannover auf seine Einsatztauglichkeit getestet.

Die technischen Randbedingungen sind:

- Kanalraster 50 kHz
- Frequenzbereich 30 bis 108 MHz (realistisch Band I oder II)
- Bitrate 37,3 kBit/s bis 186,6 kBit/s
- Modulationsart OFDM
- Bandbreite 100 kHz

Das System ist gleichwellentauglich, dadurch kann eine Senderkette mit nur einer Sendefrequenz betrieben werden, wodurch eine wesentlich bessere Frequenzökonomie möglich ist. Gleichzeitig ist das Modulations- und Codierungsverfahren sehr effizient, dadurch können bis zu vier Programme auf einer Sendefrequenz ausgestrahlt werden. Ein weiterer Vorteil ist die Kompatibilität zum geltenden Raster im Band II. Da sich das System erst im Feldtest befindet, sind noch keine kommerziellen Empfänger verfügbar.

1.2.3 HD-Radio

HD-Radio ist ein proprietärer Standard der Firma iBiquity aus den USA. Es handelt sich dabei um eine Erweiterung des FM- oder AM-Systems durch einen Digital-Teil. Die AM-Variante wird vergleichbar mit DRM auf Lang-, Mittel- und Kurzwelle eingesetzt. Neben dem so genannten Hybrid-Modus, bei dem analoge und digitale Übertragung gleichzeitig stattfinden, gibt es auch einen volldigitalen Modus, bei dem die gesamte Bandbreite zur digitalen Übertragung genutzt wird. Im Folgenden wird nur noch der Hybrid-Modus betrachtet, da der volldigitale Modus aktuell nicht angewendet wird. Dem FM-Signal werden im Spektrum zwei Digital-Blöcke oberhalb und unterhalb der Sendefrequenz hinzugefügt. HD-Radio ist in den USA weit verbreitet, in der Schweiz und in Deutschland finden Feldtests statt.

Die technischen Randbedingungen [2] sind:

- Kanalraster 200 kHz
- Frequenzbereich 87,5 bis 107,8 MHz
- Bitrate 98 kBit/s
- Modulationsart FM/OFDM
- Bandbreite rund 400 kHz, davon 259 kHz für den FM-Kanal und 138 kHz (69 kHz pro Seite) für das Digitalsignal

Durch die weite Verbreitung von HD-Radio in den USA gibt es ein großes Angebot an Endgeräten. Auf den Digital-Trägern können bis zu drei zusätzliche Programme übertragen werden. Der FM-Träger in der Mitte garantiert eine Kompatibilität zu reinen FM-Empfängern in der Übergangsphase. Nachteilig ist die große belegte Bandbreite, die mit der hohen Belegungsdichte im europäischen UKW-Bereich nur schwer zu vereinbaren ist. Durch den FM-Träger ist ein Gleichwellenbetrieb nicht möglich. Des Weiteren handelt es sich hier um ein proprietäres System, bei dem Lizenzgebühren für jede Station fällig werden.

1.2.4 DAB

DAB (Digital Audio Broadcast) ist das älteste der betrachteten Digital-Systeme. Es ist in Deutschland quasi flächendeckend verfügbar, allerdings befindet sich nur eine geringe Zahl von Empfängern im Markt. Bei DAB handelt es sich um ein Multiplexverfahren, bei dem sich mehrere Programmveranstalter einen Multiplex teilen. Die ursprünglichen Frequenzen wurden im Wiesbadener Plan 1995 festgelegt. Erste Änderungen ergaben sich im Plan von Maastricht 2002. Die letzten Änderungen

(Bedeckungen im Band III) wurden in Genf 2006 (RRC06) festgelegt. Die technischen Randbedingungen sind:

- Frequenzbereiche: Band III (174 bis 230 MHz) und L-Band (1452 bis 1492 MHz)
- Modulationsart OFDM
- Bandbreite 1,5 MHz

DAB setzt aufgrund seiner frühen Entwicklung Musicam (MPEG 1 Layer 2) als Audio-Kompressionsverfahren ein. Dadurch ergibt sich eine hohe benötigte Bandbreite pro Audio-Kanal. DAB+ soll dieses Problem durch Einsatz vom MPEG4 AAC lösen, allerdings zum Preis der Inkompatibilität zu den vorhandenen DAB-Empfängern. Durch die Multiplexbildung ist DAB für kleinere lokale und regionale Programme nicht finanzierbar. Im L-Band ist terrestrisches ebenso wie Satelliten-DAB vorgesehen. Es gibt vier Sendemodi, die jeweils auf unterschiedliche Versorgungsverhältnisse abgestimmt sind. Es sei angemerkt, dass DAB nicht Gegenstand des Vergleichs ist, es wird nur kurz angerissen.

Kapitel 2

Techniken der Netzplanung

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen der Netzplanung vermittelt. Des weiteren wird ein kurzer Abriss über die Geschichte des UKW-Rundfunks gegeben.

2.1 Historische Betrachtung

2.1.1 Herkunft und Entstehung der Planungskriterien

Bis Ende der 40er Jahre wurde Rundfunk ausschließlich unterhalb 30 MHz betrieben, hauptsächlich auf Mittel- und Langwelle. Dort waren die Ausbreitungsbedingungen relativ stabil und auch bekannt. Eine Versorgung großer Gebiete war mit wenigen Sendern zu erreichen. Dies gilt für Kurzwelle nur in eingeschränkter Form, da dort die Ausbreitungsbedingungen wesentlich variabler sind. Nach dem Zweiten Weltkrieg und dem Verlust fast aller bis dahin genutzter Mittelwellenfrequenzen war es erforderlich, neue Frequenzen zu erschliessen. Die Bedingungen im Bereich der Ultrakurzwelle sind allerdings gänzlich andere als im Bereich der Mittel- und Langwelle. Nach [3] waren folgende Grundlagen für die Planung erforderlich:

- Die Ausbreitung
 - im Bereich der optischen Sicht
 - in Horizontnähe
 - jenseits der optischen Sicht
- Die Störungen eines Programms durch Gleich- oder Nachbarkanalsender

Die Ausbreitung erfolgt nur über die Bodenwelle im Bereich quasioptischer Verbindung. Große Reichweiten, wie sie durch die Raumwellen auf niedrigen Frequenzen möglich waren, sind im Bereich der Ultrakurzwellen nicht betriebsmäßig verwendbar. Diese veränderten Ausbreitungsbedingungen waren allerdings in Deutschland noch nicht untersucht worden oder die Unterlagen waren kriegsbedingt abhanden gekommen [3]. Ab dem Jahr 1940 wurde in den USA untersucht, wie sich die Ausbreitungsbedingungen auf UKW für Fernsender eignen. Diese Untersuchungen wurden die Basis der Planungen für den UKW-Rundfunk in Deutschland. In den amerikanischen Arbeiten wurden die Orts- und Zeitwahrscheinlichkeiten für die Ostküste der USA experimentell bestimmt. Da die Topographie und auch die Meteorologischen Bedingungen in Deutschland wesentlich anders sind, wurden im Jahr 1952

Untersuchungen durch den Nordwestdeutschen Rundfunk, den Südwestfunk sowie durch die Deutsche Bundespost durchgeführt, um belastbare Daten für eine verlässliche Planung zu liefern. Neben den Ausbreitungsbedingungen waren auch die Störungen durch Nachbar- und Gleichkanalsender zu untersuchen. Hierzu wurden Untersuchungen am Institut für Rundfunktechnik (IRT) durchgeführt, an deren Ende eine Schutzabstandskurve stand. Diese Daten flossen auch in die Planungsnorm für FM-Rundfunk ein. Im Zuge der Einführung des Stereo-Rundfunks Anfang der 70er Jahre wurden wiederum Untersuchungen beim IRT durchgeführt, die die Grundlage der Stereo-Schutzabstandskurve bildeten. Da in der Anfangszeit des Rundfunks Ballempfang (Sender an der Peripherie des Versorgungsgebietes empfangen das Signal eines Hauptsenders und strahlen es wieder ab) weit verbreitet war, war eine hohe Audio-Qualität erforderlich. Aus diesem Grund wurden 50 dB Audio-SNR als erforderlich angesetzt.

2.1.2 Planungskonferenzen

Auf Planungskonferenzen der ITU werden weltweit gültige Standards für die Verwendung von Frequenzen festgelegt. So werden dort die Frequenzbereiche in Bänder mit festgelegter Verwendung aufgeteilt. Diese World Radio Conferences werden auch kurz mit WRC und einer zweistelligen Jahresangabe bezeichnet. Im folgenden werden die Planungskonferenzen, die für die Entwicklung des UKW-Rundfunks von Bedeutung waren, kurz vorgestellt.

In Atlantic City wurde 1947 das Frequenzband von 87,5 bis 100 MHz für den FM-Rundfunk zugewiesen. Für Deutschland fiel der Startschuss für den UKW-Rundfunk auf der Konferenz in Kopenhagen 1948. Dort verlor Deutschland (in Abwesenheit) fast alle der bisher für den Rundfunk genutzten Mittelwellenfrequenzen.

In Stockholm wurde 1952 ein Frequenzbereich von 87,5 bis 100 MHz für den Hörrundfunk auf Ultrakurzwellen geplant (im 300 kHz-Raster). Ebenfalls in Stockholm wurden 1961 die Rundfunkfrequenzen in Deutschland neu geplant und auf ein Raster von 100 kHz umgestellt, so dass im Bereich jeder Landesrundfunkanstalt drei flächendeckende Sendernetze möglich wurden.

Im Laufe der Zeit wurde der Platz im UKW-Band immer knapper. Daraufhin wurde in Darmstadt 1971 beschlossen, das Rundfunkband um den Bereich 100 bis 104 MHz zu erweitern. Aufgrund internationaler Bedenken wurde dieser Schritt allerdings nicht umgesetzt. Im Rahmen der Genfer Funkverwaltungskonferenz 1979 erhielt das UKW-Rundfunkband seine endgültige Ausdehnung auf 87,5 bis 108 MHz. Ein weiteres Wachstum war nun nicht mehr möglich, da oberhalb der Flugfunk und unterhalb der BOS (Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben)-Funk angesiedelt sind. Um die Einführung des Privatrundfunks zu ermöglichen, wurde 1984 der Bereich von 100 bis 108 MHz neu geplant. Der Plan von Genf 84 ist auch heute noch verbindlich für die Rundfunkplanung im Band II.

Auf der RRC06 in Genf wurde die Neuordnung des Spektrums für den digitalen Rundfunk (in diesem Fall DVB-T und DAB) beschlossen. Auch hier wurden die Regeln, auf denen die Planung und damit das Abkommen basiert in einer Konferenz zwei Jahre früher (RRC04) festgelegt.

2.2 Ausbreitungsmodell nach ITU-R BS.1542-1

2.2.1 Wahrscheinlichkeitstheoretische Grundlagen

Dieser Abschnitt stellt die für die Versorgungsplanung wichtige Normalverteilung und die logarithmische Normalverteilung kurz vor. Detailliertere Erläuterungen zur Wahrscheinlichkeitstheorie finden sich zum Beispiel in [13].

Die Normalverteilung

Die Normalverteilung ist eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung, deren Bedeutung daher rührt, dass die Überlagerung vieler stochastisch unabhängiger Verteilungen gegen die Normalverteilung konvergiert (zentraler Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitstheorie). Da es in der Natur sehr viele nicht deterministische Einflüsse gibt, kann man für sehr viele Prozesse mit guter Genauigkeit eine Normalverteilung annehmen.

Mit der Dichtefunktion einer Verteilung kann die Wahrscheinlichkeit, dass eine Zufallsgröße zwischen zwei Punkten a und b liegt, durch Integration bestimmt werden. Die Dichtefunktion der Normalverteilung (auch Gaußverteilung) ergibt sich zu:

$$w(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.1)$$

μ ist der Mittelwert oder auch Erwartungswert der Normalverteilung. Dieser entspricht dem Medianwert, da es sich um eine symmetrische Verteilung handelt. Bei σ handelt es sich um die Standardabweichung der Verteilung. Durch diese zwei Parameter ist die Normalverteilung vollständig beschrieben.

Abbildung 2.1 zeigt die Wahrscheinlichkeitsdichte einer Standardnormalverteilung ($\mu = 0$ und $\sigma = 1$).

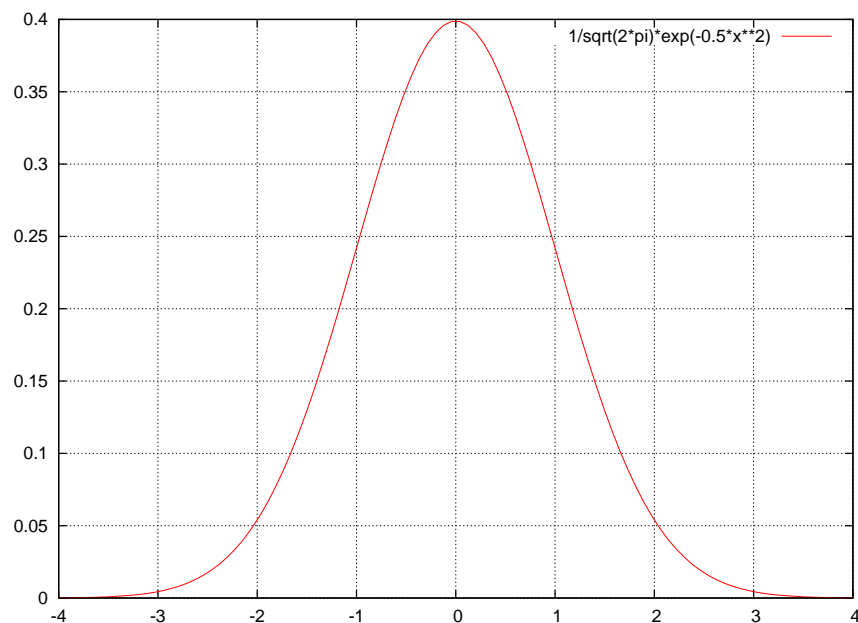


Abbildung 2.1: Dichtefunktion der Standardnormalverteilung

Durch Integration der Dichtefunktion erhält man die Verteilungsfunktion. Sie

gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass der Zufallswert unterhalb einer bestimmten Grenze liegt, mathematisch ausgedrückt durch

$$F(x) = P(X < x) \quad (2.2)$$

Die Verteilungsfunktion ist monoton steigend. Sie beginnt für $-\infty$ mit 0 und endet für $+\infty$ bei 1. Für die Normalverteilung lautet die Verteilungsfunktion

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt . \quad (2.3)$$

Dieses Integral ist geschlossen nicht lösbar. Deshalb berechnet man es entweder numerisch oder verwendet die tabellierte Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung. Mittels Transformation lässt sich jede Normalverteilung auf die Standardnormalverteilung zurückführen. Mit Hilfe dieser Funktion lässt sich schnell die Wahrscheinlichkeit bestimmen, mit der die Zufallsvariable zwischen zwei Schranken a und b liegt:

$$P(a < X < b) = F(b) - F(a) . \quad (2.4)$$

Abbildung 2.2 zeigt die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung.

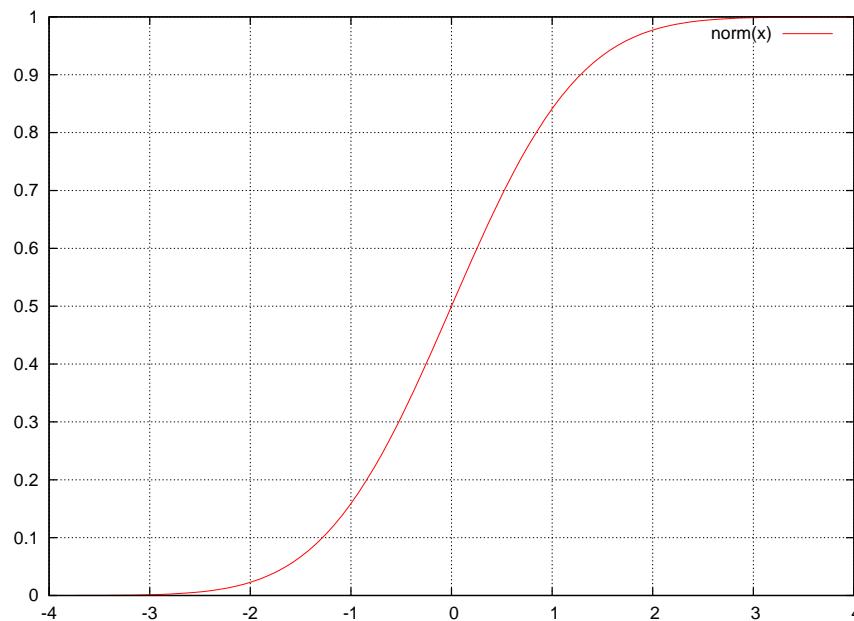


Abbildung 2.2: Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung

Die inverse Verteilungsfunktion der Normalverteilung (in ihrer kompletären Form) benötigt man in der Funknetzplanung. Abbildung 2.3 zeigt die inverse Normalverteilung $-Q_i$. Sie ist nicht geschlossen lösbar, ihre Werte und eine Approximationsformel sind in [20] angegeben.

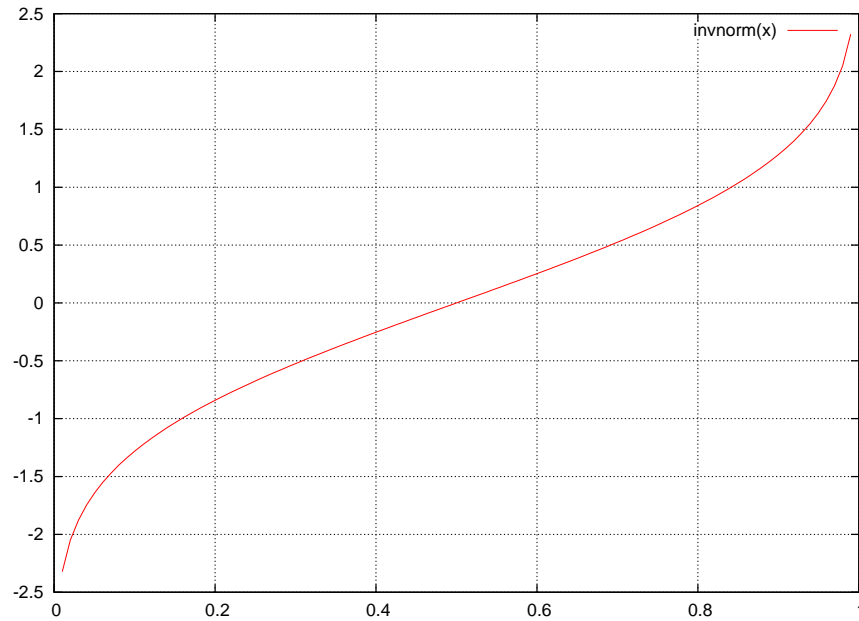


Abbildung 2.3: inverse Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung

Die logarithmische Normalverteilung

Man spricht von einer logarithmischen Normalverteilung, falls eine logarithmierte Größe (z.B. Feldstärke in dB) normalverteilt ist. Damit eine solche Verteilung entsteht, müssen zwei Faktoren zusammenkommen:

- Die gemessene Größe entsteht durch Einwirkung vieler statistisch verteilter Größen. Dies ist Voraussetzung für das Entstehen einer Normalverteilung (Zentraler Grenzwertsatz)
- Die Stärke der Störung ist proportional zur gestörten Größe und einem zur Störung gehörenden Störfaktor. Das trifft zum Beispiel auf Reflexionen, Abschattung und Mehrwegeausbreitung zu.

Im Ergebnis gehorcht in der Rundfunkversorgung der Logarithmus der Feldstärke einer Gaußverteilung. Da die Feldstärke in dB als logarithmisches Maß angegeben wird, kann die Verteilung sehr einfach angewendet werden. Eine weiterführende Herleitung der logarithmischen Normalverteilung kann [3] entnommen werden.

Abbildung 2.4 zeigt eine logarithmische Normalverteilung mit ihrem Mittelwert bei 100. Abbildung 2.5 zeigt die selbe Dichtefunktion, allerdings in linearer Achsenskalierung. In dieser Skalierung der x-Achse handelt es sich streng genommen nicht um Dichtefunktionen, da die Fläche unter der Kurve größer als 1 ist. Wenn man die Skalierung der x-Achse in dB aufträgt, handelt es sich wieder um eine Dichtefunktion.

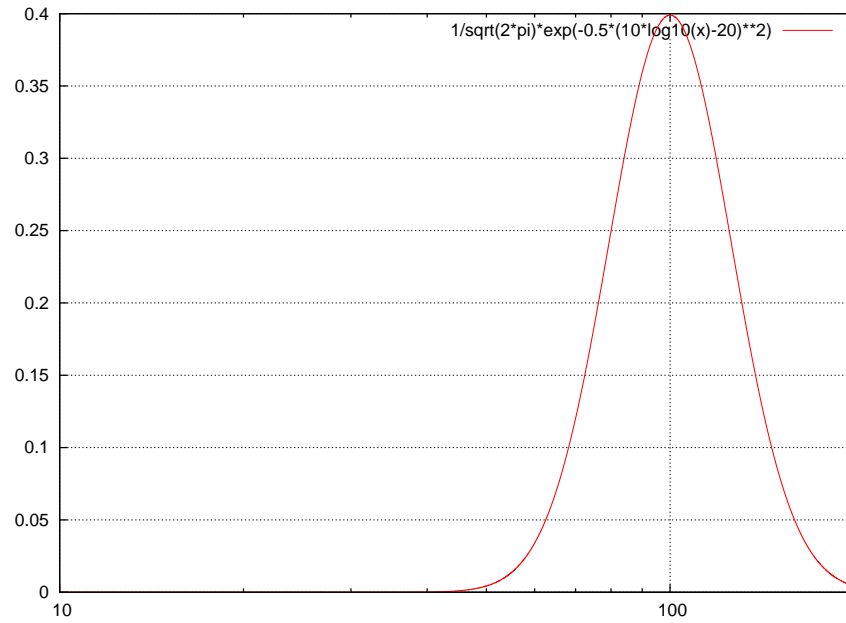


Abbildung 2.4: Dichtefunktion der logarithmischen Normalverteilung ($\mu = 100$)

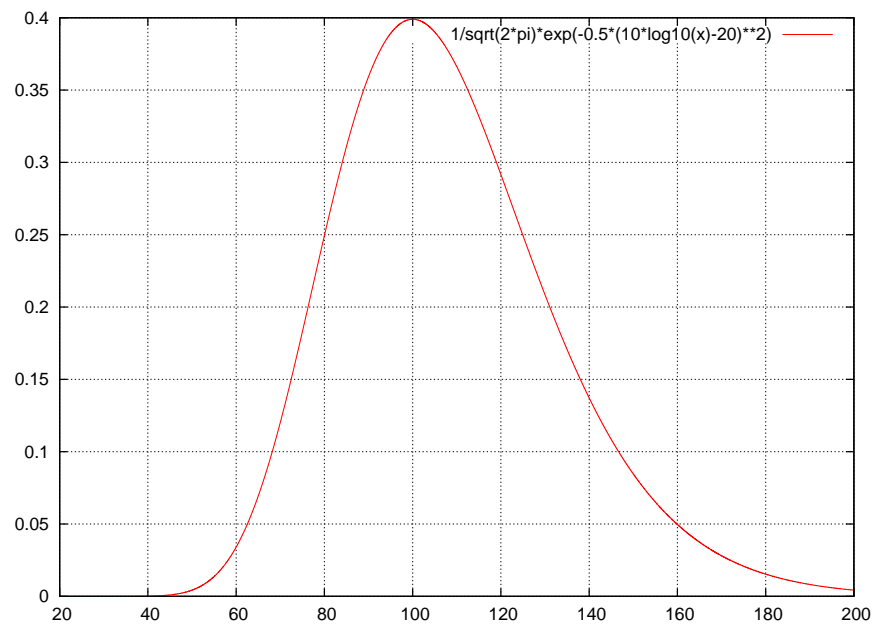


Abbildung 2.5: Dichtefunktion der logarithmischen Normalverteilung ($\mu = 100$) in linearer Skalierung

Das k-LNM-Verfahren

Mit Hilfe des k-LNM-Verfahrens [9] kann bei einer Überlagerung mehrere logarithmischer Normalverteilungen eine einzige logarithmische Normalverteilung bestimmt werden. Zur Bestimmung der Überlagerung n verschiedener Felder mit ihren jeweiligen Mittelwerten \bar{F}_i und Standardabweichungen σ_i werden die jeweiligen Standardabweichungen S_i und Mittelwerte M_i ausgewertet:

$$M_i = 10^{\frac{\bar{F}_i}{10dB} + \frac{\sigma_i^2}{20dB}}, S_i = 10^{\frac{\bar{F}_i}{5dB} + \frac{\sigma_i^2}{10dB}} \cdot (10^{\frac{\sigma_i^2}{10dB}} - 1) \quad (2.5)$$

Im nächsten Schritt wird der Mittelwert und die Varianz der Summenverteilung ermittelt:

$$M = \sum_{i=1}^n M_i, \quad S^2 = \sum_{i=1}^n S_i^2 \quad (2.6)$$

Daraufhin werden die Parameter der resultierenden Verteilung \bar{F}_s und σ_s bestimmt. Ein Wert von 0,6 für k hat sich in der Rundfunkplanung als sinnvoll erwiesen.

$$\sigma_s^2 = 10dB \cdot \log_{10}\left(k \frac{S^2}{M^2} + 1\right), \quad \bar{F}_s = 10dB \cdot \log_{10}(M) - \frac{\sigma_s^2}{2} \quad (2.7)$$

2.2.2 Ortswahrscheinlichkeit

Die Ausbreitung auf einer glatten Kugel war bereits in den dreißiger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts untersucht worden. Hier hängt die Empfangsfeldstärke bei konstanten Parametern (Sendeleistung, Antennenhöhe, Antennengewinn, Frequenz) des Senders nur vom Abstand Sender - Empfänger sowie von der Höhe und Art der Empfangsantenne ab. Diese idealisierte Betrachtung gilt allerdings nur für eine glatte Erdoberfläche. Dies trifft nur in den wenigsten Fällen zu, da Bebauung und Vegetation ebenso die Ausbreitung beeinflussen wie Gebirge und Täler. Die Einflussfaktoren kann man in makroskopische und mikroskopische Faktoren unterteilen. Die makroskopischen Veränderungen spielen sich im Bereich von 10 m bis 100 m ab. Sie werden hauptsächlich durch Abschattung und Mehrwegeausbreitung erzeugt. Die mikroskopischen Veränderungen treten bei Positionsveränderungen im Bereich der Wellenlänge auf. Hier handelt es sich hauptsächlich um Reflexionen an nahen Gegenständen. Für die Planung sind hauptsächlich die makroskopischen Faktoren interessant, da bei portablem oder stationärem Empfang die mikroskopischen Störungen durch Bewegungen der Antenne oder die Nutzung eines Empfängers mit Antennendiversität ausgeschaltet werden können.

In einem Bereich der Größe 100 m x 100 m bis zu 200 m x 200 m wird man eine zufällige Feldstärkeverteilung über die Punkte des Gebietes vorfinden. Diese Feldstärkewerte kann man als logarithmisch normalverteilt betrachten. Üblicherweise wird die Feldstärke als Medianwert über ein solches Gebiet angegeben. Das bedeutet, an 50 % der Orte wird die Feldstärke über und an 50 % unter dem angegebenen Wert liegen. Damit ergibt sich eine Ortswahrscheinlichkeit der angegebenen Feldstärke von 50 %. Bei einer Ortswahrscheinlichkeit von 90 % liegt die Feldstärke an 90 % der Orte über und an 10 % unter der angegebenen Feldstärke.

2.2.3 Zeitwahrscheinlichkeit

Ausserhalb des optischen Sichtbereichs treten zusätzlich noch zeitliche Streuungen der Feldstärke auf. Hinter dem Horizont ist die Bodenwelle bereits stark gedämpft, hier dominiert die Ausbreitung über Raumwellen. Auf den langwelligeren Bändern erfolgen die Reflexionen an der Ionosphäre in einer Höhe von 80 km bis mehrere tausend Kilometer Höhe. Die Reflexionseigenschaften der Ionosphäre bestimmt vor allem die Sonne (Sonnenflecken, Sonnenwind), da die von der Sonne emittierten geladenen Teilchen die Ionosphäre teilweise ionisieren. Bei Frequenzen im Bereich des Bandes I (z.B. 6 m Amateurfunkband) existiert diese Ausbreitung über die Ionosphäre nur für kurze Zeitspannen, was diesem Frequenzbereich den Beinamen „Magic Band“ eingetragen hat. Im Bereich der ultrakurzen Wellen gibt es zwar noch eine

Ausbreitung über die Ionosphäre, die sich allerdings aufgrund der großen Feldstärke-schwankungen und der geringen zeitlichen Verfügbarkeit nicht für den Sendebetrieb eignet. Von Interesse ist hier vielmehr eine eher kleinräumige Raumwellenausbreitung über Reflexionen an der Troposphäre. Die Troposphäre reicht vom Erdboden bis zu einer Höhe von rund 12 km (abhängig vom Breitengrad). Da geladene Teilchen die Troposphäre nur in sehr geringem Umfang erreichen können, folgen die Reflexionen an der Troposphäre einem anderen Mechanismus. Die Troposphäre erhält ihre Dielektrizität durch den enthaltenen Wasserdampf. Dieser Wasserdampfgehalt ist zeitlichen Schwankungen durch sich veränderndes Wetter unterworfen. Diese zeitliche Wahrscheinlichkeit nennt sich Zeitwahrscheinlichkeit. Eine Zeitwahrscheinlichkeit von 1 % bedeutet, dass die angegebene Feldstärke im zeitlichen Mittel (über das ganze Jahr, um jahreszeitliche Effekte zu erfassen) in 1 % der Zeit überschritten und zu 99 % der Zeit unterschritten wird.

In der Netzplanung werden normalerweise Ausbreitungskurven für 1 % und 50 % Zeitwahrscheinlichkeit verwendet. Im für die Versorgung des betrachteten Senders interessanten Bereich mit einem Radius von 60 km verändern sich die Feldstärken zwischen 50 % und 99 % Zeitwahrscheinlichkeit praktisch nicht [7]. Deshalb kann man die 50 %-Kurve problemlos zur Versorgungsplanung nutzen. Die 1 %-Kurve wird zur Berechnung der Interferenz benachbarter Sender genutzt.

Zusammengefasst gibt es rund um den Sender eine Kernzone, in der fast alle Einwohner versorgt sind. Daran schliesst sich eine breite Randzone mit abnehmender Versorgung an. Nahe an der Kernzone gibt es auf den Bergen noch eine dauerhafte Versorgung, während in den Tälern die Feldstärke zeitlich stark schwankt und auch häufig unter der Mindestnutzfeldstärke liegt. In den Außenbereichen der Randzone ist nur auf den Bergen noch eine zeitweise vorhandene Versorgung feststellbar. Diese Betrachtung gilt in der Form allerdings nur in einem rauschbegrenzten System. In einem interferenzbegrenzten System ist in der Randzone mit Störungen durch Nachbar- und Gleichkanalsender zu rechnen.

2.2.4 Das Ausbreitungsmodell

Das Ausbreitungsmodell erlaubt eine Punkt-zu-Fläche-Planung für den Rundfunk. Es gibt die Median-Feldstärke am Empfangsort in Höhe der Oberkante der Bodenbedeckung (Vegetation, Bebauung), aber mindestens in 10m Höhe an. Je nach Art des Untergrundes (kaltes Meer, warmes Meer, Land) werden verschiedene Ausbreitungsbedingungen angenommen. An dieser Stelle werden nur die Kurven und Bedingungen für die Ausbreitung über Land betrachtet, da die Ausbreitung über dem Meer in Mittel- und Süddeutschland keine Relevanz hat. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Höhe der Sendeantenne (definiert als Antennenhöhe über der mittleren Geländehöhe in einer Entfernung von 3 km bis 15 km vom Sender). Die zu erwartende Feldstärken sind in Abhängigkeit von der Entfernung in [20] als Graphen für Ortswahrscheinlichkeiten von 1 % und 50 % angegeben. Es wird eine Sendeleistung von 1 kW ERP angenommen, zusätzlich ist die maximal theoretisch zu erwartende Feldstärke (begrenzt durch die Freiraumdämpfung) eingetragen. Die Abbildung 2.6 zeigt eines dieser Diagramme für 50 % Zeitwahrscheinlichkeit bei einer Frequenz von 100 MHz.

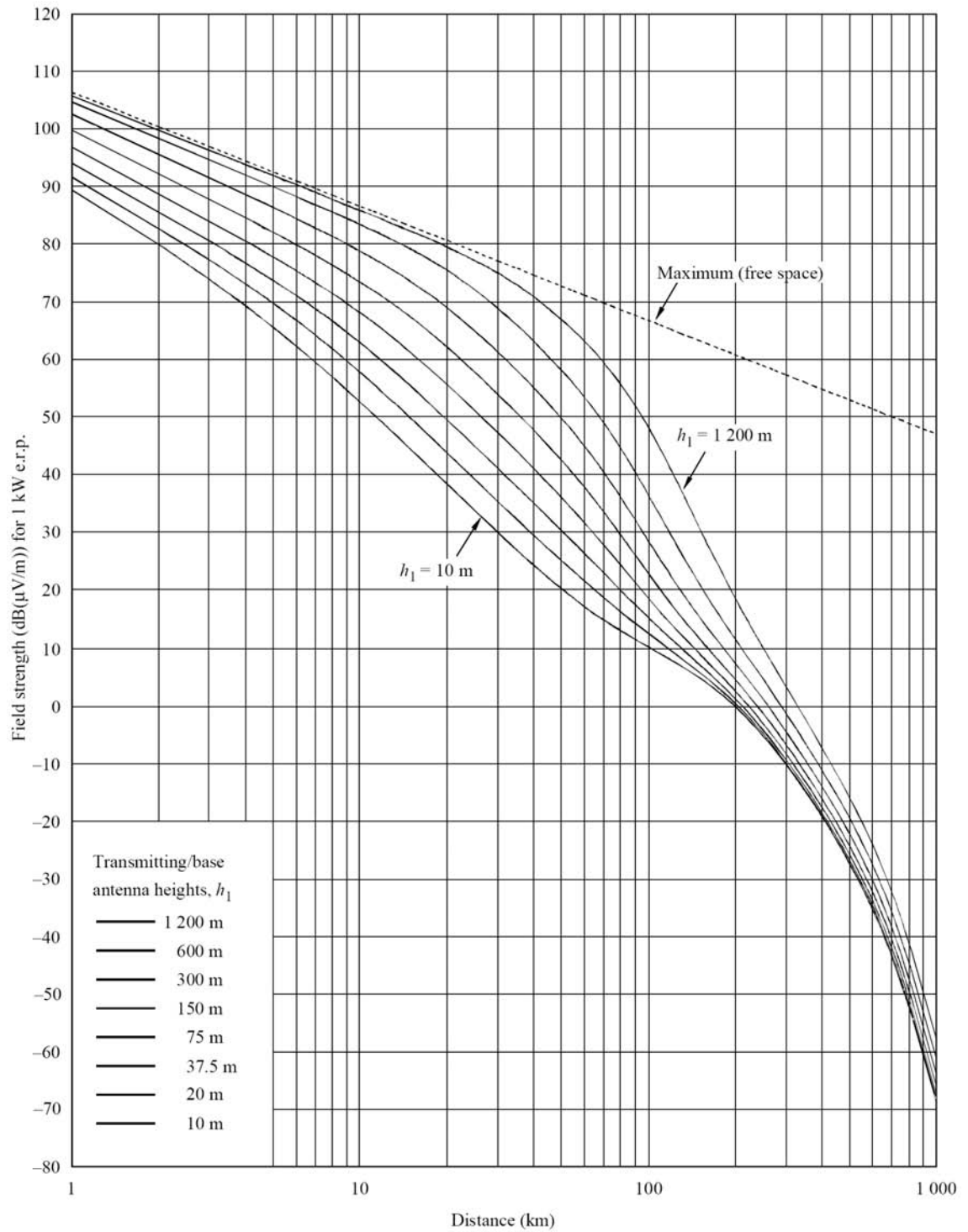


Abbildung 2.6: Ausbreitung bei 100 MHz und 50 % Zeitwahrscheinlichkeit [20]

Im Entfernungsbereich von 1 km bis 30 km vom Sender wird die Okumara-Hata-Methode angewendet, ab einer Entfernung von 10 km erfolgt ein langsamer Übergang auf eine Approximation der beobachteten Ausbreitung. Das Berechnungsverfahren ist in [20] beschrieben, würde an dieser Stelle allerdings den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

2.2.5 Korrekturfaktoren

Die Ausbreitungskurven stellen den Standardfall der Ausbreitung dar. Falls die Gegebenheiten und Anforderungen im Planungsgebiet davon abweichen, müssen Korrekturfaktoren verwendet werden. Diese Korrekturfaktoren beziehen sich auf das rohe Ausbreitungsmodell nach [20]. Bei der Arbeit mit einer Planungssoftware muss überprüft werden, ob die Software gewisse Abschläge bereits intern berücksichtigt. Ist das der Fall, dürfen die entsprechenden Korrekturwerte nicht nochmals in Abzug gebracht werden.

Ortskorrektur

Das Ausbreitungsmodell liefert die Medianfeldstärke, das heisst eine Ortswahrscheinlichkeit von 50 %. Durch die Annahme der logarithmischen Normalverteilung ist eine einfache Umrechnung der Feldstärkewerte auf eine beliebige andere Wahrscheinlichkeit möglich. Dies geschieht mit Hilfe folgender Formel:

$$E(q) = E(\text{median}) + Q_i(q/100) \cdot \sigma_L(f) . \quad (2.8)$$

Diese Formel gibt an, welche Feldstärke $E(q)$ an q % der Orte bei einer Medianfeldstärke von $E(\text{median})$ überschritten wird. Durch Umstellen nach $E(\text{median})$ kann auch eine erforderliche Medianfeldstärke für eine bestimmte Ortswahrscheinlichkeit und eine Mindestfeldstärke $E(q)$ bestimmt werden. $Q_i(q/100)$ ist die komplementäre inverse Verteilungsfunktion der Normalverteilung, sie wird auch als Distributionsfaktor bezeichnet. Sie ist zum Beispiel in [20] tabelliert. Bei σ_L handelt es sich um die Standardabweichung der Normalverteilung im betrachteten Gebiet. Sie ergibt sich zu:

$$\sigma_L = K + 1,6 \log(f) \text{ dB} . \quad (2.9)$$

K ist eine von der Landschaftsform und der Modulationsart abhängige Konstante. In [20] ist für K angegeben:

- $K = 2,1$ für mobile Systeme in städtischem Gebiet
- $K = 3,8$ für mobile Systeme in vorstädtischem oder hügeligem Gelände
- $K = 5,1$ für analoge Übertragungssysteme

Die Standardabweichung für 100 MHz ist abweichend von diesen Rechenvorschriften in Tabelle 2.1 angegeben.

Tabelle 2.1: Standardabweichungen der Ortsverteilung [20]

Service	Standardabweichung
Analoger Rundfunk	8,3 dB
Digitaler Rundfunk	5,5 dB
Mobiler Empfang, städtisch	5,3 dB
Mobiler Empfang, vorstädtisch oder hügelig	6,7 dB

Die Werte stimmen bei analogem Rundfunk und im städtischen Gebiet vollständig überein, im vorstädtischen oder hügeligen Gelände gibt es eine leichte Abweichung von 0,3 dB. Breitbandige digitale Systeme sind wesentlich unempfindlicher

gegen frequenzselektiven Schwund als schmalbandige Systeme, daher ist die Abweichung für digitalen Rundfunk im stationären oder portablen Fall niedriger. Für mobilen Empfang gelten für analoge und digitale Systeme wieder die selben Werte. Bei diesen Werten handelt es sich um Erfahrungswerte, die in Versuchen gewonnen wurden. Sie sind in dieser Form nur für gemäßigte Geländeformen (Flachland oder sanft geschwungene Mittelgebirge) gültig. Sie gelten nicht für hochalpines Gelände mit tiefen Taleinschnitten und hohen Bergen.

Interpolation der effektiven Antennenhöhe

Die Ausbreitungskurven wurden für eine effektive Antennenhöhe der Basisstation von 20; 37,5; 150; 300; 600 und 1200 m berechnet. Falls die Antennenhöhe im Bereich von 10 m bis 3000 m liegt, kann die folgende Formel zur Inter-/Extrapolation der zu erwartenden Feldstärke eingesetzt werden:

$$E = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \frac{\log_{10}\left(\frac{h_1}{h_{inf}}\right)}{\log_{10}\frac{h_{sup}}{h_{inf}}}. \quad (2.10)$$

Wobei h_{inf} und die nächst niedrigere tabellierte Höhe, E_{inf} die zugeordnete Feldstärke, h_{sup} die nächst höhere tabellierte Höhe, E_{sup} die zugeordnete Feldstärke und h_1 die effektive Höhe sind. Für eine Antennenhöhe größer 1200 m sind die Werte für 600 und 1200 m zur Extrapolation zu verwenden. Antennenhöhe von unter 10 m oder gar im negativen Bereich sind im Rundfunk nur in absoluten Ausnahmefällen anzutreffen, weshalb die entsprechenden Berechnungsverfahren hier nicht wiedergegeben werden.

Korrektur der effektiven Antennenhöhe für Landausbreitungswege kürzer als 15 km

Die effektive Antennenhöhe ist definiert als die Höhe der Sendeantenne über dem Durchschnitt der Geländehöhe im Bereich von 3 km bis 15 km Abstand. Bei einem Abstand des Empfängers vom Sender kleiner 15 km ist diese Berechnung nicht möglich, deshalb ist dort eine Anpassung erforderlich. Falls keine Informationen über das Gelände vorliegen gilt: Für einen Abstand $d < 3 \text{ km}$ wird die Höhe der Antenne über Grund als Berechnungshöhe angenommen. Für einen Abstand d zwischen 3 km und 15 km gilt folgende Formel: $h_1 = h_a + (h_{eff} - h_a)(d - 3)/12$, wobei h_a die Höhe der Antenne über Grund, d den Abstand Sender-Empfänger und h_{eff} die effektive Höhe der Antenne darstellen. Falls Geländeinformationen vorhanden sind, kann als Berechnungshöhe die Höhe der Antenne über dem Durchschnitt der Geländehöhe in einer Entfernung von $0,2d$ bis $d \text{ km}$ verwendet werden.

Korrektur der Empfangsantennenhöhe

Das Ausbreitungsmodell bezieht sich auf eine Antenne auf Höhe der Oberkante der Bodenbedeckung, aber mindestens 10 m über Grund. Für portablen oder mobilen Empfang ist diese Annahme allerdings unpraktikabel, da hier von einer Antennenhöhe von 1,5 m ausgegangen wird. Deshalb muss die zu erwartende Feldstärke entsprechend korrigiert werden. Der Korrekturfaktor für Höhen kleiner 10 m berechnet sich wie folgt:

$$C_h = 6,03 - J(\nu) \quad (2.11)$$

wobei:

$$J(\nu) = (6,9 + 20 \log_{10}(\sqrt{(\nu - 0,1)^2 + \nu - 0,1})) , \quad (2.12)$$

$$\nu = K_{nu} \sqrt{h_{dif} \theta_{clut}} , \quad (2.13)$$

$$h_{dif} = R - h_2 , \quad (2.14)$$

$$\theta_{clut} = \arctan\left(\frac{h_{dif}}{27}\right) , \quad (2.15)$$

$$K_{nu} = 0,0108 \sqrt{f} . \quad (2.16)$$

Wobei h_2 die Höhe der Empfangsantenne, R die Bezugshöhe des Ausbreitungsmodells (10 m für vorstädtische, 20 m für städtische und 30 m für großstädtische Bebauung) und f die Frequenz in MHz bezeichnen. Bei einer Bezugshöhe von 10 m, einer Antennenhöhe von 1,5 m und einer Frequenz von 100 MHz ergibt sich der Korrekturfaktor zu:

$$h_{dif} = 8,5 \text{ m} ,$$

$$\theta_{clut} = 17,47^\circ ,$$

$$K_{nu} = 0,108 ,$$

$$\nu = 1,32 ,$$

$$J(\nu) = 15,83 ,$$

$$C_h = -9,79 \text{ dB} .$$

Korrektur des freien Sichtwinkels des Empfängers

In Tälern und hinter Bergen ist der Sichtwinkel des Empfängers in Richtung des Senders eingeschränkt. Dies wird durch einen weiteren Korrekturfaktor berücksichtigt. Dafür sind natürlich Kenntnisse über die Topographie erforderlich. Der Freiheitswinkel θ_{tca} ergibt sich zu:

$$\theta_{tca} = \theta - \theta_r . \quad (2.17)$$

θ ist der Winkel vom Empfänger in Richtung des Senders, wenn man eine Linie vom Empfänger zum Sender annimmt, die über alle Geländeerhebungen bis in eine Entfernung von 16 km (oder bis zum Sender, je nachdem, was kürzer ist) hinweg reicht, gemessen zur Horizontalen. Der Referenzwinkel θ_r ist der Winkel, unter dem der Empfänger den Sender ohne Geländehindernisse sehen würde. Sie berechnet sich zu:

$$\theta_r = \arctan\left(\frac{h_{1s} - h_{2s}}{1000d}\right) . \quad (2.18)$$

Wobei h_{1s} die Höhe der Sendestation, h_{2s} die Höhe der Empfangsstation über NN in Metern und d die Entfernung von Sender zu Empfänger in Kilometern angibt. Der Korrekturfaktor C_a ergibt sich mit $J(\nu)$ aus Gleichung 2.12 und

$$\nu' = 0,036 \sqrt{f} , \quad (2.19)$$

$$\nu = 0,065 \theta_{tca} \sqrt{f} , \quad (2.20)$$

zu:

$$C_a = J(\nu') - J(nu) . \quad (2.21)$$

Die Formeln gelten für einen Winkel θ_{tca} im Bereich von $-0,8^\circ$ bis 40° . Darüber hinaus werden die Werte für $-0,8^\circ$ beziehungsweise 40° angenommen. Abbildung 2.7 zeigt den Verlauf des Korrekturfaktors für verschiedene Frequenzen über den Freiheitswinkel θ_{tca} .

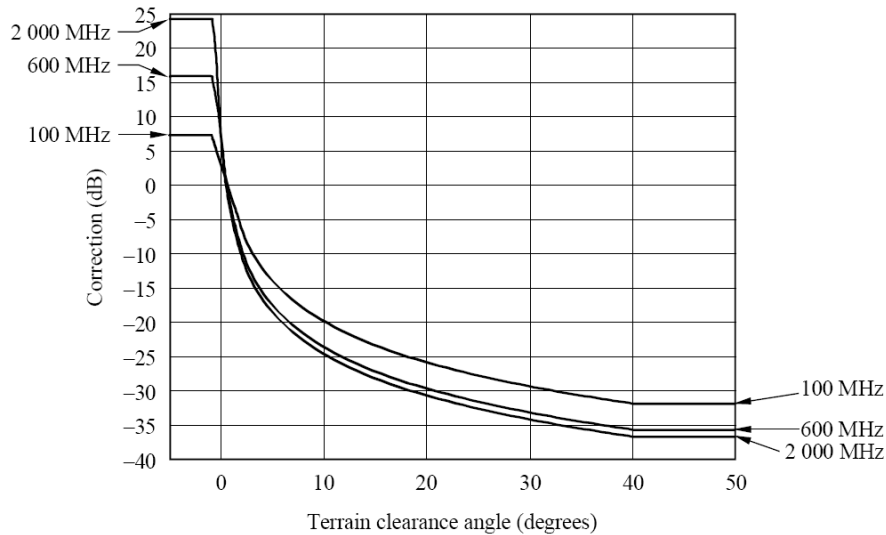


Abbildung 2.7: Abschläge für Freiheitswinkel des Empfängers [20]

2.3 Rausch- und interferenzbegrenzte Systeme

Funkübertragungssysteme sind in ihrer Reichweite entweder rausch- oder interferenzbegrenzt. In einem rauschbegrenzten System ist nur die Feldstärke des Nutzsignals für die Versorgung entscheidend. Sobald diese über der erforderlichen Nutzfeldstärke liegt, ist der betrachtete Punkt versorgt. Dies ist allerdings nur bei sehr großen Kanalabständen (Vermeidung von Nachbarkanalstörungen) sowie hohen Frequenzwiederholabständen (Vermeidung von Gleichkanalstörungen) möglich. In einem solchen System kommt man mit wenigen Sendern vergleichsweise geringer Leistung aus, kann allerdings die Ressource Frequenz nicht effizient nutzen.

Fast alle heutigen Funkübertragungssysteme (allen voran der FM-Rundfunk) sind interferenzbegrenzt. Solange die Summe der Störbeiträge geringer als ein akzeptabler Schwellenwert (entspricht einem bestimmten HF-SNR) ist, ist der betrachtete Punkt versorgt - eine Nutzfeldstärke größer der Mindestfeldstärke vorausgesetzt. Ein interferenzbegrenzt System ist natürlich an einigen Punkten (beispielsweise geographisch schwierige Tallagen) auch rauschbegrenzt.

2.4 Mindestnutzfeldstärken

Die Mindestnutzfeldstärke ist die Feldstärke, die im Mittel vorhanden sein muss, damit ein Gebiet als durch den betrachteten Sender versorgt gilt. Diese Mindestnutzfeldstärken sind in [5] definiert. Für monophonen Empfang beträgt diese 34

$dB\mu V/m$, für den stereophonen Fall $48 dB\mu V/m$. Bei Mono wird eine rundstrahlende Außenantenne angenommen, bei Stereo eine Richtantenne mit mittlerem Gewinn. Diese Werte hängen nur von der Eingangsempfindlichkeit der verwendeten Empfänger ab, ohne Betrachtung des Ausbreitungsmodells.

In [12] wird für durchschnittliche Radioempfänger eine Eingangsempfindlichkeit von $-5 dBpW$ für monophonen und von $15 dBpW$ für stereophonen Empfang angegeben. Aus diesem Wert lässt sich die Mindestfeldstärke bestimmen. Als Außenantenne wird ein $\frac{\lambda}{2}$ -Dipol angenommen. Nach [8] berechnet sich die nötige Feldstärke wie folgt:

Zuerst wird die effektive Antennenapertur bestimmt. Diese ergibt sich zu

$$A_a = G_D + 10 \log_{10} \left(1,64 \frac{\lambda^2}{4\pi} \right) dBm^2. \quad (2.22)$$

G_D ist der Antennengewinn über Halbwellendipol (hier Null) und A_a die effektive Antennenaperturfläche. Für eine Frequenz von 100 MHz entsprechend einer Wellenlänge von 3 m ergibt sich die Fläche zu $A_a = 0,699 dBm^2$. Die minimale Flussdichte φ_{min} des Feldes ergibt sich mit der minimalen Eingangsleistung des Empfängers P_{smin} in dBW und der Aperturfläche A_a zu:

$$\varphi_{min} = P_{smin} - A_a dB(W/m^2). \quad (2.23)$$

Für monophonen Empfang ergibt sich eine benötigte Flussdichte von $-125,7 dB(W/m^2)$, für stereophonen von $-105,7 dB(W/m^2)$. Die benötigte Empfangsfeldstärke ergibt sich mit dem Feldwellenwiderstand zu:

$$E_{min} = \varphi_{min} + 120 + 10 \log_{10}(120\pi) = \varphi_{min} + 145,8 dB. \quad (2.24)$$

Hiermit ergeben sich benötigte Feldstärken von $20,1 dB\mu V/m$ beziehungsweise $40,1 dB\mu V/m$ mit 50% Ortswahrscheinlichkeit bei einem Audio-SNR von 40 dB. Diese Feldstärkewerte sind signifikant geringer als die in [5]. Bei den berechneten Werten handelt es sich allerdings um die absolut erforderlichen Mindestwerte, während die Angaben in [5] aus der Praxis gewonnen wurden und unausweichliche Einflussfaktoren wie Mehrwegeausbreitung und Reflexionen berücksichtigen.

Unter normalen Verhältnissen (Störungen durch industrielle und häusliche Geräte, Reflexionen an der Bebauung) sind größere Feldstärken erforderlich. In Tabelle 2.2 [5] sind die nötigen Feldstärkemittelwerte für die Planung angegeben. Hier handelt es sich um Medianwerte in mindestens 10 m Höhe, die direkt dem Ausbreitungsmodell entnommen werden können.

Tabelle 2.2: Mindestnutzfeldstärken

Bebauung	Mono	Stereo
Ländlich	48 $dB\mu V/m$	54 $dB\mu V/m$
Städtisch	60 $dB\mu V/m$	66 $dB\mu V/m$
Großstädtisch	70 $dB\mu V/m$	74 $dB\mu V/m$

Die Vielzahl der in der Planungsnorm angegebenen Feldstärkewerte macht es schwierig, die passende Mindestfeldstärke für einen Empfangsfall auszuwählen. In der Rundfunkplanung ist es Konsens, mit $48 dB\mu V/m$ für monophonen und mit $54 dB\mu V/m$ für stereophonen Empfang zu arbeiten. Diese Feldstärkewerte werden für stationären Empfang mit einer Richtantenne mit 6 dB Gewinn in 10m Höhe angenommen.

2.5 Empfangsszenarien

In der Rundfunk-Planung gibt es nicht den einen repräsentativen Empfangsfall. Um eine akzeptable Empfangsqualität für jeden Hörer zu bieten, müssen die unterschiedlichen Gegebenheiten berücksichtigt werden. Während der stationäre Empfang mit einer in 10 m Höhe angenommenen Richtantenne keine großen Schwierigkeiten bereitet, ist der portable Empfang innerhalb und ausserhalb von Gebäuden sowie der Mobilempfang deutlich kritischer. In den Planungsrichtlinien für UKW-Rundfunk wird allerdings keine Unterscheidung der verschiedenen Empfangsfälle vorgenommen. Da in der Anfangszeit der Rundfunkplanung stationärer Empfang der vorherrschende Empfangsfall ist, beziehen sich alle angegebenen Werte auf diesen Fall.

Je nach Art des Empfangsfalls muss man verschiedene Aufschläge berücksichtigen. Alle Daten für die Empfangsfälle wurden aus [8] entnommen. Diese Daten beziehen sich streng genommen nur auf DAB und DVB-T, sie können aber auch für andere Rundfunksysteme in Band II angewendet werden, da die Verhältnisse dort nicht wesentlich anders sind. Die Werte für die Standardabweichung der Ortswahrscheinlichkeit für digitalen Rundfunk berücksichtigen die geringe Empfindlichkeit breitbandiger Digitalverfahren gegenüber frequenzselektivem Schwund und Mehrwegeausbreitung. Da es sich bei den hier betrachteten Digitalverfahren (DRM+ und HD-Radio) um schmalbandige Systeme (im Vergleich zu DAB oder DVB-T) handelt, wird ein Mittelwert aus den Werten für analogen und digitalen Rundfunk benutzt. (6,9 dB). Beim Empfangsfall „Mobiler Empfang“ wird ein Mittelwert der beiden angegebenen Fälle (vorstädtisch und städtisch) verwendet (6 dB). In allen Fällen ist noch ein Aufschlag von 2 dB für Man Made Noise zu berücksichtigen.

Stationärer Empfang (SE)

Beim stationären Empfang wird eine Dachantenne mit mittlerem Gewinn (5 dB über Dipol) in 10 m Höhe und eine Kabeldämpfung von 1 dB angesetzt. Die Ortswahrscheinlichkeit wird mit 50 % angenommen.

Portabler Empfang indoor (PEI)

Beim portablen Empfang indoor wird eine Stabantenne mit einem Gewinn von -2,2 dB über Dipol in 1,5 m Höhe angenommen. Die Ortswahrscheinlichkeit beträgt 70 %. Für die Gebäudedämpfung werden 9 dB mit einer Standardabweichung von 3 dB verwendet. Mit dieser Standardabweichung ergibt sich ein Gebäudekorrekturfaktor von 10,6 dB bei 70 % Wahrscheinlichkeit.

Portabler Empfang outdoor (PEO)

Hier wird eine Stabantenne mit einem Gewinn von -2,2 dB über Dipol in 1,5 m Höhe angenommen. Die Ortswahrscheinlichkeit beträgt 95 %.

Mobiler Empfang (ME)

Auch hier wird eine Stabantenne mit einem Gewinn von -2,2 dB über Dipol in 1,5 m Höhe angenommen. Es wird allerdings eine Ortswahrscheinlichkeit von 99 % gefordert, um Empfangsausfälle während der Fahrt gering zu halten.

Überblick

Tabelle 2.3 zeigt die Korrekturfaktoren für den digitalen Rundfunk im Überblick:

Tabelle 2.3: Empfangsszenarien für den digitalen Rundfunk

	SE	PEO	PEI	ME
Ortswahrscheinlichkeit	50 %	95 %	70 %	99 %
Ortskorrekturfaktor	0 dB	11,4 dB	3,7 dB	14,0 dB
Antennengewinn	5 dBd	-2,2 dBd	-2,2 dBd	-2,2 dBd
Kabelverlust	1 dB	0 dB	0 dB	0 dB
Antennenhöhe	10 m	1,5 m	1,5 m	1,5 m
Höhenkorrekturfaktor	0 dB	10 dB	10 dB	10 dB
Gebäudedämpfung	0 dB	0 dB	9 dB	0 dB
Standardabweichung	0 dB	0 dB	3 dB	0 dB
Korrektur Gebäude	0 dB	0 dB	10,6 dB	0 dB
Man Made Noise	2 dB	2 dB	2 dB	2 dB
Summe	-2 dB	25,6 dB	29,2 dB	28,2 dB

Tabelle 2.4 zeigt die entsprechenden Werte für analogen FM-Rundfunk. Da es sich bei den gegebenen Mindestnutzfeldstärken um bereits auf den stationären Empfang bezogene Werte handelt, ändern sich die Faktoren deutlich.

Tabelle 2.4: Empfangsszenarien für den analogen Rundfunk

	SE	PEO	PEI	ME
Ortswahrscheinlichkeit	50 %	95 %	70 %	99 %
Ortskorrekturfaktor	0 dB	13,71 dB	4,5 dB	14,0 dB
Antennengewinn	6 dBd	-2,2 dBd	-2,2 dBd	-2,2 dBd
Kabelverlust	1 dB	0 dB	0 dB	0 dB
Antennenhöhe	10 m	1,5 m	1,5 m	1,5 m
Höhenkorrekturfaktor	0 dB	10 dB	10 dB	10 dB
Gebäudedämpfung	0 dB	0 dB	9 dB	0 dB
Standardabweichung	0 dB	0 dB	3 dB	0 dB
Korrektur Gebäude	0 dB	0 dB	10,6 dB	0 dB
Man Made Noise	2 dB	2 dB	2 dB	2 dB
Summe (bez. auf stat.)	0 dB	31,9 dB	32,7 dB	32,2 dB

Diese Korrekturfaktoren müssen zur rein rauschbegrenzt ermittelten Mindestfeldstärke addiert werden, um die Mindestnutzfeldstärke für den jeweiligen Empfangsfall zu erhalten. Die Zeitwahrscheinlichkeit aller Werte beträgt 50 %. Die Differenz zu 99 % Zeitwahrscheinlichkeit ist im für die Versorgungsplanung interessierenden Radius (60 km) zu vernachlässigen.

2.6 Rautenplanung

Eine Sendefrequenz muss in bestimmten Abständen erneut vergeben werden, um eine effiziente Nutzung des Frequenzbereiches sicherzustellen. Ein zu enger Abstand bewirkt gegenseitige Störungen, ein zu großer verschwendet Kapazität. Aus diesen Anforderungen ergibt sich das Grundmuster der Netzplanung - gleichseitige Dreiecke. Auf den Ecken dieser Dreiecke befinden sich Sender der gleichen Frequenz. Die Seitenlänge dieser Dreiecke beträgt in Deutschland 240 km. Wenn man zwei dieser Dreiecke zusammen betrachtet, erhält man eine Raute, auf deren Ecken sich jeweils Sender der gleichen Frequenz befinden. Bei der Planung der Standorte müssen zusätzlich geographische Gesichtspunkte berücksichtigt werden, um taugliche Senderstandorte zu erhalten. Dieses Planungsverfahren wurde bei der RRC1984 in Genf festgelegt

2.7 Hexagonplanung

Für Gleichwellennetze wurde auf der WRC04 in Genf mit der Hexagonplanung ein ähnliches Verfahren festgelegt. Das zu versorgende Gebiet hat die Form eines Hexagons. Je nachdem welche Empfangsfeldstärken erforderlich sind, wie leistungsfähig die Sender sein sollen und welchen Senderabstand das verwendete Modulationsverfahren zulässt, wird die Anzahl der benötigten Sender bestimmt. Bei einem offenen Gleichwellennetz ist das Versorgungsgebiet rund 15 % größer als das Hexagon, auf dessen Eckpunkte die äußeren Sender stehen. Die Leistung der einzelnen Sender und ihre Antennenhöhe wird so bestimmt, dass es keine größeren Inhomogenitäten im Netz gibt und die erwünschte Versorgungswahrscheinlichkeit an jedem Punkt erreicht wird. Ziel der Planung ist eine möglichst gleichmäßige Feldstärkeverteilung. In kleinräumigen Gleichwellennetzen können die Sender mit geringer Leistung betrieben werden, was lokale Feldstärkespitzen um die Sender herum reduziert. Bei zu großen Inhomogenitäten im Gleichwellennetz kann es zu Eigeninterferenz kommen, wenn sich zwei weit entfernte Sender so überlagern, dass das OFDM-Guard Intervall nicht mehr ausreicht, um eine konstruktive Überlagerung zu gewährleisten. Die Senderabstände sollten nicht wesentlich größer gewählt werden, als der Laufweg der Wellen während des Guard-Intervalls beträgt. ($d = c \cdot T_g$, d Abstand, T_g Dauer des Guard-Intervalls). Die Feldstärkeanteile von den einzelnen Sendern sind jeweils logarithmisch normalverteilt. Diese werden mit Hilfe des k-LNM-Verfahren addiert, so dass man jeweils Medianwert und Standardabweichung für jeden Empfangsort bestimmen kann. Abbildung 2.8 zeigt ein Beispiel eines offenen Gleichwellennetzes mit sieben Sendern. In diesem Fall deckt der mittlere Sender mit erhöhter Leistung ein größeres Gebiet ab.

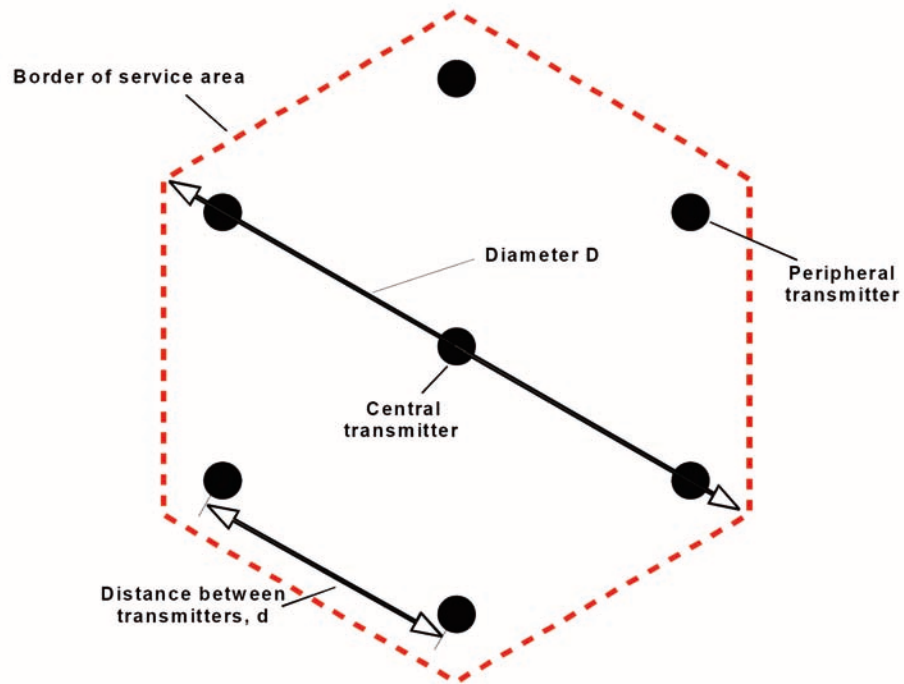


Abbildung 2.8: Offenes Gleichwellennetz mit sieben Sendern [8]

Abbildung 2.9 zeigt ein offenes Gleichwellennetz aus drei Sendern. Diese Netzform eignet sich für kleinere zu versorgende Gebiete, falls es beispielsweise nicht möglich ist, einen zentralen Sender größerer Leistung zu platzieren.

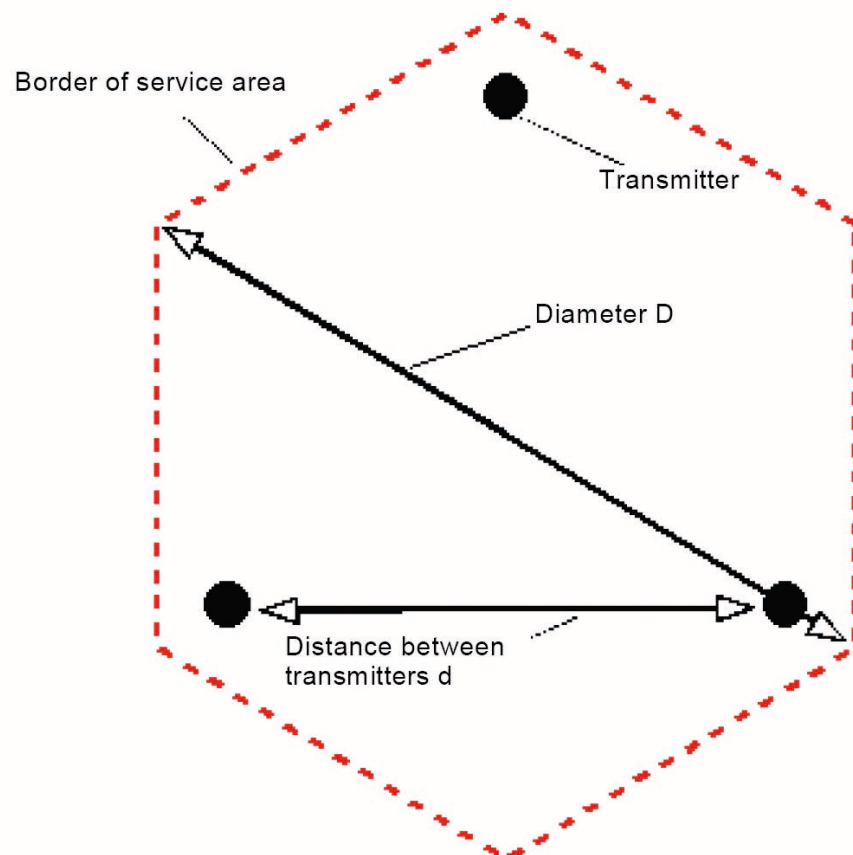


Abbildung 2.9: Offenes Gleichwellennetz mit drei Sendern [8]

Abbildung 2.10 zeigt ein geschlossenes Gleichwellennetz. Bei diesem Netztyp befinden sich die Sender an der Peripherie auf den Ecken des Hexagons. Sie sind mit Richtantennen ausgestattet, die nach innen strahlen. Der Aufwand wird dadurch höher, allerdings kann die selbe Frequenz in kürzerer Distanz erneut genutzt werden, da die nach außen abgegebene Strahlung, die zu Interferenzen führen kann, wesentlich geringer ist.

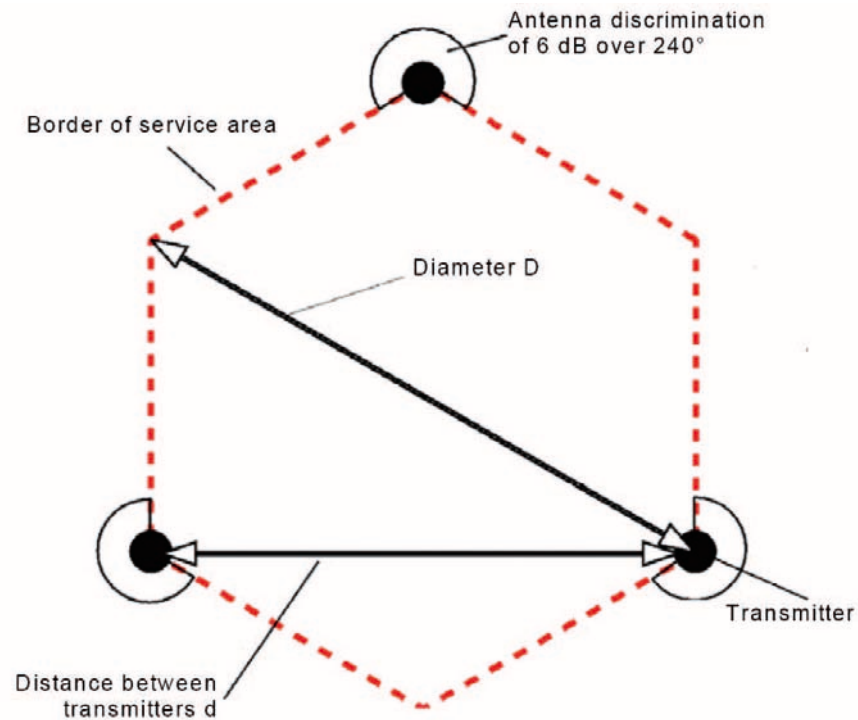


Abbildung 2.10: Geschlossenes Gleichwellennetz mit drei Sendern [8]

Kapitel 3

Grundlagen der Verträglichkeit

Die Verträglichkeit ist ein für die Rundfunkplanung wichtiger Parameter eines Übertragungssystems. Man unterscheidet zwei verschiedene Arten der Verträglichkeit, zum einen die In-Band-Verträglichkeit und zum anderen die Außerband-Verträglichkeit. Die In-Band-Verträglichkeit ist die Verträglichkeit zwischen zwei Kanälen des selben Dienstes. Sie bestimmt unter anderem das mögliche Kanalaraster und damit die Anzahl der möglichen Kanäle. Die Außerband-Verträglichkeit beschreibt die Verträglichkeit mit den frequenzmäßig benachbarten Diensten. Beim Band II handelt es sich hier um den BOS-Funk sowie den Flugfunk. Eine schlechte Verträglichkeit zu diesen Diensten erfordert frequenzmäßig große Sicherheitsabstände und bedingt Sendeleistungseinschränkungen, um Störungen sicher zu verhindern. Ein verträgliches System erlaubt hohe Sendeleistungen und geringe Kanalabstände. Dadurch nutzt ein verträgliches System den zur Verfügung stehenden Frequenzbereich besser aus. Der Schutzabstand ist das für die Netzplanung relevante Maß für die Verträglichkeit in einem Rundfunksystem.

3.1 Der Schutzabstand

3.1.1 Definition

Der Schutzabstand ist eine Empfängerkenngroße. Er erlaubt es, in der Frequenzplanung auf einzelne SNR-Messungen zu verzichten und Störeinflüsse in Abhängigkeit von ihrem Frequenzabstand zu gewichten. Der Schutzabstand gibt an, um wieviel ein störender Sender schwächer als der Nutzsendersender sein muss, um diesen nicht über ein vorher festgelegtes Maß zu stören. Der Schutzabstand wird in Dezibel gemessen. Ein möglichst geringer erforderlicher Schutzabstand erhöht die Frequenzökonomie. Der Schutzabstand im Gleichkanal beeinflusst, in welcher Entfernung die selbe Frequenz wieder verwendet werden kann. Der Schutzabstand im Nachbarkanal beeinflusst bei gegebener Positionierung der beiden Sender die maximal möglichen Sendeleistungen. Der Schutzabstand selbst bezieht sich nur auf das Verhältnis zweier Sender, man kann allerdings durch die Einführung eines Störbeitrages die Anteile vieler Störer aufsummieren und so eine ganzheitliche Betrachtung anstellen. Diese Aufsummierung kann durch verschiedene Verfahren erfolgen (Leistungsaddition, Addition der dB-Werte, größter Störer). Dies wird zum Beispiel in den gängigen Netzplanungs-Programmen so gehandhabt. Bild 3.1 zeigt die Normschutzabstandskurve für UKW-Rundfunk aus [5]. Diese Kurven sind Mittelwerte aus

zahlreichen Messungen mit unterschiedlichen Empfängern. Messungen an modernen Empfängern haben gezeigt, dass diese mehrere Jahrzehnte alten Kurven wesentlich unterschritten werden. Im Diagramm sind die Schutzabstände für Mono (M) und Stereo-Empfang (S) eingetragen. Die gestrichelten Kurven (S1, M1) beziehen sich auf Dauerstörungen, die durchgehenden (S2, M2) auf troposphärische Störungen.

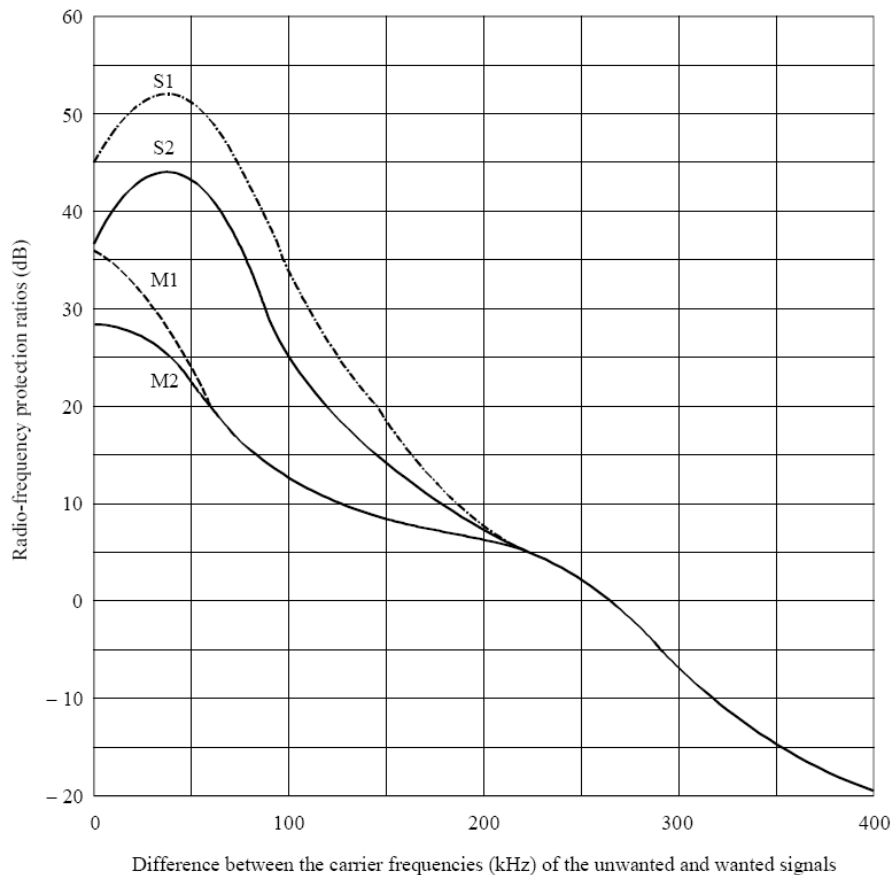


Abbildung 3.1: Genormte Schutzabstandskurven [5]

3.1.2 Messverfahren

Bei der Schutzabstandsmessung wird die Leistung des Störers so lange erhöht, bis das Audio-SNR des Testempfängers um 6 dB abgefallen ist. Für einen Empfang in HiFi-Qualität wird ein benötigtes NF-SNR von 50 dB angesetzt. Bei der Messung wird der Nutzsignalpegel so eingestellt, dass der Empfänger ein SNR von 56 dB erreicht. Wenn dieses unter Einfluss des Störers auf 50 dB zurückgegangen ist, ist die maximal tolerable Störung erreicht. Dieses Messverfahren kann nur mit hochwertigen Empfängern umgesetzt werden. Viele der heute verbreiteten FM-Empfänger (beispielsweise in Mobiltelefonen oder MP3-Playern integrierte Empfänger, Küchenradio) können kein SNR von auch nur 50 dB erreichen. Zusätzlich kann die Empfangsqualität statt durch das SNR über den SINAD (Signal to Noise and Distortion) bestimmen. Dieser arbeitet mit einem modulierten Sinus-Ton und bewertet die Verzerrungen dieses Tons und das Rauschen. Besonders im Feld ist diese Messung einfach und automatisiert durchzuführen.

Versuchsaufbau

Das Messverfahren zur Ermittlung des Schutzabstandes ist in der Recommendation ITU-R B.641 [11] festgelegt. Dadurch ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse auch bei verschiedenen Messungen gegeben. Abbildung 3.2 zeigt den in der Norm festgelegten Messaufbau.

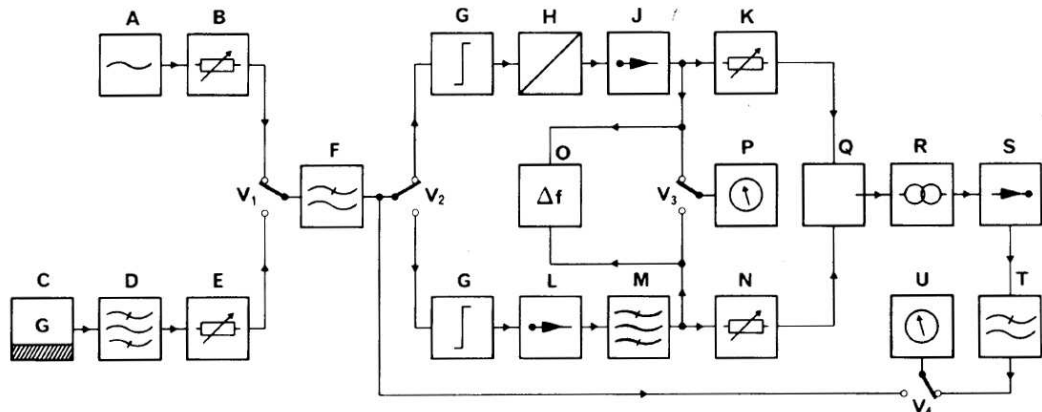


FIGURE 1 – Diagram of the measuring apparatus

- | | | |
|--|---|---|
| <p>A: 500 Hz AF generator (for transmitter line-up procedure)</p> <p>B: calibrated AF attenuator</p> <p>C: noise generator</p> <p>D: noise shaping filter complying with Recommendation 559</p> <p>E: calibrated AF attenuator</p> <p>F: 15 kHz low-pass filter</p> <p>G: pre-emphasis network</p> <p>H: stereo coder</p> <p>J: signal generator (wanted signal)</p> | <p>K: calibrated RF attenuator</p> <p>L: signal generator (unwanted signal)</p> <p>M: RF band-pass filter (tuneable)</p> <p>N: calibrated RF attenuator</p> <p>O: frequency-meter for measuring the frequency difference between signal generators J and L</p> <p>P: frequency-deviation meter</p> <p>Q: coupling device</p> <p>R: matching network</p> <p>S: receiver under test</p> | <p>T: 15 kHz low-pass filter</p> <p>U: psophometer (switchable weighting network)</p> <p>V₁: selector switch for the modulation</p> <p>V₂: selector switch for modulating one or other of the signal generators</p> <p>V₃: selector switch for the frequency-deviation meter (J and L generators)</p> <p>V₄: selector switch for measuring the AF signal levels</p> |
|--|---|---|

Abbildung 3.2: Messaufbau nach [11]

Da diese Darstellung wenig übersichtlich ist, zeigt Abbildung 3.3 den im Labor der FH Kaiserslautern realisierten Aufbau. Mit diesem Aufbau wurden alle Messungen zur Beeinflussung von FM durch FM durchgeführt. Der obere Pfad in diesem Aufbau entspricht den Elementen A, B, G, H, J, K in Abbildung 3.2. Hier wird das gewollte Signal erzeugt, das außer zum Einpegeln nur aus einem unmodulierten Träger besteht. Der untere Signalweg entspricht den Bauteilen A, B, C, D, E, F, G, L, M, N. Hier wird das störende Signal erzeugt. Es handelt sich dabei um einen rauschmodulierten Träger. Der Auswertepfad in der Mitte entspricht Q, R, S, T, U. In diesem Signalweg werden die beiden HF-Signale zusammengeführt und dem Empfänger zugeführt. In Abbildung 3.3 nicht dargestellt, aber im Einsatz ist das Element T, ein Tiefpass mit 15 kHz Eckfrequenz zur Unterdrückung von Resten des Pilottons, die vor allem bei einfach aufgebauten Empfängern noch in nennenswerter Amplitude am Ausgang messbar sind. Ebenfalls im Messaufbau nicht dargestellt, ist die Messtechnik zum Einpegeln (Hubmesser, P). Das Messgerät für Frequenzdifferenzen O ist aufgrund der hohen Genauigkeit der Frequenzanzeige in den Signalgeneratoren entfallen, das Bandpassfilter M war aufgrund des sehr sauberen Ausgangssignals des Signalgenerators ebenfalls nicht erforderlich.

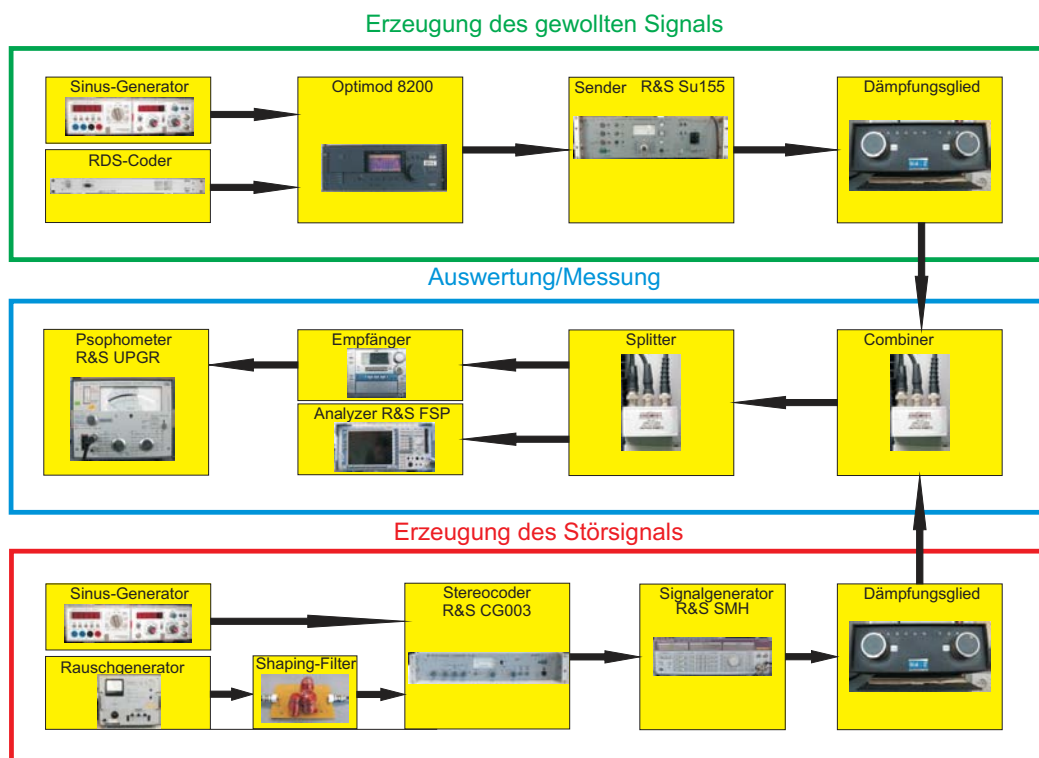


Abbildung 3.3: Realisierter Messaufbau

Versuchsdurchführung

Die Messung beginnt mit der Einstellung des Nutzsignalpfades. Anschließend wird der Störer eingepegelt und die eigentliche Messung kann beginnen.

Das Nutzsignal wird eingepegelt, indem der Sender mit einem 500 Hz-Sinus moduliert wird. Der Hub des HF-Signals (erzeugt durch 500 Hz-Ton und Pilotton) muss genau 75 kHz betragen. Am Psophometer (Bewertungsnetzwerke ausgeschaltet) wird der NF-Ausgangspegel des Empfängers abgelesen. Dies ist der Referenzpegel. Dann wird der 500 Hz-Ton abgeschaltet und das Bewertungsfilter aktiviert. Über den Abschwächer K wird der HF-Pegel des Nutzsignals so eingestellt, dass das Psophometer möglichst 56 dB weniger als den Referenzpegel anzeigt. Dadurch wird verhindert, dass der Empfänger übersteuert wird. Damit ist die Einstellung des Nutzsignals abgeschlossen.

Das Störsignal wird im zweiten Schritt eingepegelt. Zuerst wird der Signalgenerator mit einem 500 Hz-Ton so moduliert, dass der Frequenzhub 32 kHz beträgt. Mittels des Psophometers wird der ungewichtete NF-Pegel des Sinussignals gemessen. Nun wird der Sinus-Generator durch einen Rauschgenerator mit angeschlossenem Filter ersetzt. Der Pegel des Rauschgenerators wird so eingestellt, dass der gleiche quasi-peak-Pegel (Spitzenwertmessung) wie bei dem Sinussignal gemessen wird. Der Rauschgenerator wird nun über eine Preemphase an den Signalgenerator angeschlossen. Dieses Signal entspricht von der Störwirkung her einem durchschnittlichen Sendesignal - allerdings ohne Kompression des NF-Bandes. Da heute fast alle Radiosender mit Audio-Kompressoren arbeiten, entsprechen die Messwerte nicht mehr vollständig der Realität. Die Vergleichbarkeit der Messungen untereinander und auch mit früheren Messungen bleibt davon aber unberührt.

Nachdem alle Signalpfade eingepegelt sind, kann die eigentliche Messung beginnen. Dazu wird der Störsignalgenerator auf den zu messenden Frequenzversatz vom Nutzsignalsender eingestellt. Der Pegel des Störsignales wird solange erhöht, bis das Psophometer 6 dB mehr (50 dB unter Referenzton) anzeigt. Damit ist die Qualitätsschwelle von 50 dB SNR erreicht. Die Pegeldifferenz zwischen Nutz- und Störsignal ist der Schutzabstand am gewählten Messpunkt. Um ein aussagekräftiges Diagramm zu erhalten, muss an mehreren Punkten gemessen werden. Abbildung 3.1 zeigt das Ergebnis einer solchen Messung.

Das Messverfahren ist in dieser Form unverändert nur für FM-modulierte Störer anwendbar. Allerdings lassen sich mit geringen Modifikationen auch vergleichbare Messwerte für andere Modulationsarten bestimmen. Da die Störwirkung der betrachteten digitalen Verfahren unabhängig von den eingespeisten NF-Signalen ist, ergibt sich dadurch automatisch ein untereinander vergleichbares Störsignal.

3.2 Normen

Die Schutzabstandskurven, die zu Planungszwecken für Rundfunksysteme verwendet werden, sind in der Recommendation ITU-R BS.412-9 [5] tabelliert. Hier handelt es sich um Werte, die eine Vielzahl von Empfängern abdecken. Hochwertige aktuelle Empfänger sind meist besser als diese Werte, kleine billige Empfänger schlechter. Diese Kurve wurde für Stereoempfang in den 70er Jahren als Durchschnitt damals verfügbarer Heimempfänger und Autoradios ermittelt und ist bis heute gültig. Abbildung 3.1 zeigt die entsprechenden Kurven für Mono- und Stereo-Empfang. Die durchgezogenen Kurven beziehen sich jeweils auf troposphärische Störungen, die gestrichelten auf Dauerstörungen.

Kapitel 4

Weitere Einflussgrößen auf die Verträglichkeit von Hörfunksystemen im Band II

In Kapitel 3 wurde der Schutzabstand als wichtigstes Maß für die Verträglichkeit eines Systems vorgestellt. In diesem Kapitel werden nun die Modulationsverfahren und die sich daraus ergebenden Spektren der Systeme betrachtet. Des weiteren werden die planungsmäßigen Besonderheiten von DRM+ und HD-Radio dargestellt.

4.1 FM-Rundfunk

4.1.1 Modulationsverfahren

Frequenzmodulation

Der Rundfunk im Band II wird in Breitband-Frequenzmodulation ausgestrahlt. Bei diesem Modulationsverfahren bleibt die Hüllkurve des modulierten Signals konstant und es wird lediglich die Frequenz verändert. Dies geschieht entsprechend folgendem Zusammenhang:

$$s(t) = \sin(\omega_0 t + M_f \int m(t) dt) . \quad (4.1)$$

Hierbei ist ω_0 die Kreisfrequenz des Trägers, M_f der Modulationsgrad, $m(t)$ das zu modulierende Nachrichtensignal. Die Nullphase wird mit Null angenommen. Die momentane Frequenz ergibt sich damit zu:

$$\omega(t) = \omega_0 + M_f m(t) . \quad (4.2)$$

Wichtigste Kenngröße der Frequenzmodulation ist der Frequenzhub. Er beschreibt die maximale Auslenkung des Trägers. Dieser wird durch M_f festgelegt. Im FM-Rundfunk ist der maximale Frequenzhub auf 75 kHz begrenzt. Der Frequenzhub hat einen großen Einfluss auf die Bandbreite des FM-Signals. Theoretisch ist das aus unendlich vielen Besselfunktionen zusammengesetzte FM-Spektrum unendlich breit. In der Praxis begrenzt man es durch Weglassen aller Harmonischen, deren Amplitude unter 10% der unmodulierten Trägeramplitude liegen. Dadurch ergibt sich die Bandbreite nach der Carson-Formel zu:

$$B_{FM} = 2(\Delta f + f_s) . \quad (4.3)$$

Hier ist Δf der Frequenzhub und f_s die höchste im Signal vorkommende Frequenz. Die höchste im UKW-Band zu übertragende Frequenz liegt bei rund 57 kHz (RDS-Träger). Daraus ergibt sich eine nötige Bandbreite von 264 kHz.

Preemphase

Zur Verbesserung der Übertragungsqualität vor allem hoher Frequenzen wird im FM-Rundfunk eine Höhenanhebung (Preemphase) im Sender und eine entsprechende Absenkung im Empfänger (Deemphase) benutzt. Diese Verbesserung ist erforderlich, da die Amplituden des Audio-Signals bei hohen Frequenzen gering sind und deshalb Störungen besonders gut wahrgenommen werden. Die Preemphase wird durch einen Hochpass mit einer Zeitkonstante von $50 \mu s$ entsprechend einer Eckfrequenz von 3,2 kHz realisiert. Dadurch verbessert sich das SNR um rund 12 dB. Dieses Verfahren ist ausgelegt auf Signale mit einem geringen hochfrequenten Anteil. Bei Signalen mit vielen höherfrequenten Anteilen kann leicht eine Übersteuerung des Senders und damit eine Überschreitung des maximal zulässigen Frequenzhubs auftreten. Heute bei fast allen Rundfunkstationen im Einsatz befindliche Signalprozessoren verhindern diese Übersteuerung wirksam [4].

Multiplexverfahren

Um auf einem Träger mehr als einen NF-Kanal, zum Beispiel ein Stereo-Signal, übertragen zu können, wird im Basisband ein Multiplex gebildet. Bei einem Stereo-Rundfunksender sind die unteren 15 kHz des Multiplexes mit dem Summensignal L+R belegt. Dies stellt sicher, dass auch Mono-Empfänger weiter funktionieren und bei schwierigen Signalverhältnissen ein Rückfall auf Mono-Empfang möglich ist. Bei 19 kHz folgt der Pilotton. Er signalisiert dem Empfänger, dass es sich um eine Stereo-Sendung handelt. Ebenso basieren alle weiteren zur Demodulation erforderlichen Frequenzen (38 kHz, 57 kHz) auf diesem Pilotton. Das Differenzsignal L-R wird mit Hilfe einer Zweiseitenband-Amplitudenmodulation auf einen unterdrückten Träger bei 38 kHz moduliert. Das Radio Daten System (RDS) befindet sich im Bereich von 57 kHz ($3 * 19$ kHz). Es sind noch weitere Dienste im Multiplex denkbar, allerdings nimmt die benutzte HF-Bandbreite mit der höchsten Frequenz im Multiplex linear zu.

In Deutschland ist die über eine Minute gemittelte Leistung des Multiplexes auf 0 dB beschränkt. 0 dB bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Leistung des Multiplexsignals äquivalent zu der eines Sinussignals, das einen Hub von 19 kHz erzeugt, ist. Mit der heute allgegenwärtigen Signalkompression ist es eine Gratwanderung, ein möglichst lautes Signal mit noch akzeptabler Multiplexleistung zu erzeugen. Dazu kommt, dass dieser Wert messtechnisch schwierig zu ermitteln ist. Er lässt sich nicht so günstig begrenzen wie der Maximalhub.

Abbildung 4.1 zeigt das Spektrum des Multiplexsignals.

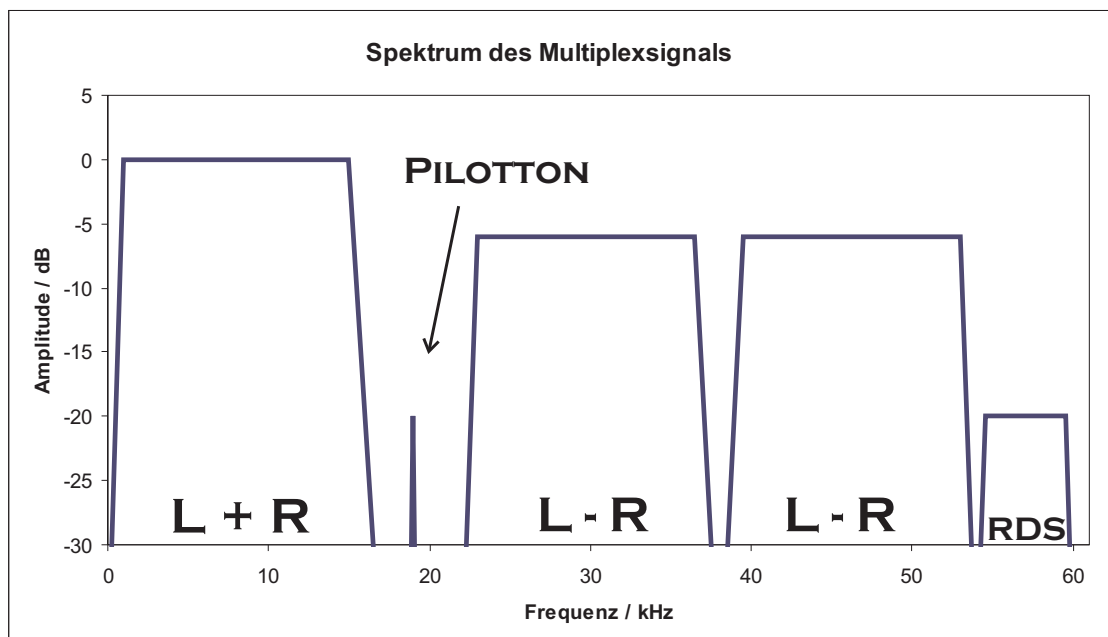


Abbildung 4.1: Spektrum des FM-Multiplexes

4.1.2 Spektrumsmaske

Jeder FM-Sender muss eine definierte Spektrumsmaske einhalten. Dies geschieht zum Schutz benachbarter Sender vor Nebenaussendungen. Abbildung 4.2 zeigt die in Europa gültige ETSI-Spektrumsmaske und die in den USA gültige FCC-Spektrumsmaske. Es ist deutlich zu erkennen, dass die US-Maske wesentlich weniger restriktiv ist und größere Freiheiten lässt. Die FCC-Maske resultiert auch aus dem dort breiteren Kanalraster (200 kHz gegenüber 100 kHz in Region 1), das keine so scharfe Begrenzung erfordert. Sie erlaubt nennenswerte Aussendungen auch auf den Nachbarkanälen, welche durch die ETSI-Maske mit geforderten 85 dB Absenkung wirksam unterdrückt werden. Alle dB-Angaben in den Masken beziehen sich auf die Leistung des unmodulierten Trägers entsprechend 0 dBc.

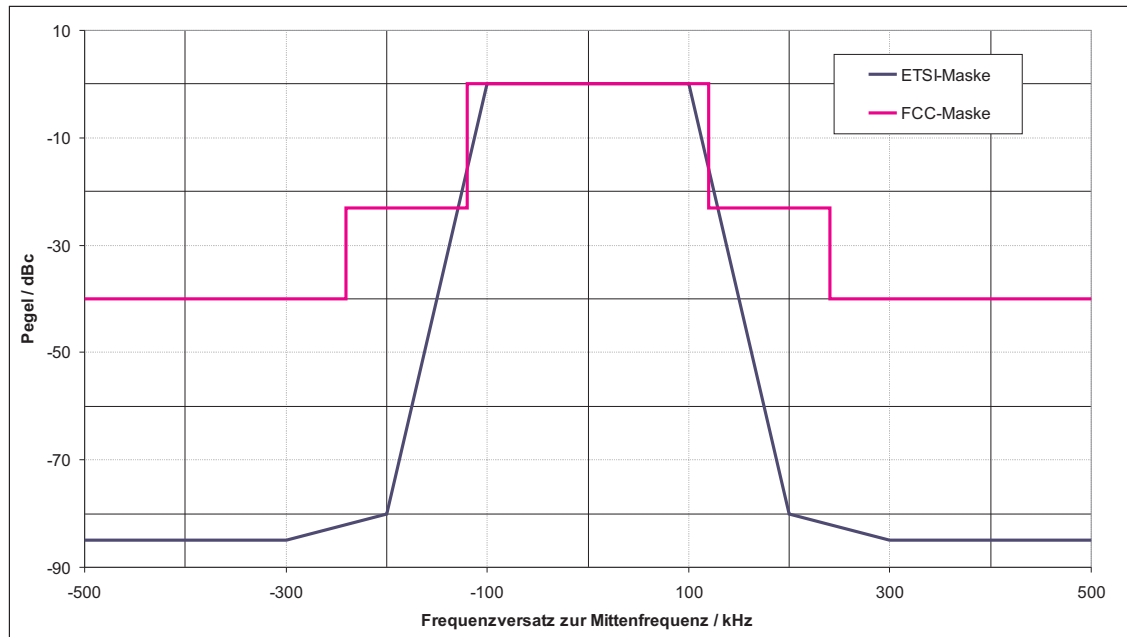


Abbildung 4.2: Spektrumsmasken für FM-Sender

4.1.3 Spektrum eines FM-Senders

Abbildung 4.3 zeigt das Spektrum eines unmodulierten FM-Senders mit Pilotton sowie RDS. Der Multiplex auf Basisband-Ebene wurde mit einem Audioprozessor vom Typ Optimod 8200 der Firma Orban und einem RDS-Coder gebildet und mithilfe eines Universal-Signalgenerators SMH der Firma Rohde&Schwarz auf eine Frequenz von 87,6 MHz hochgemischt.

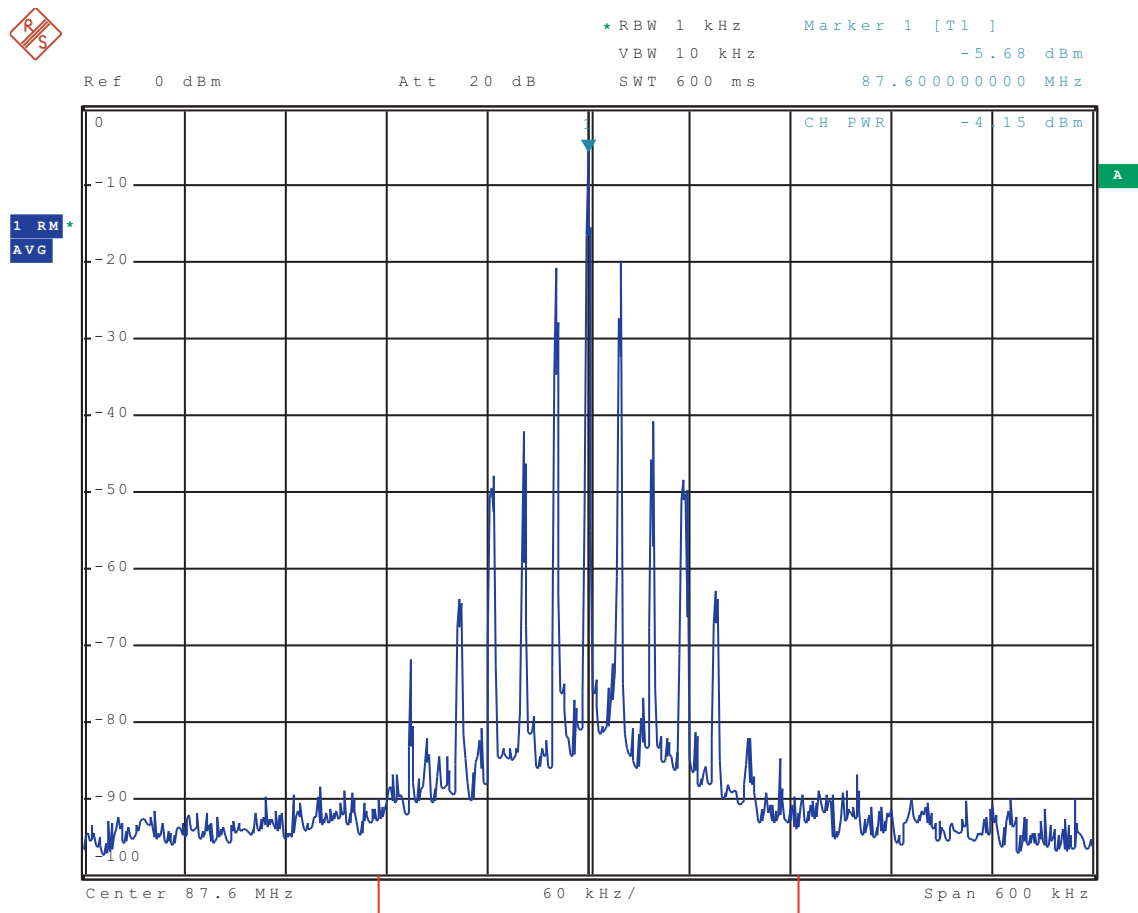


Abbildung 4.3: Spektrum eines unmodulierten FM-Senders

Abbildung 4.4 zeigt das Spektrum eines modulierten FM-Senders mit Kompression und RDS im Stereo-Betrieb. Die Dreiecksform ist charakteristisch und bei fast jedem realen FM-Sender zu finden.

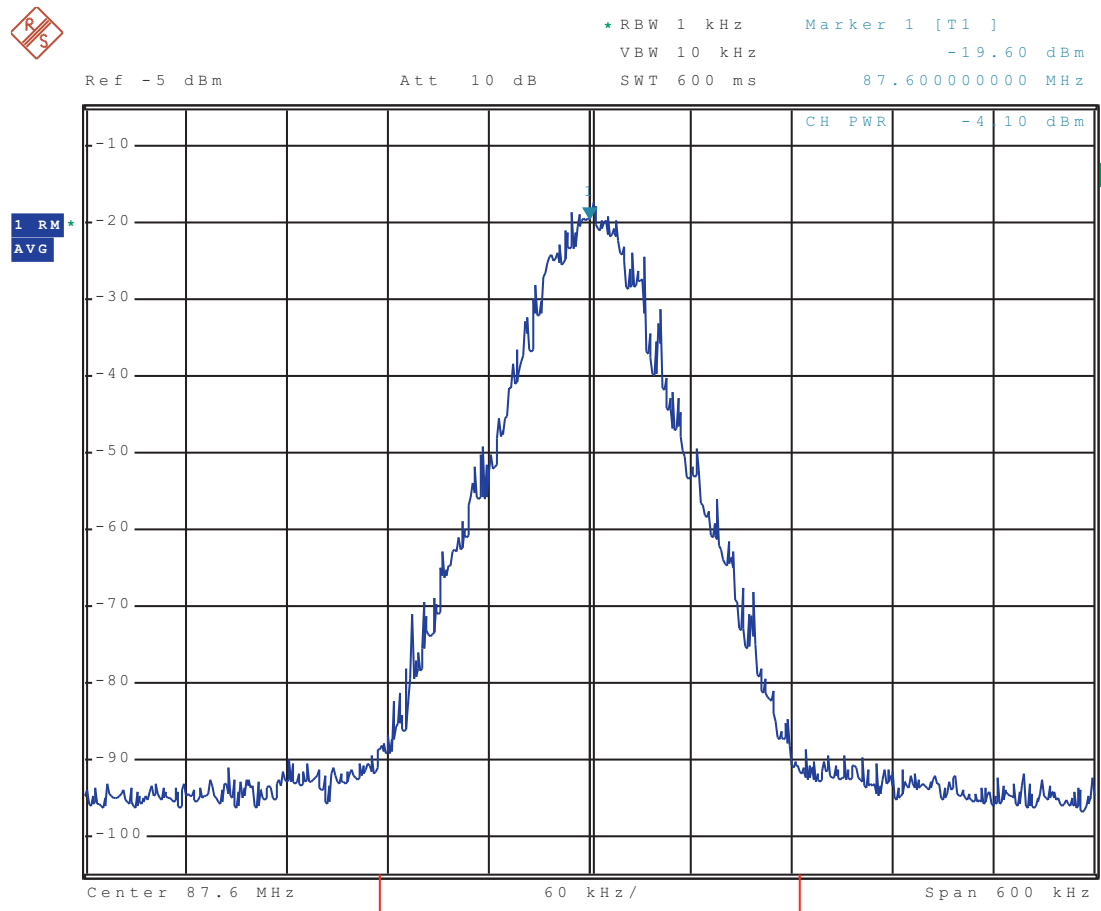


Abbildung 4.4: Spektrum eines modulierten FM-Senders

4.2 DRM+

4.2.1 Technische Grundlagen

Modulationsverfahren

Bei DRM+ handelt es sich um ein auf OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) basierendes Verfahren. Das bedeutet, dass das Sendesignal aus mehreren orthogonalen Trägern besteht. Die Orthogonalität ist Voraussetzung, um die einzelnen Träger effizient und sicher wiedergewinnen zu können. Mathematisch ist Orthogonalität zweier Träger definiert durch:

$$\int_0^T e^{j2\pi f_v t} \cdot e^{j2\pi f_w t} dt = \begin{cases} const & v = w \\ 0 & sonst \end{cases} \quad (4.4)$$

Die Modulation erfolgt mittels Inverser Diskreter Fourier-Transformation (IDFT), die sich effizient durch den Fast Fourier Transform-Algorithmus (FFT) realisieren lässt:

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi kt/T}, 0 \leq t \leq T. \quad (4.5)$$

Dieses Verfahren erzeugt N zueinander orthogonale Unterträger, wobei X_k das Datensymbol des k-ten Unterträgers repräsentiert. $x(t)$ kann über einen A/D-Wandler

ausgegeben und in den benötigten Frequenzbereich gemischt werden. Der Empfang geschieht genau umgekehrt, nur das hier direkt mit der FFT gearbeitet werden kann. Der Frequenzabstand zweier Träger ist gegeben durch den Kehrwert der Symboldauer T . Die Symboldauer verlängert sich um das Guard-Intervall T_g . Während des Guard-Intervalls wird das Symbol periodisch fortgesetzt. Diese zusätzliche Übertragungszeit reduziert zwar die mögliche Datenrate, erhöht jedoch die Immunität des Signals gegen Mehrwegeausbreitung und ermöglicht den Aufbau von Gleichwellennetzen.

Die einzelnen Unterträger wiederum können mit einem komplexwertigen Datensignal moduliert werden. Bei DRM+ ist eine Modulation mit 4-QAM und 16-QAM vorgesehen. Das resultierende Signal ist sowohl Phasen- als auch Amplitudenmoduliert. Dies bedeutet, dass Klasse C-Verstärker, die für FM eingesetzt werden, bei OFDM-Signalen nicht verwendbar sind. Für kleine Leistungen ist ein Linearverstärker günstig einsetzbar, für größere Anlagen sind aus Gründen des Energieverbrauchs andere Konzepte (Envelope Elimination and Restoration, EER) praktikabler. Ein Problem von DRM+ ist der hohe Crestfaktor (Verhältnis der Mittleren Signalleistung zur Spitzenleistung), der sehr hohe Leistungsspitzen von bis zu 10 dB über der mittleren Leistung liefert. Theoretisch liegt dieser Wert bei $10 \log N$, damit wäre der Crestfaktor bei DRM+ 23 dB. Da die Spitzen hoher Leistung nur sehr selten auftreten [6], ist der gemessene Crestfaktor niedriger. So treten Spitzen von 14 dB nur alle 2,5 Stunden auf (normalverteiltes Signal vorausgesetzt). Diese hohen Spitzen verlangen lineare Verstärker. Damit das Signal mit seinen Spitzen vollständig im linearen Teil der Verstärkerkennlinie liegt, muss der Verstärker deutlich geringer angesteuert werden als es beispielsweise bei FM möglich wäre. Das Verhältnis der möglichen Eingangsleistung zur genutzten Eingangsleistung wird als Input-Backoff bezeichnet. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die mögliche Eingangsleistung anzugeben. Bei höheren Anforderungen an die Linearität wird meist der 1 dB-Kompressionspunkt gewählt. An diesen Punkt ist die Verstärkerkennlinie um 1 dB von einer hypothetischen linearen Verstärkerkennlinie abgewichen.

Tabelle 4.1 zeigt die Modulationsparameter im Überblick.

Tabelle 4.1: Modulationsparameter von DRM+

Modulation	OFDM
Bandbreite	96 kHz
Subträgerabstand	444 Hz
Subträgeranzahl	213
Subträgermodulation	4-, 16-QAM
Datenrate	35 ... 185 kBit/s

Mehrwertdienste

Über DRM+ können neben Audio-Signalen auch digitale Mehrwertdienste transportiert werden. Um den FM-Rundfunk ablösen zu können, ist vor allem die Unterstützung der heute schon stark genutzten Dienste wie RDS (mit TMC - Traffic Message Channel) sowie die Verkehrsfunk-Kennung wichtig. Diese Dienste sind problemlos zu übertragen, jedoch noch nicht standardisiert. Das Fraunhofer IIS (Institut für integrierte Schaltungen, Erlangen) hat zwei zusätzliche Mehrwertdienste entwickelt.

Beim ersten handelt es sich um den News Service Journaline, mit dem aktuelle Nachrichten in Textform zum Empfänger übertragen werden. Die dazu benötigte Bandbreite ist so gering, dass dieser Dienst selbst bei DRM auf Kurz-, Mittel- und Langwelle eingesetzt werden kann. Beim zweiten Dienst handelt es sich um MPEG Surround, mit dessen Hilfe man Mehrkanal-Audio mit geringer Bandbreite übertragen kann. Dabei wird aus dem Surround-Audiostrom ein Stereo-Downmix und zusätzlich so genannte Spatial Cues erstellt. Ein Stereo-Empfänger kann den Downmix einfach wiedergeben, ein Surround-fähiger Empfänger kann mit Hilfe der Spatial Cues (Daten mit niedriger Bitrate) das Surround-Signal wieder herstellen. Zusätzlich ist bei DRM+ jeder Dienst, der Daten von einem Punkt in eine Fläche überträgt und die verfügbare Bandbreite nicht überschreitet, möglich. Mit Hilfe des RSCI-Interfaces ist eine einfache Einbindung solcher Dienste in den Empfänger realisierbar.

Sendermaske

Um im Band II rasterkompatibel zu sein, muss der DRM+-Sender auf jeden Fall die FM-Spektrumsmaske einhalten. Wenn man berücksichtigt, dass der DRM+-Sender seine Leistung gleichförmig auf den 96 kHz breiten Kanal verteilt, kann die Maske im mittleren Bereich um rund 20 dB abgesenkt werden (auf eine Messbandbreite von 1 kHz bezogen). Abbildung 4.5 zeigt die DRM+-Spektrumsmaske im Vergleich mit der FM-Maske. Diese Maske wurde im Rahmen einer Diplomarbeit an der FH Kaiserslautern [15] für ein 16-QAM moduliertes DRM+-Signal definiert. Diese Maske ist nicht verpflichtend, sie wird im Rahmen der Tests hauptsächlich als Anhaltspunkt genutzt. Die Maske fordert einen Schulterabstand von 21 dB, dieser wird vom Versuchsaufbau deutlich übertroffen. Die Verbreiterung der Maske bis zur FM-Maske lässt Raum für Mischprodukte durch nichtoptimale Signalerzeugung und Verstärkung.

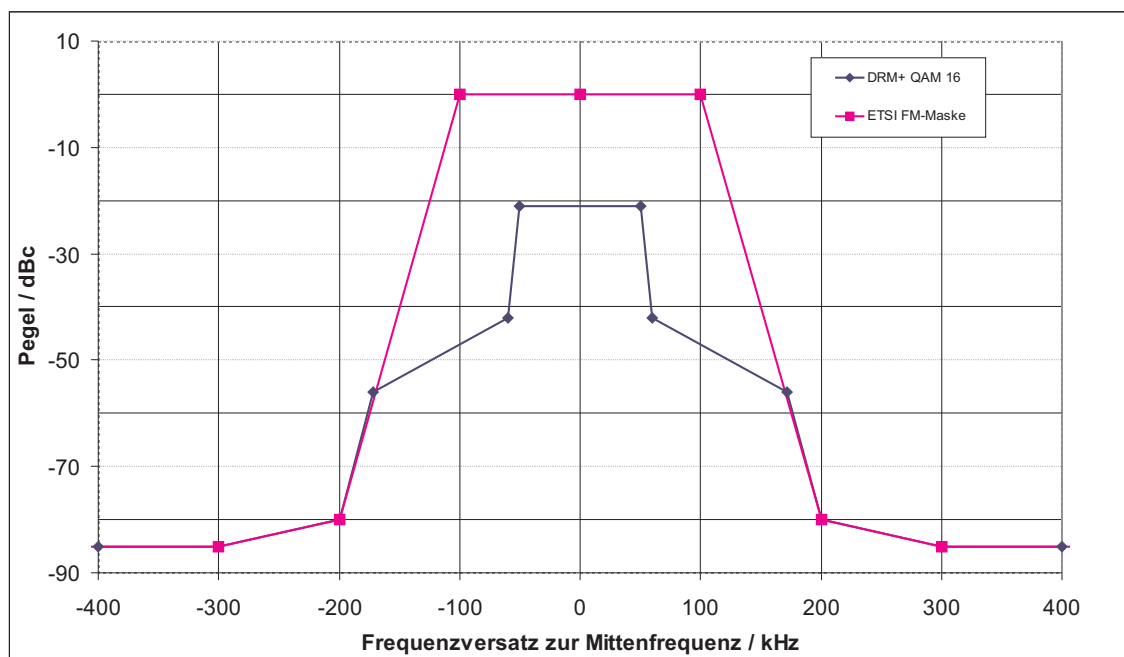


Abbildung 4.5: Sendermaske für DRM+ und FM im Vergleich

Spektrum eines DRM+ -Senders

Abbildung 4.6 zeigt das Spektrum des im Feldversuch eingesetzten DRM+-Senders bei einer Ausgangsleistung von 35 W. Der Schulterabstand beträgt rund 30 dB, aber die Intermodulationsprodukte aus den Verstärkern sind deutlich zu erkennen. Die Nebenaussendungen werden durch einen Bandpass am Ausgang (3dB-Bandbreite 360 kHz) deutlich abgesenkt.

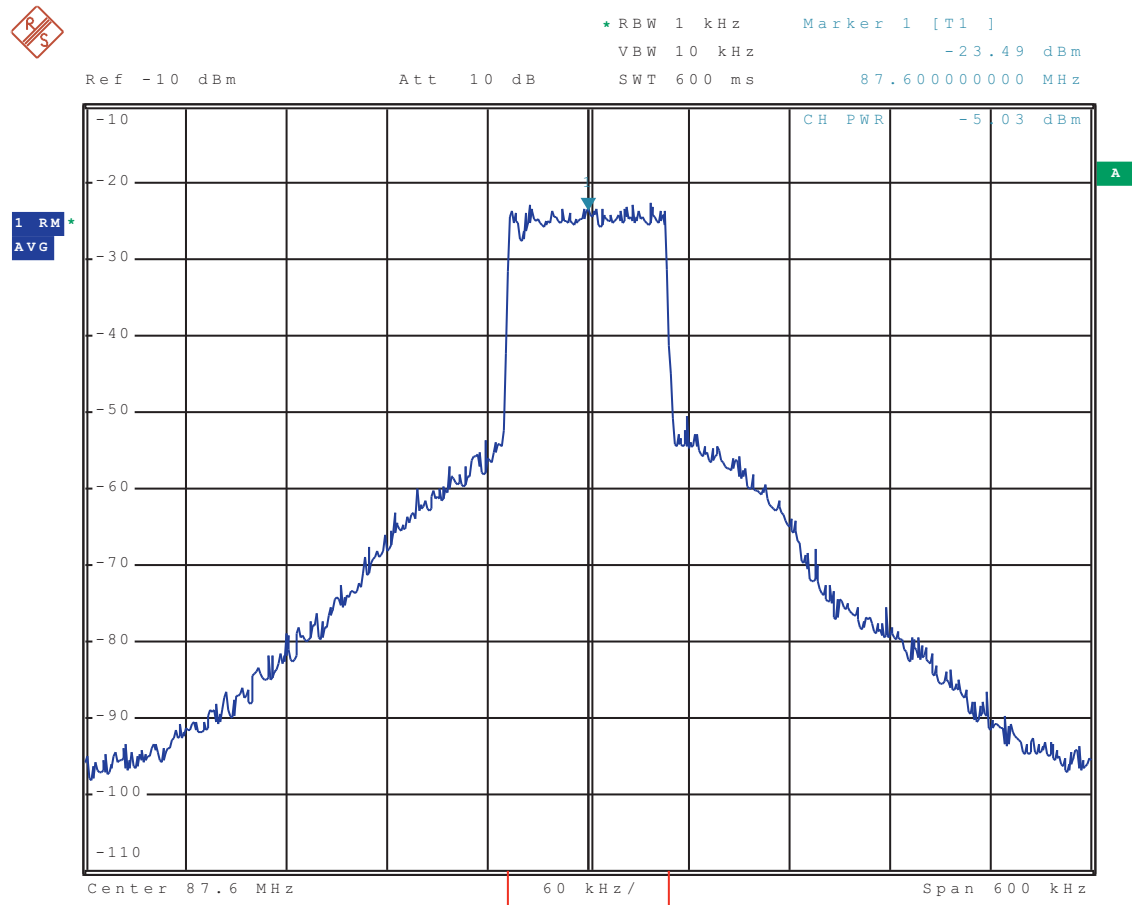


Abbildung 4.6: Spektrum des DRM+-Senders

Senderaufbau

Abbildung 4.7 zeigt den prinzipiellen Aufbau zur Erzeugung eines DRM+-Signals im Basisband. Diese dargestellten Aufgaben werden im Versuchsaufbau der FH Kaiserslautern durch die Software Spark+ (<http://www.drm-sender.de>) wahrgenommen. Zuerst wird das Eingangs-Audiosignal durch einen Quellcodierer (in diesem Fall MPEG4-AAC) datenreduziert. Über einen Kanalcodierer, der Fehlerkorrektur-Informationen erzeugt, wird der Datenstrom einem Mapper zugeführt, der die endgültige Struktur der Datenpakete mit den drei verschiedenen codierten Unterdatenströmen (FAC, SDC, MSC) zusammenstellt. Nach dem OFDM-Modulator wird das Signal auf eine D/A-Wandlerkarte des Typs NI 4461 von National Instruments ausgegeben. Am Ausgang dieser Wandlerkarte steht ein komplexwertiges (I und

Q-Komponente) Basisbandsignal zur Verfügung. Im Versuchsaufbau folgt nun ein SMU200A Signalgenerator der Firma Rohde&Schwarz, der das Signal auf die Sendefrequenz hochmischet. Die Verstärkung erfolgt zweistufig. Zuerst wird das Signal mit einem Verstärker vom Typ ZX60-33LN der Firma Mini Circuits um 22 dB verstärkt. Die Endverstärkung um 66 dB erfolgt mit einem Linearverstärker des Typs NP-501-1 des Herstellers NP Technologies im Klasse A-Betrieb.

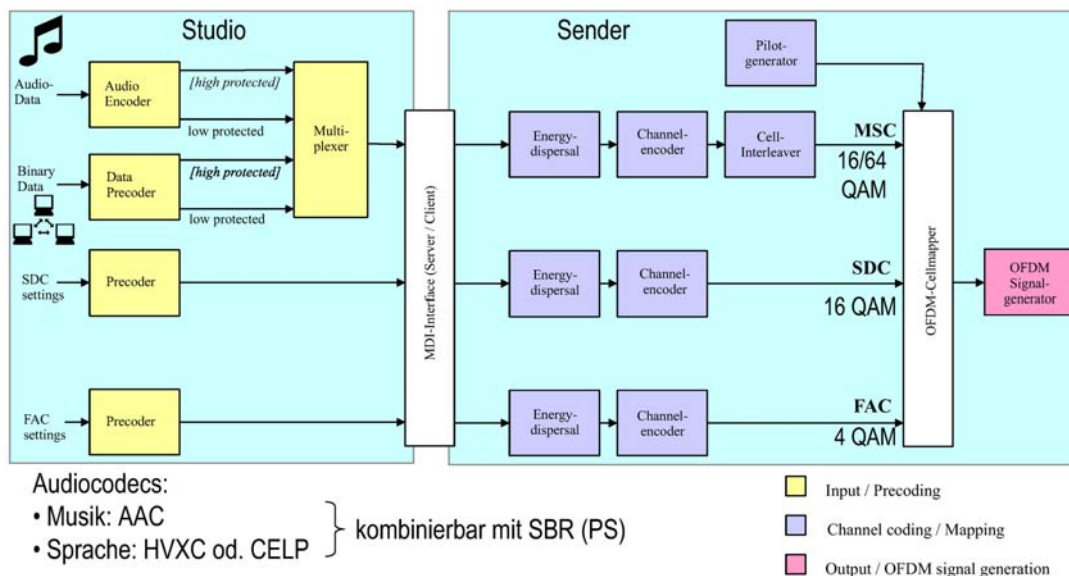


Abbildung 4.7: Aufbau eines DRM+-Signalgenerators

4.2.2 Planungsparameter

Mindestnutzfeldstärke

Nach [15] beträgt die Mindestempfängereingangsleistung zum Empfang der 16-QAM-Variante von DRM+ $-92,02 \text{ dBm}$. Angenommen wurde ein Faltungscode der Code rate $1/2$ und eine codierte Bitfehlerrate von 10^{-4} entsprechend einem CNR von 25 dB. Es ist zu vermuten, dass das wirklich benötigte SNR deutlich darunter liegt. Nach [24] benötigt man für eine uncodierte 16-QAM modulierte Übertragung mit einer Bitfehlerrate von 10^{-4} ([18]) ein CNR von 18 dB im AWGN (Additive White Gaussian Noise)-Kanal. Bei Berücksichtigung eines Codierungsgewinns von 5 dB bei Soft Decision (Faltungscode der Länge 7, Rate= $1/2$) und eines Implementierungszuschlages von 3 dB ergibt sich ein nötiges CNR von 16 dB. Die Differenz von 9 dB zwischen diesen beiden Werten wird als Reserve für Verluste durch reale Funkübertragungskanäle angesehen. Der genaue Einfluss der unterschiedlichen Kanäle auf das benötigte SNR kann nur simulativ oder durch Messungen ermittelt werden, da die Auswirkungen von den Eigenheiten des Übertragungssystems (Codierung, Interleaver, Bandbreite) und der Qualität der Kanalverzerrung im Empfänger bestimmt werden. Möglicherweise liegen die benötigten Mindestnutzfeldstärken also um bis zu 9 dB unter den hier angegebenen Werten.

Bei einer 4-QAM-Modulation ist noch ein CNR von 15 dB entsprechend einer Empfängereingangsleistung von $-102,2 \text{ dBm}$ erforderlich. Daraus ergibt sich nach Gleichung 2.22 bis 2.24 eine Mindestfeldstärke von $23,08 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$. Hierbei handelt

es sich allerdings um die absolute Mindestfeldstärke. Um die verschiedenen Empfangsbedingungen zu berücksichtigen, sind noch die Zuschläge aus Tabelle 2.3 zu addieren. Dadurch erhält man folgende Mindestnutzfeldstärken, die in Tabelle 4.2 dargestellt sind. Zum Vergleich sind die entsprechenden FM-Werte mit angegeben.

Tabelle 4.2: Mindestnutzfeldstärken im Vergleich

Empfangsfall	16-QAM	4-QAM	FM stereo	FM mono
Stationär	21,1 $dB\mu V/m$	11,1 $dB\mu V/m$	54 $dB\mu V/m$	48 $dB\mu V/m$
Portabel outdoor	48,7 $dB\mu V/m$	38,7 $dB\mu V/m$	85,9 $dB\mu V/m$	79,9 $dB\mu V/m$
Portable indoor	52,2 $dB\mu V/m$	42,2 $dB\mu V/m$	86,7 $dB\mu V/m$	80,7 $dB\mu V/m$
Mobil	51,3 $dB\mu V/m$	41,3 $dB\mu V/m$	86,2 $dB\mu V/m$	80,2 $dB\mu V/m$

Im mobilen Empfangsfall ist kein Aufschlag für die geschwindigkeitsabhängige Dopplerverschiebung enthalten. Es kann bei hohen möglichen Geschwindigkeiten, besonders tangential zum Sender, nötig werden, einen solchen zu berücksichtigen. Bei hohen Geschwindigkeiten radial zum Sender tritt zwar eine hohe, aber auch konstante Dopplerverschiebung auf, die von der Frequenzregelung ausgeregelt werden kann.

Gleichwellentauglichkeit

In einem Gleichwellennetz senden alle Sender auf der selben Frequenz. Dies macht große Abstände zwischen Sendern einer Frequenz überflüssig und erlaubt eine effiziente Nutzung des vorhandenen Frequenzbereiches. Wenn man die Kanalimpulsantwort in einem Gleichwellennetz betrachtet, werden die Signale der verschiedenen Sender zu unterschiedlichen Zeitpunkten am Empfänger ankommen.

OFDM-Systeme sind gleichwellentauglich, wenn bei der Implementierung auf ein ausreichend bemessenes Guard-Intervall geachtet wurde, d.h. die maximale Laufzeitdifferenz aller sich aufaddierender Signale ist kleiner als das Guard-Intervall. Alle Signalanteile, die eine Verzögerung kleiner als das Guard-Intervall aufweisen, tragen zur Nutzfeldstärke bei, alle Anteile mit einer größeren Verzögerung ergeben eine Störfeldstärke. Von Eigeninterferenz wird gesprochen, wenn sich aufgrund des Verhältnisses Nutz- zu Störfeldstärke durch Sender des eigenen Netzes Störungen beim Empfang ergeben.

In der aktuellen Spezifikation [18] ist ein Guard-Intervall von $250 \mu s$ festgelegt. Dies erlaubt Sendern bis zu einem Abstand von $T_g \cdot c = 250 \mu s \cdot 299792458 \frac{m}{s} = 74948 m$, also rund 75 km eine konstruktive Überlagerung. Der Senderabstand sollte nicht wesentlich größer sein als dieser Wert, um Störungen durch Eigeninterferenz möglichst gering zu halten. Diese Eigeninterferenz tritt auf, wenn sich in einem Gleichwellennetz zwei Empfänger mit mehr als 75 km Entfernungsdifferenz zum Empfänger überlagern. Dies ist beispielsweise in Tallagen nahe eines Senders der Fall, wo der nahe Sender stark gedämpft wird und der ferne Sender nahezu ungehindert einfallen kann. Genau bestimmen lassen sich die Gebiete, in denen mit Eigeninterferenz gerechnet werden muss, mit Hilfe einer entsprechenden Planungssoftware.

Eignung für Band I

Nachdem das Band I inzwischen fast vollständig geräumt und noch keine neue Verwendung beschlossen ist, wäre eine Nutzung für den Hörrundfunk zumindest möglich. Die Ausbreitungsbedingungen ähneln grundsätzlich denen im Band II, wobei eine Ausbreitung per an der Ionosphäre reflektierter Raumwelle im unteren Bandteil wahrscheinlicher, aber nicht betriebsmäßig verwendbar ist. Die möglichen Überreichweiten können bei der Wiederverwendung von Frequenzen problematisch sein, da Sender unter ungünstigen Bedingungen auch in größerer Entfernung noch mit nennenswerten Feldstärken empfangen werden können. Dadurch werden größere Schutzabstände erforderlich, die die Frequenzeffizienz beeinträchtigen. Diese Effekte sind im unteren Bandteil ausgeprägter als im oberen. Zusammenfassend ist ein Verwendung zwar grundsätzlich möglich, jedoch schwieriger als im Band II dauerhaft störungsarm zu realisieren.

Differenzen in den Planungsparametern zu FM

DRM+ kommt wegen seiner Fehlerkorrektur FEC (Forward Error Correction) und des Interleavers relativ gut mit schnellem Schwund zurecht, ist jedoch anfällig gegen langsamen Schwund. Die nötigen Mindestnutzfeldstärken aus Tabelle 4.2 unterscheiden sich deutlich zwischen FM und DRM+. Man muss allerdings berücksichtigen, dass vor allem die niedrigen nötigen Pegel für DRM+ nur in rauschbegrenzten Empfangssituationen ohne Frequenz- und zeitselektiven Schwund zutreffen würden. Durch Interferenzstörungen anderer Sender sind wesentlich höhere Sendeleistungen erforderlich. Aufgrund des Ausstiegsverhaltens digitaler Systeme sind hier größere Reserven erforderlich. Auf der anderen Seite lassen sich mit Empfängereingangsspegeln, die bei FM nur Mono-Empfang mit 30 dB SNR zulassen, bei DRM+ bereits mehrere Programme in annähernder CD-Qualität übertragen. Eine genaue Angabe, um wieviel die DRM+-Leistung gegenüber der FM-Leistung (bei gleicher Reichweite) reduziert werden kann, ist nur durch Simulationsverfahren möglich.

4.3 HD-Radio

4.3.1 Technische Grundlagen

Vorbemerkung

HD-Radio oder auch IBOC (In-Band on Channel) ist ein proprietäres Verfahren der Firma Ibiqity. Alle Informationen sind entnommen aus [2]. Da das Verfahren nicht vollständig offen gelegt ist, kann die Analyse weniger genau erfolgen als bei DRM+ oder auch FM. HD-Radio kann in verschiedenen Modi betrieben werden. Im volldigitalen Modus wird das analoge FM-Signal durch weitere OFDM-Träger ersetzt. In dieser Arbeit wird nur der Hybrid-Modus betrachtet, der Rückwärtskompatibilität zu analogen Empfängern bietet. Dieser besteht aus zwei digitalen Seitenbändern (jeweils von 129,361 kHz bis 198,402 kHz neben der Mittenfrequenz) und einem normalen FM-Träger auf der Mittenfrequenz. Der zusätzlich verfügbare extended Hybrid-Modus erweitert die digital-Seitenbänder um 27,6 kHz nach innen. Da dieser Modus in Europa nicht eingesetzt wird, soll dieser hier nicht betrachtet werden.

Die beiden digitalen Seitenbänder sind zur Störsicherheit mit identischen Daten moduliert. Dadurch halbiert sich die nutzbare Bandbreite natürlich. Von den im Digitalmultiplex zur Verfügung stehenden 96 kBit/s belegt der Hauptkanal 48 kBit/s. Die restlichen 48 kBit/s sind für zusätzliche Audio-Kanäle und Datendienste verfügbar. Der Hauptkanal wird also redundant analog und digital übertragen. Zusätzlich wird das analoge und digitale Signal mit einem Zeitversatz von bis zu sieben Sekunden übertragen, wodurch der Empfänger Empfangsausfälle aus einem Puffer überbrücken kann. Wenn der Puffer leer ist, wird auf das analoge Signal umgeblendet, bis der Puffer wieder gefüllt ist. Dies soll für den Hörer unmerklich ablaufen. Dadurch ist das System gegenüber kurzfristigen Empfangsschwankungen robuster als FM, was sich vor allem bei mobilem Empfang auswirkt.

Modulationsverfahren

HD-Radio ist ein zusammengesetztes System. Der FM-Träger bietet gegenüber UKW-FM keine Besonderheiten, nur die Bandbreite ist auf 260 kHz begrenzt, um Störungen in den digitalen Seitenbändern, die bei ± 130 kHz von der Mittenfrequenz beginnen, zu verhindern. Da die Bandbreite eines unbeschränkten FM-Signals auch nur 264 kHz beträgt, ist diese Einschränkung nicht gravierend. Die digitalen Seitenbänder mit OFDM-Modulation und einer Bandbreite von je 69 kHz teilen sich in jeweils 10 „Partitions“ auf. Pro Partition gibt es 18 Unterträger mit Daten. Der 19. Unterträger ist ein Pilot, der zur Synchronisierung dient. Damit ergeben sich 190 Unterträger pro Seitenband. Die Leistung der digitalen Seitenbänder gegenüber dem FM-Träger ist um 20 dB abgesenkt. Zusätzlich wurde der Crestfaktor des digitalen Signals reduziert. Durch den FM-Träger ergibt sich für das Gesamtsignal ein sehr niedriger Crestfaktor. Dies dient zum einen der Reduktion von Störungen, aber auch der einfacheren Verstärkbarkeit des Signals. In Abbildung 4.8 ist das prinzipielle Spektrum eines HD-Radio-Signals dargestellt. In der HD-Radio-Nomenklatur werden die Unterträger von der Mitte her durchnummeriert, auch wenn diese im Hybrid-Mode nicht vorhanden sind. Belegt sind die Unterträger ± 356 bis ± 546 , wobei Träger ± 546 ein zusätzlicher Pilot ist.

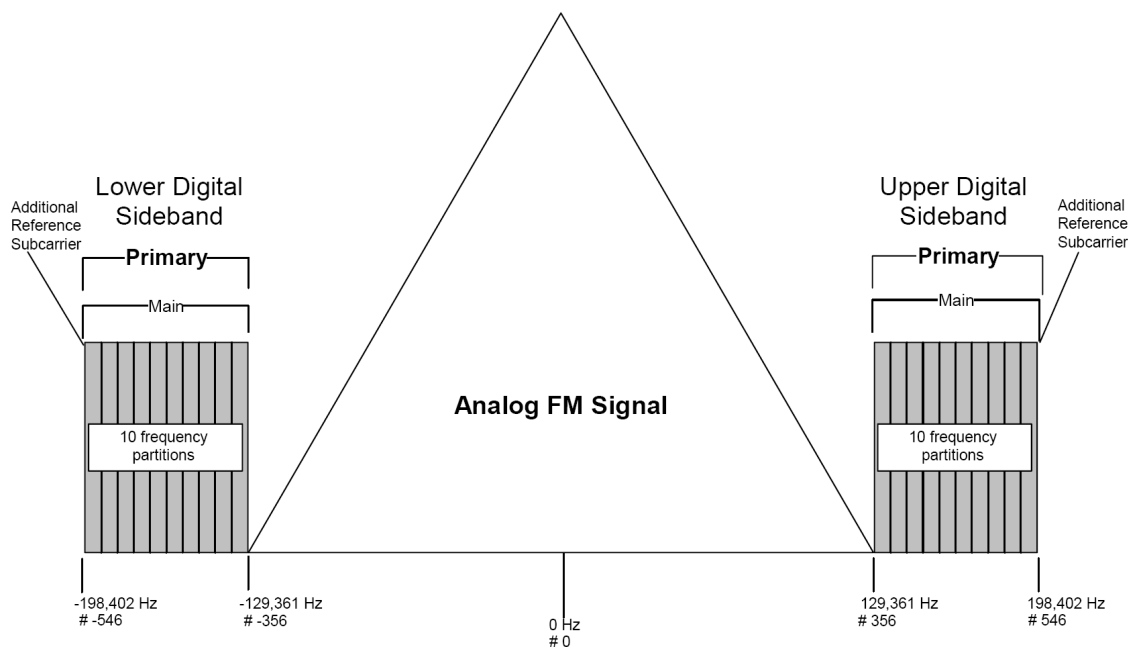


Abbildung 4.8: Prinzipielles Spektrum eines HD-Radio-Signals [2]

Senderaufbau

Ein HD-Radio-Sender besteht aus einem Exporter und einem Exciter. Der Exporter erzeugt das digitale Basisbandsignal, der Exciter mischt dieses auf die Betriebsfrequenz und verstärkt es. Ausserdem erzeugt er den analogen Signalanteil. Bild 4.9 zeigt einen HD-Radio-Sender kleiner Leistung (bis 250 W). Oben befindet sich der Exporter, unten der Exciter. Bei kleinen Leistungen werden die analogen und digitalen Signale gemeinsam verstärkt und dann der Antenne zugeführt. Bei großen Leistungen ist es sinnvoll, Digitalsignal und FM-Signal getrennt zu verstärken. Dadurch kann der FM-Verstärker als Klasse C-Verstärker ausgelegt werden und nur der Digitalanteil benötigt einen Linear- oder EER-Verstärker. Die Signale werden entweder über einen Richtkoppler zusammengeführt oder über zwei getrennte Antennen abgestrahlt.



Abbildung 4.9: Foto eines HD-Radio-Senders kleiner Leistung

Sendermaske

HD-Radio ist mit der ETSI-Maske nicht vereinbar, da die zusätzlichen Digitalpakete darüber hinausragen. Die Aussendungen erfüllen jedoch die Anforderungen der breiten FCC-Maske. Abbildung 4.10 zeigt die FCC-Maske für das Gesamtsignal und die ITU-Zweiseitenband (DSB)-Maske aus [21] für die digitalen Seitenträger. Der Pegel der digitalen Seitenträger beträgt bei 1 kHz Messbandbreite $-41,39$ dBc.

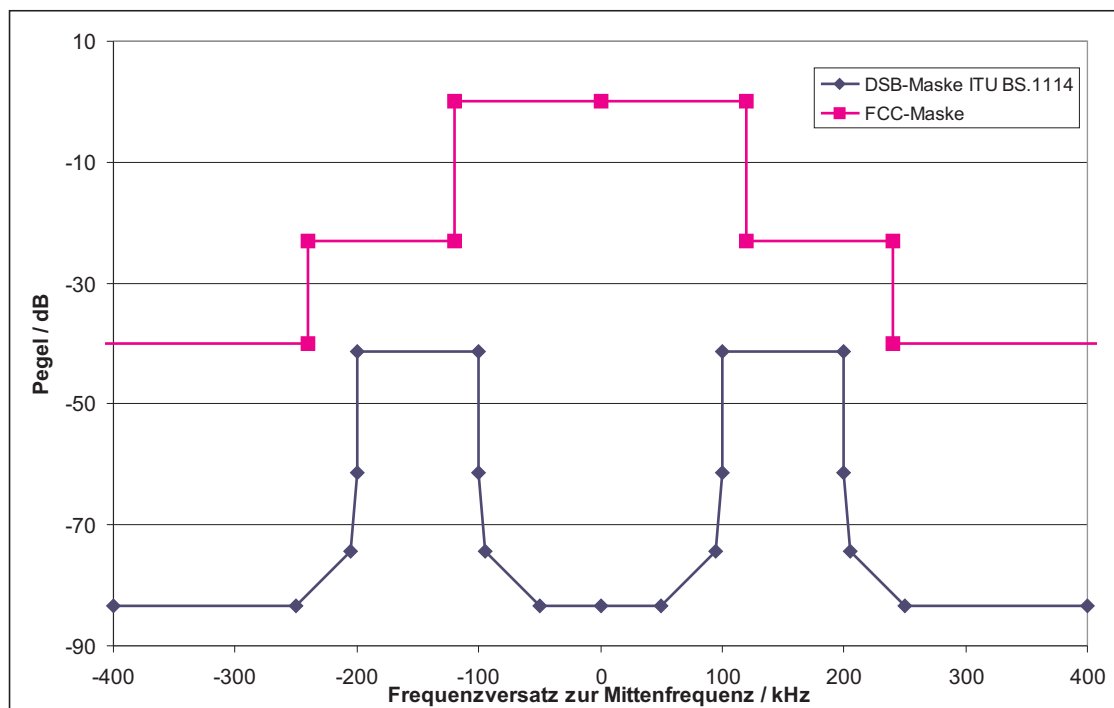


Abbildung 4.10: Spektrumsmasken für HD-Radio

Spektrum eines HD-Radio-Senders

Abbildung 4.11 zeigt die untere Hälfte des Spektrums eines HD-Radio-Senders kleiner Leistung (250 W). Dieses Spektrum wurde mit einem computergesteuerten Messempfänger und einem Bandpassfilter durch die Bundesnetzagentur hochdynamisch vermessen. Man erkennt, dass die FCC-FM-Maske und die ITU-DSB-Maske eingehalten werden. Die europäische FM-Maske wird allerdings im Bereich von 150 bis 200 kHz Offset um bis zu 35 dB verletzt. Dadurch muss mit erhöhtem Störpotential in den Nachbarkanälen gerechnet werden.

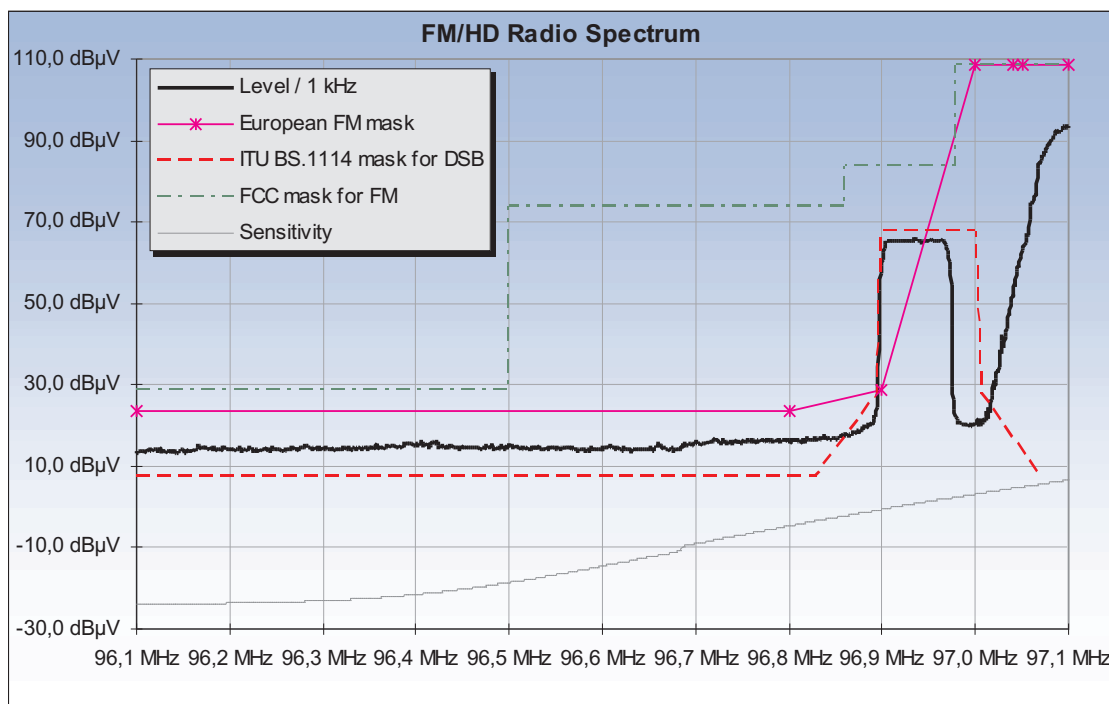


Abbildung 4.11: Spektrum eines HD-Radio Senders (FXi 250)

4.3.2 Planungsparameter

Differenzen in den Planungsparametern zu FM

Grundsätzlich erfordert das HD-Radio-System ähnlich hohe Sendeleistungen wie FM heute, da der FM-Anteil seine Reichweite behalten soll. Kritisch ist die Breite des Spektrums, die im eng belegten deutschen Rundfunkband zu Problemen führen kann. Die Störungen im Nachbarkanal sind deutlich stärker als bei FM. Das erfordert neue Schutzabstandskurven in den Planungstools, um benachbarte Sender zu schützen. Die digitalen Seitenbänder von HD-Radio müssen nicht unbedingt beide geschützt werden, da die enthaltene Information redundant ist, man also auch mit nur einem empfangbaren Seitenband die volle Qualität erreicht. Dies lässt sich leider nicht in einer Schutzabstandskurve abbilden. In den USA (Kanalraster 200 kHz) werden vorhandene FM-Stationen ohne Neuplanung einfach auf HD-Radio umgestellt. Durch den robusten Aufbau von HD-Radio funktioniert dies in den meisten Fällen. Im wesentlich dichter belegten europäischen UKW-Band ist ein solches Vorgehen allerdings deutlich schwieriger, da das Spektrum des HD-Radio-Signals nicht mit der Schutzabstandskurve nach [5] verträglich ist.

Kapitel 5

Verträglichkeitsmessungen

In diesem Kapitel werden auszugsweise Ergebnisse der Verträglichkeitsmessungen der FH Kaiserslautern in Zusammenarbeit mit der Bundesnetzagentur wiedergegeben und bewertet. Die vollständigen Ergebnisse der Laboruntersuchungen sind in [1] nachzulesen. Zusätzlich werden theoretische Betrachtungen zur Beeinflussung von DRM+ durch FM angestellt. Die Angabe „FM gegenüber DRM+“ bedeutet, dass die Störung eines FM-Nutzsignals durch einen DRM+-Sender betrachtet wird.

5.1 FM gegenüber DRM+

5.1.1 Theoretische Betrachtung

Betrachtungen an der FH Kaiserslautern

In [15] wurden die theoretischen Schutzabstände für eine Beeinflussung vom FM durch DRM+ berechnet. Dazu wurde ein gefordertes SNR von 30 dB am Eingang des Empfängers zu Grunde gelegt. Die Bandbreite des Empfängers wurde als 300 kHz breites Rechteck modelliert. Das DRM+-Signal wurde genau an die Maske (siehe Abbildung 4.5) heranmodelliert, stellt also den schlechtestmöglichen Fall dar. Abbildung 5.1 stellt die für 16-QAM berechnete Kurve der FM-Kurve aus [5] gegenüber.

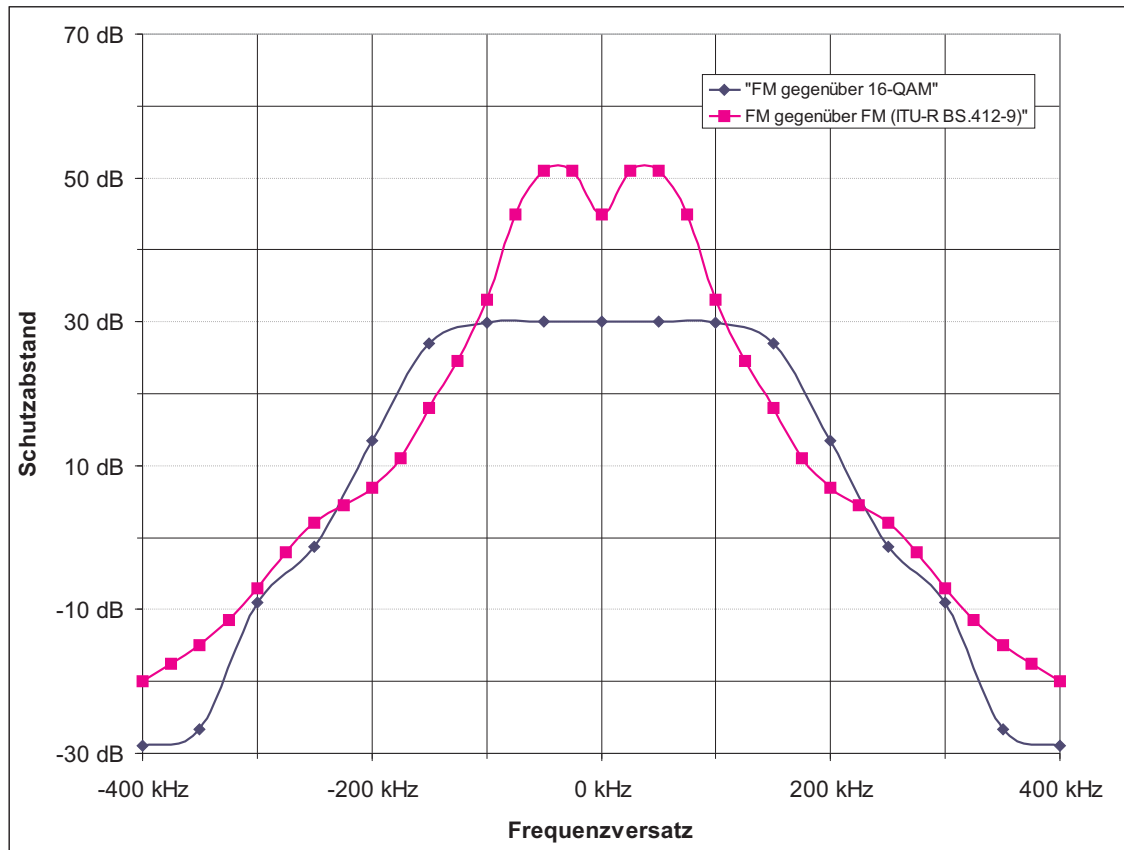


Abbildung 5.1: Schutzabstand FM gegenüber FM / DRM+

Demnach ist der erforderliche Schutzabstand bei FM gegenüber DRM+ im Gleichkanal geringer, jedoch in einem Abstand von 100 bis 220 kHz etwas höher. Bei dieser Berechnung wurde allerdings der Crestfaktor des DRM+-Signals nicht berücksichtigt.

Betrachtungen bei der BBC

Bei der BBC (British Broadcasting Corporation)[22] wurde zur Simulation ein idealer Empfänger vorausgesetzt und die Störungen des DRM+-Signals auf das FM-Signal betrachtet. Das DRM+-Signal wird als 100 kHz breiter Block weißen Rauschens modelliert. Dieses Rauschen hat ein ähnliches Spektrum sowie einen ähnlich hohen Crestfaktor wie das DRM+-Signal. Zuerst wird ein Mono-Empfänger betrachtet. Die Rauschleistung am Ausgang eines Empfängers ergibt sich zu:

$$\sigma = \int_{-f_a}^{f_a} \frac{f^2 \phi_n}{A_c^2} df. \quad (5.1)$$

wobei f die Audio-Frequenz, f_a die Audio-Bandbreite, ϕ_n die HF-Rauschdichte und A_c die Trägeramplitude ist. Die Herleitung hierzu kann zum Beispiel in [16], S. 334 nachgelesen werden. Wenn die Gewichtung des Rauschens und die Deemphase berücksichtigt werden und der Ausdruck auf die Trägerleistung normiert wird, ergibt sich:

$$\sigma = 0,5 \int_{-f_a}^{f_a} G_{de}^2 G_w^2 f^2 \phi_n df. \quad (5.2)$$

Wobei G_{de} der Frequenzgang der Deemphase und G_w der Frequenzgang der Rauschwichtung ist. Abbildung 5.2 zeigt das Ergebnis dieser Berechnungen und zusätzlich noch das Ergebnis der Berechnungen für ein FM-Stereo-Signal. Der Einfluss auf ein Stereo-Signal ist deutlich größer, da auch Rauschen aus den Stereo-Seitenbändern ins hörbare Band gemischt wird und das Rauschen am FM-Demodulatorausgang proportional zu f^2 ist.

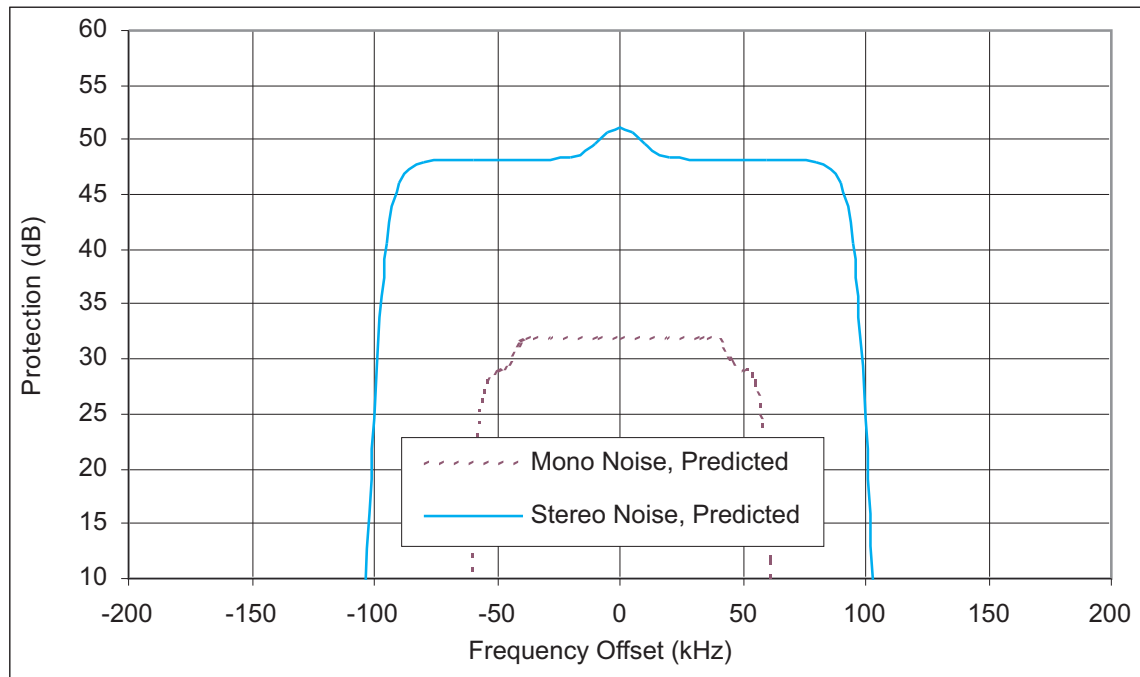


Abbildung 5.2: Berechnete Schutzabstandskurven [22] - DRM+ stört FM

Diese Berechnungen stimmen im Bereich bis 100 kHz Frequenzversatz mit den an der Fachhochschule Kaiserslautern gemessenen Effekten überein. Bei größeren Frequenzversätzen treten noch zusätzliche Effekte auf, die in dieser Berechnung nicht berücksichtigt wurden.

5.1.2 Ergebnisse der Laboruntersuchungen an der FH Kaiserslautern

An der FH Kaiserslautern wurden in Zusammenarbeit mit der Bundesnetzagentur umfangreiche Messungen zum Schutzabstand FM gegenüber DRM+ durchgeführt. Zuerst wurden Messungen des Schutzabstandes FM gegenüber FM durchgeführt, um Erfahrungen mit dem Messverfahren und den verwendeten Empfängern zu sammeln. Danach wurden die Messungen FM gegenüber DRM+ mit verschiedenen Empfängern durchgeführt. Zusätzlich wurde die Beeinflussung von RDS durch FM und auch durch DRM+ gemessen, um zu prüfen, wie und ob RDS durch die digitale Modulation beeinflusst wird. Dazu wurden zwei umgebaute Empfänger verwendet, die das RDS-Signal zur Auswertung ausgeben.

Empfänger

Um belastbare Werte zu erhalten, wurden verschiedene Empfänger vermessen. Für eine Anwendung des Messverfahren nach [11] mit möglichst wenig Änderungen, war

ein Antennenanschluss sowie ein NF-Ausgang erforderlich. Ebenso nötig war ein erreichbares NF-SNR von 56 dB. Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die eingesetzten Empfänger. Der JVC-Empfänger wurde bereits bei T-Systems und der BBC zu Tests eingesetzt. Er wird als repräsentativ für seine Empfängerklasse angesehen. Deshalb wird er als Referenz genutzt.

Tabelle 5.1: Bei den Laboruntersuchungen eingesetzte Empfänger

Empfänger	Typ	Besonderheiten
JVC CA-MX55RMB	Kompaktanlage	Referenz
Blaupunkt Woodstock DAB54	Autoradio	
Blaupunkt Hannover DAB	Autoradio	
Pioneer F229	Heimempfänger	
Grundig Satellit 700	Portalempfänger	RDS-Messausgang
BMW Business RDS	Autoradio	RDS-Messausgang

FM gegenüber FM

Um zu überprüfen, wie sich moderne Empfänger im Vergleich zur ITU-Schutzabstandskurve verhalten ([5]), wurden Messungen des Schutzabstandes FM gegenüber FM durchgeführt. Nur so können die Veränderungen des Schutzabstandes durch die unterschiedlichen Modulationsverfahren korrekt bewertet werden. Abbildung 5.3 zeigt die Schutzabstandskurve für den JVC-Empfänger und zu Vergleichszwecken die ITU-Schutzabstandskurve:

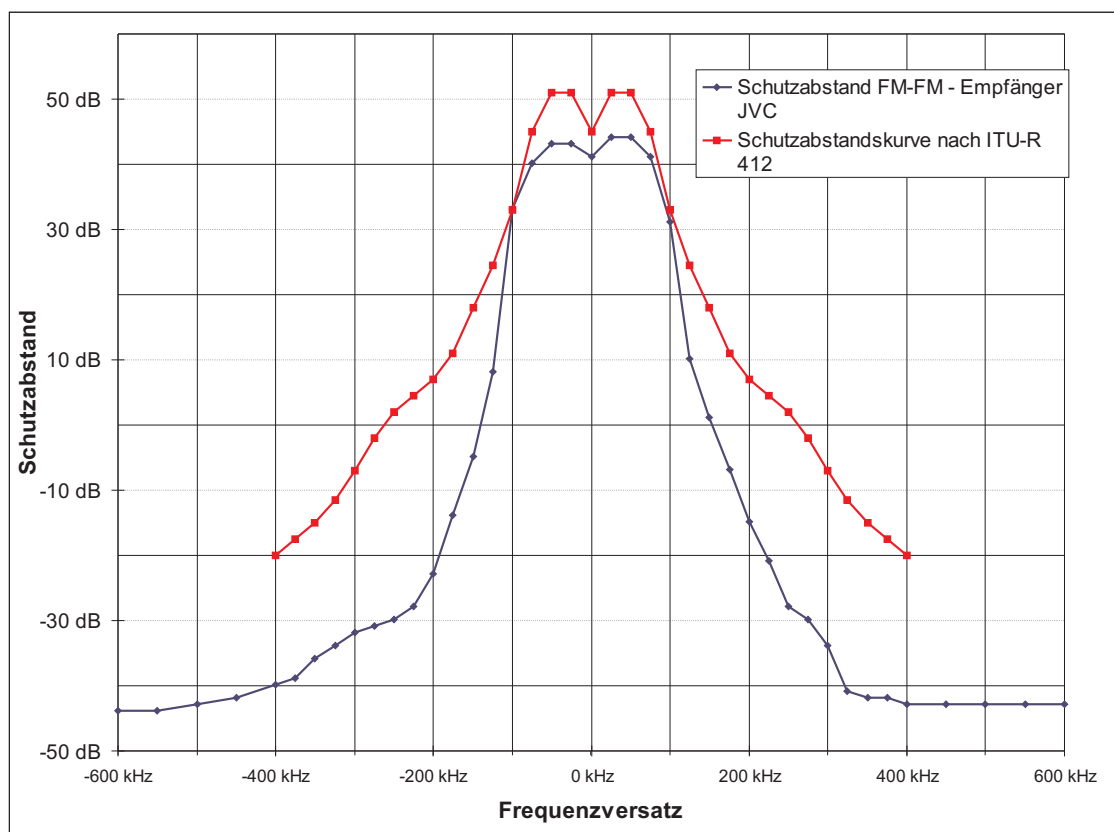


Abbildung 5.3: Schutzabstand FM-FM - Empfänger JVC

Abbildung 5.4 zeigt die Ergebnisse für ein Autoradio (Blaupunkt Woodstock DAB). Bei der roten Kurve wurde mit dem nach Norm [11] minimal nötigen Eingangsleistung (-51 dBm zum Erreichen von 56 dB NF-SNR) gemessen. Für die grüne Kurve wurde die Leistung um 20 dB erhöht (auf -31 dBm). Damit wurde die Linearität des Empfängers getestet. Diese ist für FM Signale gegeben, da die Kurven fast deckungsgleich sind.

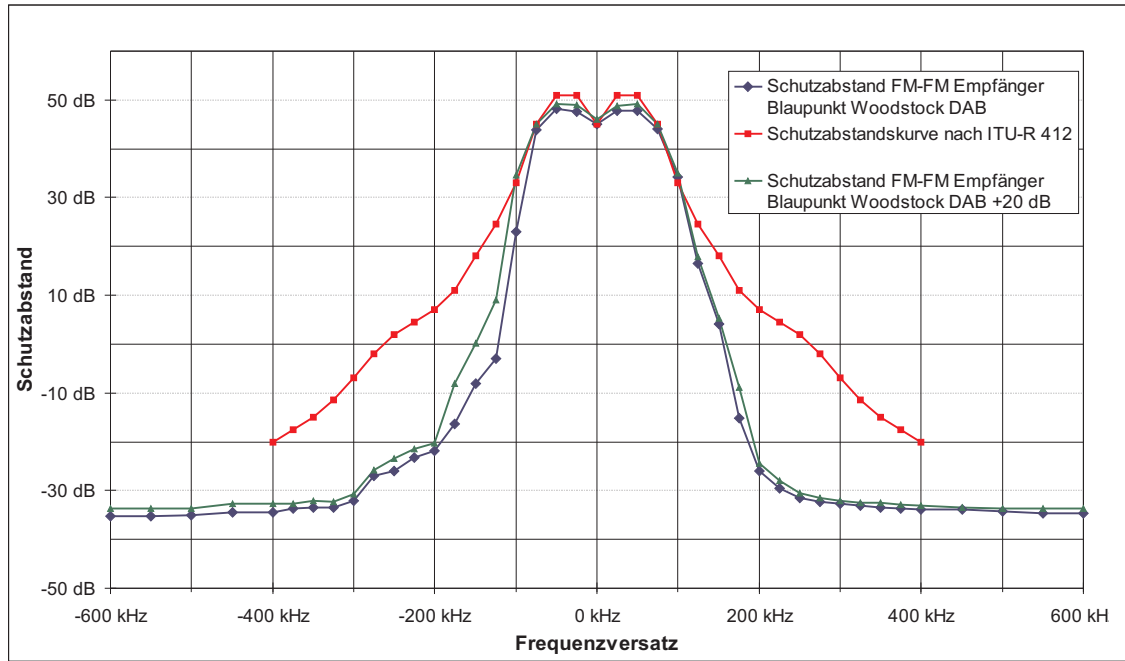


Abbildung 5.4: Schutzabstand FM-FM - Empfänger Blaupunkt Woodstock DAB

Man erkennt, dass beide Empfänger wesentlich besser als die ITU-Schutzabstandskurve sind. Dies ist vor allem dem technischen Fortschritt der Empfänger seit den 70er Jahren geschuldet. Alle anderen vermessenen Empfänger verhalten sich bei Beeinflussung durch einen FM-Störer ähnlich. Die vollständigen Ergebnisse können in [1] nachgelesen werden.

FM gegenüber DRM+

Kernstück der Laboruntersuchungen waren die Verträglichkeitsmessungen von FM gegenüber DRM+, da hier bereits mehrere Messungen in kleinem Umfang durchgeführt wurden, die ein hohes Störpotential als wahrscheinlich erscheinen ließen. Abbildung 5.5 zeigt die Schutzabstandskurve für den JVC-Empfänger bei Beeinflussung durch DRM+:

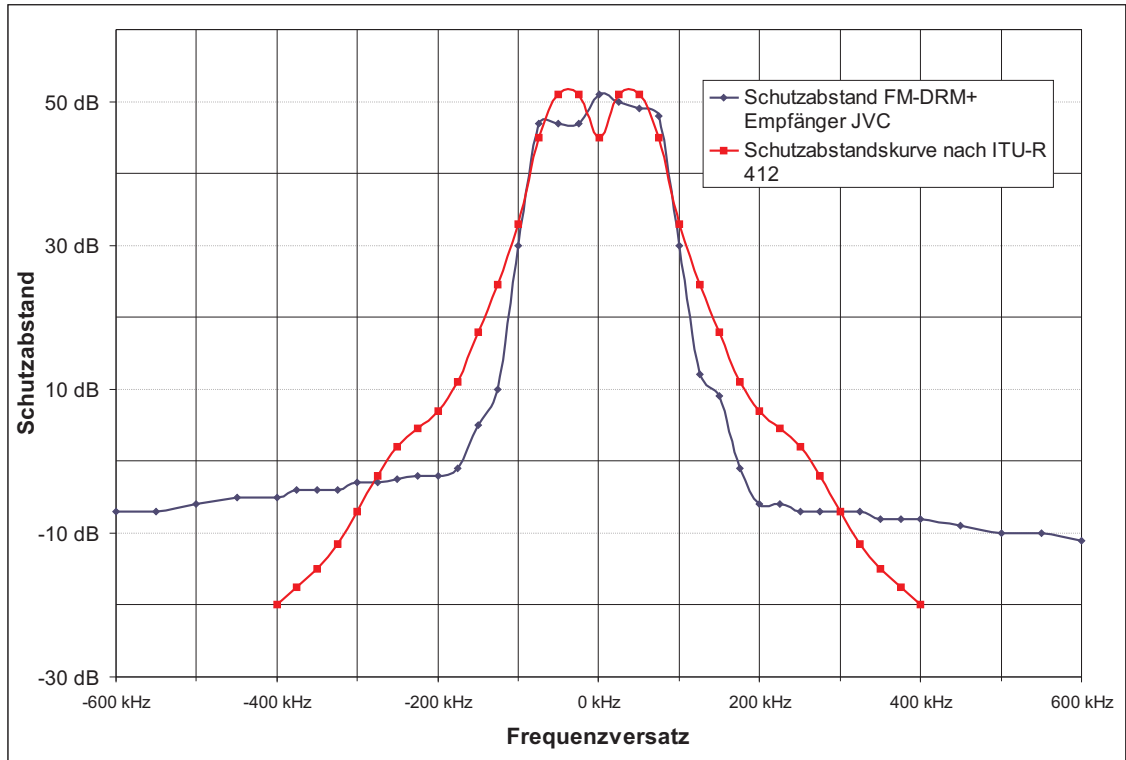


Abbildung 5.5: Schutzabstand FM-DRM+ - Empfänger JVC

Abbildung 5.6 zeigt eine für das Autoradio Blaupunkt Woodstock DAB gemessene Schutzabstandskurve. Der starke Abfall auf der linken Seite lässt sich dadurch erklären, dass das Radio ein wirksames Bandfilter für das UKW-Rundfunkband im Eingang besitzt. Bei einer Arbeitsfrequenz von 87,6 MHz wird der Störer ab einem Offset von 300 kHz von diesem Filter deutlich unterdrückt.

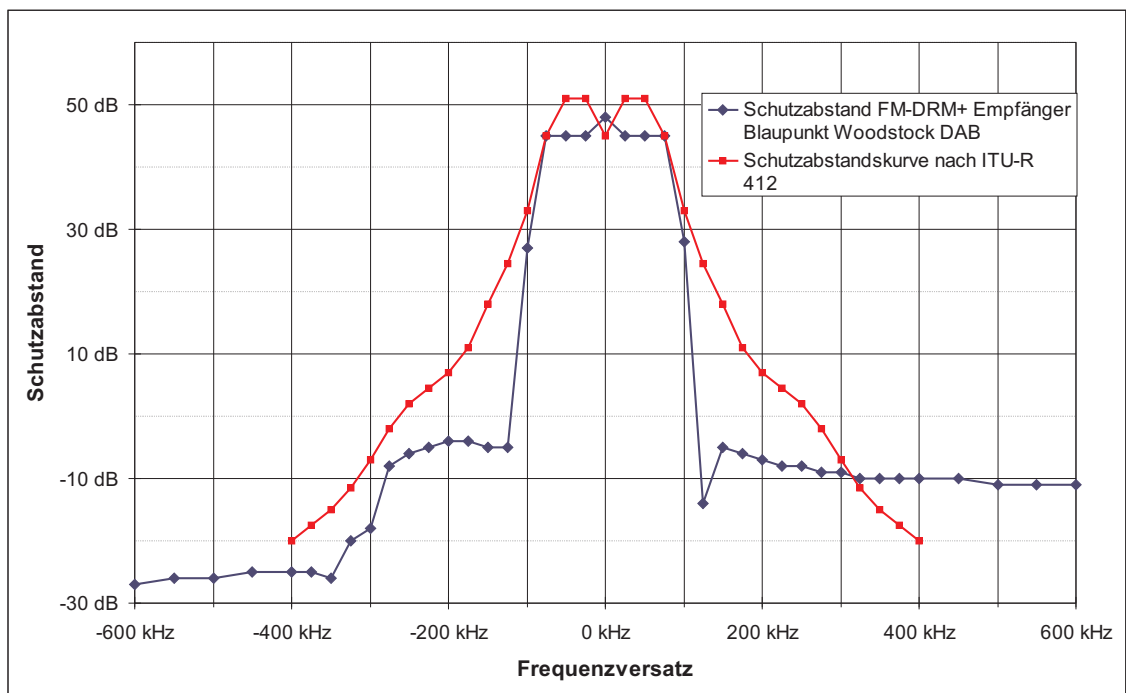


Abbildung 5.6: Schutzabstand FM-DRM+ - Empfänger Blaupunkt Woodstock DAB

Da die Schutzabstandskurve für DRM+ in einem Abstand von ca. 300 kHz tendenziell plateauartig verläuft, wurden weitere Messungen durchgeführt. Abbildung 5.7 zeigt das Ergebnis einer Messung über einen Frequenzbereich von 15 MHz. Ein Schutzabstand von -20 dB, der in [5] für Offsets von 400 kHz und größer verlangt wird, wird erst bei einem Frequenzversatz von 1500 kHz erreicht.

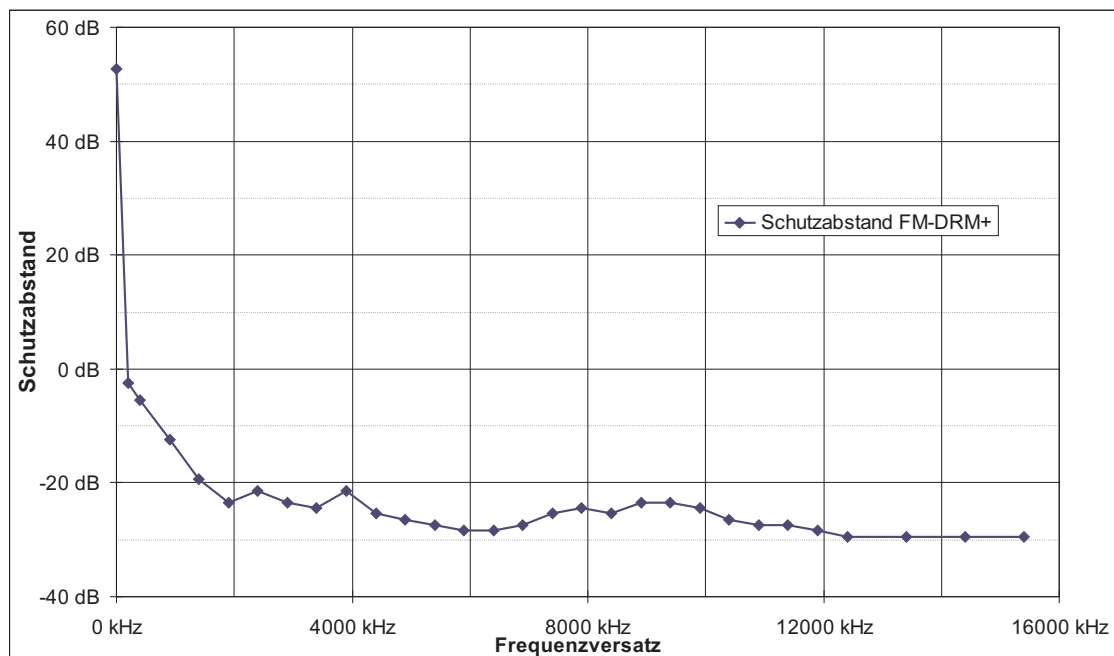


Abbildung 5.7: Schutzabstand über einen großen Frequenzbereich FM-DRM+ - Empfänger JVC

RDS gegenüber DRM+

Da der RDS (Radio Data Service)-Dienst bei den mobilen Rundfunknutzern sehr populär ist (Übertragung von Verkehrsinformationen via TMC), wurde die Verträglichkeit mit DRM+ ebenfalls untersucht. Es standen zwei Radios mit RDS-Meßausgang zur Verfügung. Dieser Meßausgang wurde über einen Adapter an die serielle Schnittstelle eines PCs angeschlossen. Mit Hilfe einer Spezialsoftware wurde das Auftreten von Bitfehlern beobachtet. Störkriterium war das erste Auftreten von Bitfehlern. Schon eine leichte Erhöhung des Störpegels über diesen Punkt hinaus bewirkt einen RDS-Übertragungsausfall. Allerdings lieferte nur eines dieser Radios verwertbare Ergebnisse, da der Empfänger des Grundig Satellit 700 selbst bei Beeinflussung mit FM ein undefinierbares Verhalten zeigte. Abbildung 5.8 zeigt die Ergebnisse für das BMW-Business-Autoradio.

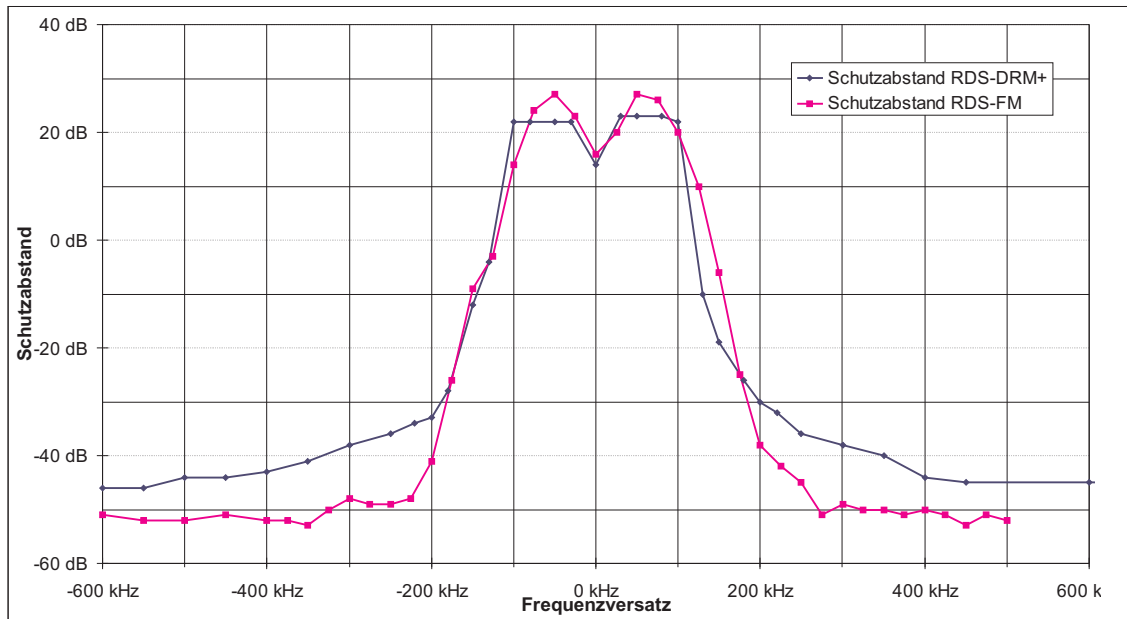


Abbildung 5.8: Schutzabstand RDS gegenüber FM und DRM+

Die Unterschiede zwischen der Beeinflussung mit FM und DRM+ sind bei diesem Empfänger erkennbar, aber nicht übermäßig bedeutsam. Die höheren Schutzabstandswerte für DRM+ rühren hauptsächlich von den Ausserbandemissionen des verwendeten Signalgenerators her, befinden sich aber auf sehr niedrigem Niveau. Zusammenfassend treten RDS-Störungen erst bei weit geringeren Schutzabständen auf als SNR-Störungen. Eine besondere Empfindlichkeit von RDS gegenüber DRM+ besteht nicht.

5.1.3 Störmechanismen

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen lassen vermuten, dass mehrere Störmechanismen an den gegenüber FM erhöhten Schutzabständen beteiligt sind. Abbildung 5.9 zeigt die Annahme:

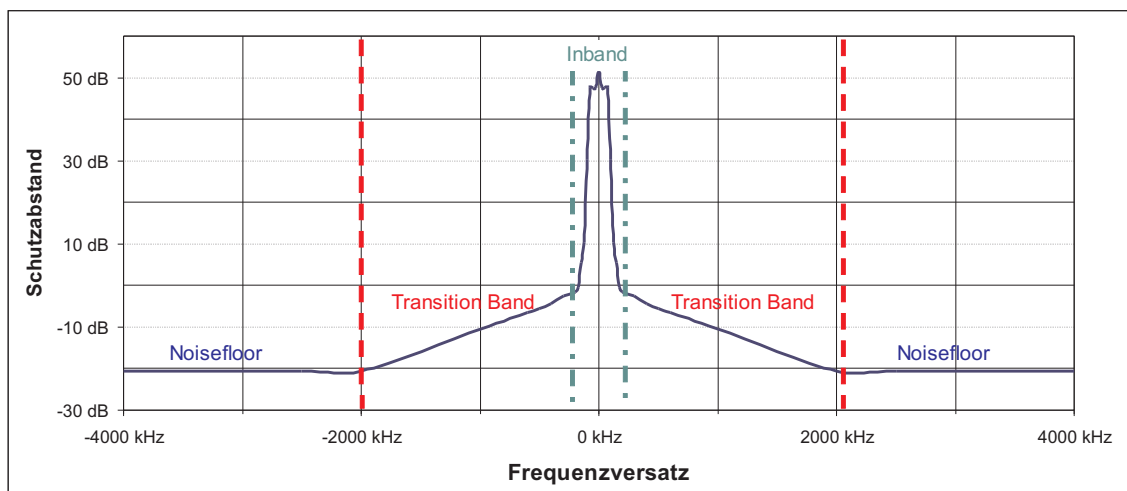


Abbildung 5.9: Schutzabstand FM-DRM+ - Annahme verschiedener Störmechanismen

Inband-Störungen

Inband-Störungen entstehen, wenn das DRM+-Signal im Kanal des zu schützenden FM-Signals liegt. Diese Störungen sind unvermeidlich und sind auch aus der Theorie heraus in dieser Form zu erwarten. Sie sind etwas höher als bei FM gegenüber FM.

Noisefloor

Das ausgedehnte Plateau im Bereich ab 2 MHz Versatz entsteht durch Rauschemissionen des breitbandigen IQ-Mischers im Signalgenerator. Diese Störungen lassen sich durch eine Bandpassfilterung des Ausgangssignals problemlos beseitigen. Abbildung 5.10 zeigt die selbe Messung wie Abbildung 5.7, nur wurde ein dreikreisiges Bandpassfilter mit einer 3 dB-Bandbreite von 500 kHz hinter dem Signalgenerator verwendet. Die durch Rauschen erzeugten Störungen sind deutlich zurückgegangen.

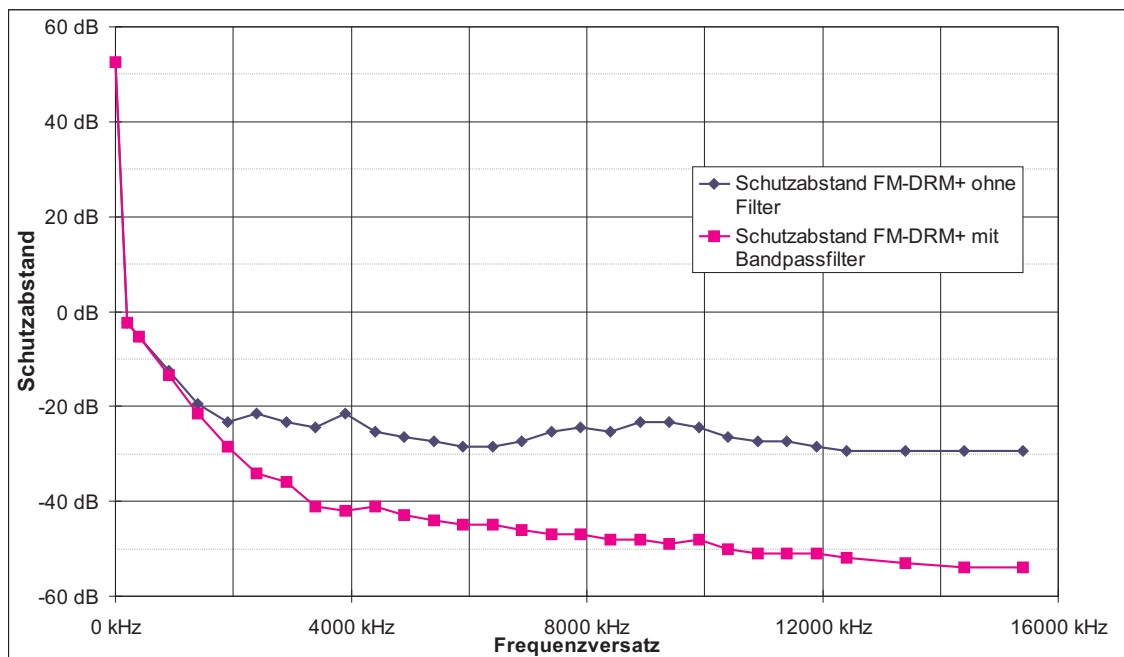


Abbildung 5.10: Schutzabstand FM-DRM+ - Filterung der Rauschemissionen

Da ein Bandpassfilter am Ausgang eines Senders zum Standard gehört, ist diese Form der Störungen auch als eher unkritisch zu bewerten.

Transition Band

Die kritischsten Störungen treten im Bereich zwischen den Inband-Störungen und dem Noisefloor auf. Diese Störungen im Übergangsbereich werden vor allem durch den hohen Crestfaktor des DRM+-Signals erzeugt. Der verwendete Signalgenerator SMU200 des Herstellers Rohde & Schwarz kann Mehrträgersignale mit einstellbarem Crestfaktor generieren. Diese Signale unterscheiden sich zwar vom realen DRM+-Signal, die Ähnlichkeit ist aber groß genug, um Trends erkennen zu können. Abbildung 5.11 zeigt die Schutzabstände bei Störung eines FM-Signals mit Mehrträgersignalen mit verschiedenen Crestfaktoren und einem DRM+-Signal. Das DRM+-Signal hat einen Crestfaktor von etwa 10 dB. Aufgrund der unterschiedlichen Signale liegt es zwischen den Ergebnissen für Signale mit 18 und 12 dB Crest.

Die Tendenz, dass hohe Crestfaktoren zu Problemen führen, ist allerdings klar erkennbar.

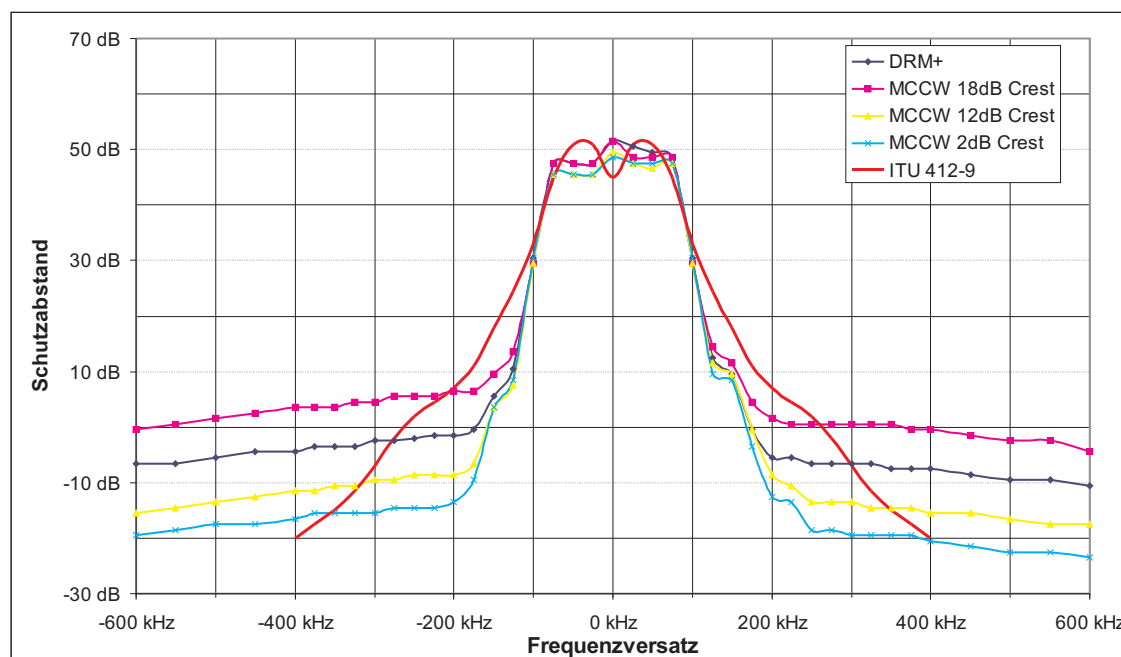


Abbildung 5.11: Schutzabstand FM gegenüber Signalen mit verschiedenen Crestfaktoren

Die Probleme durch den hohen Crestfaktor sind auf Unzulänglichkeiten der Rundfunk-Empfänger zurückzuführen. Die AGC (Automatic Gain Control, Verstärkungsregelung im Eingang des Empfängers) regelt auf den Mittelwert des Eingangssignals. Durch den hohen Crestfaktor übersteuern die Spitzen den ersten Mischer. Dadurch entsteht eine Vielzahl von Intermodulationsprodukten. Um dieser Theorie weiter nachzugehen, wurde die erste ZF (Zwischenfrequenz) eines älteren Autoradios (Blaupunkt Windsor SQR) analysiert. Das Autoradio bot sich durch den vorhandenen Schaltplan und den übersichtlichen Aufbau für dieses Experiment an. Abbildung 5.12 zeigt das ZF (Zwischenfrequenz)-Signal am Ausgang des ersten Mixers. Beim dargestellten Bild war der Eingang mit einem FM-Signal und einem störenden DRM+-Signal beaufschlagt. Die Pegelverhältnisse der beiden Signale und ihr Frequenzversatz von 200 kHz sind in allen drei folgenden Bildern identisch.

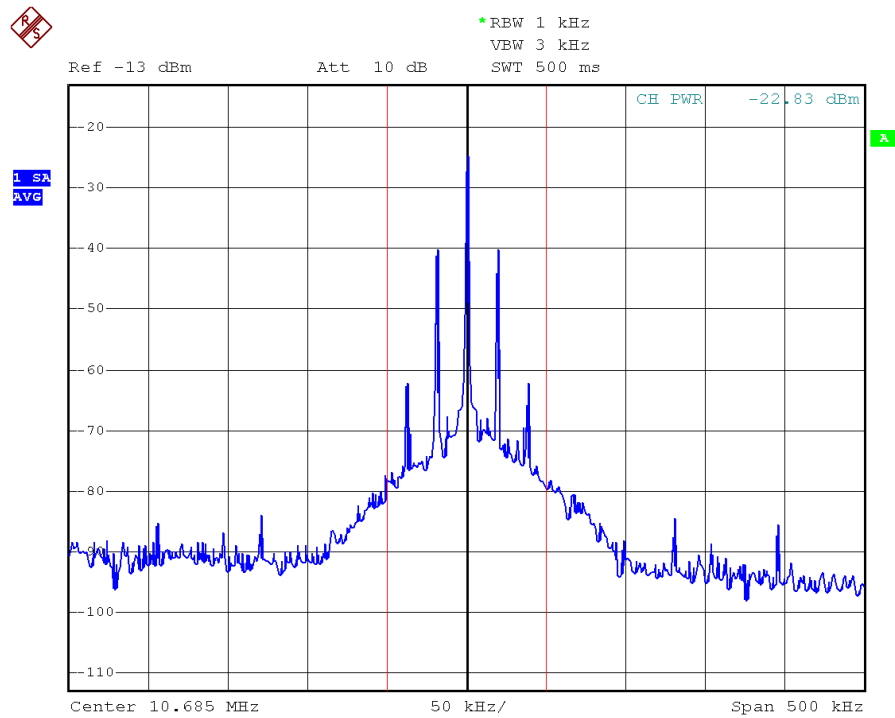


Abbildung 5.12: Erste ZF eines Empfängers - DRM+ stört FM

Abbildung 5.13 zeigt wieder die ZF des Empfängers, nur diesmal mit einem synthetischen Signal mit 2 dB Crestfaktor anstelle des DRM+-Signals. Die Intermodulationen gehen deutlich zurück, das FM-Signal ist nun wieder vollständig erkennbar:

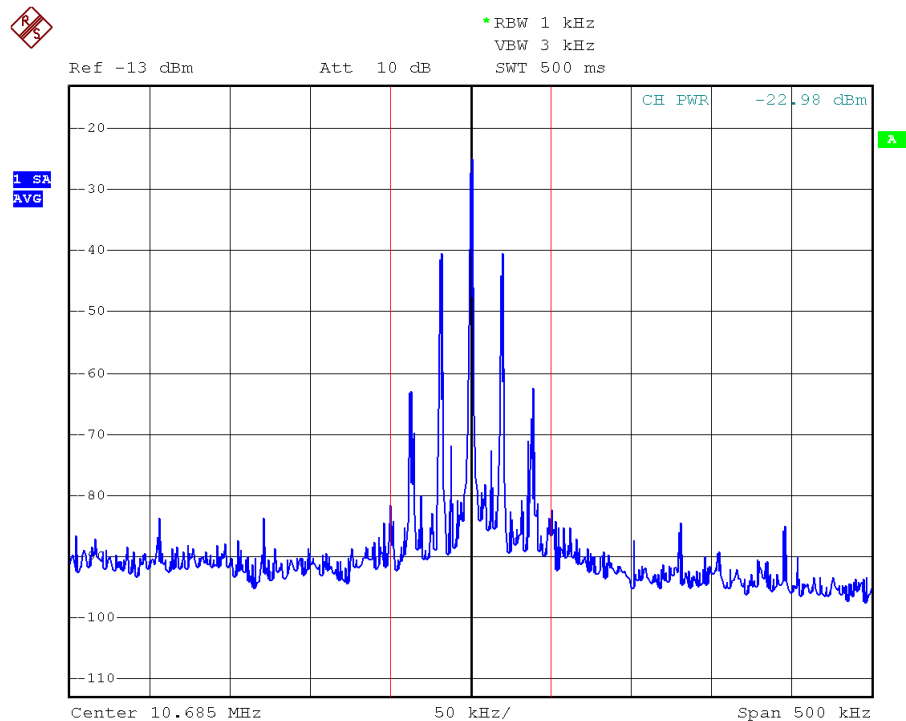


Abbildung 5.13: Erste ZF eines Empfängers - MCCW (2dB Crestfaktor) stört FM

Um die These zu bestätigen, dass die AGC Einfluss auf die Intermodulationen hat, wurde nun der AGC-Kreis aufgetrennt und die Verstärkung manuell einge-

stellt. Eine Reduktion der Verstärkung von 7 dB - das heisst, die gemessene FM-Trägerleistung reduziert sich von -25 dBm auf -32 dBm, reduziert die Intermodulationsprodukte von -70 dBm auf -90 dBm. Dieser Rückgang um 20 dB deutet auf Intermodulationen dritter Ordnung hin. Diese Intermodulationen fallen mit der dritten Potenz der Leistung, also bei einer Reduktion des Pegels um 1 dB fallen die Intermodulationen um 3 dB. Abbildung 5.14 zeigt das Spektrum in diesem Fall:

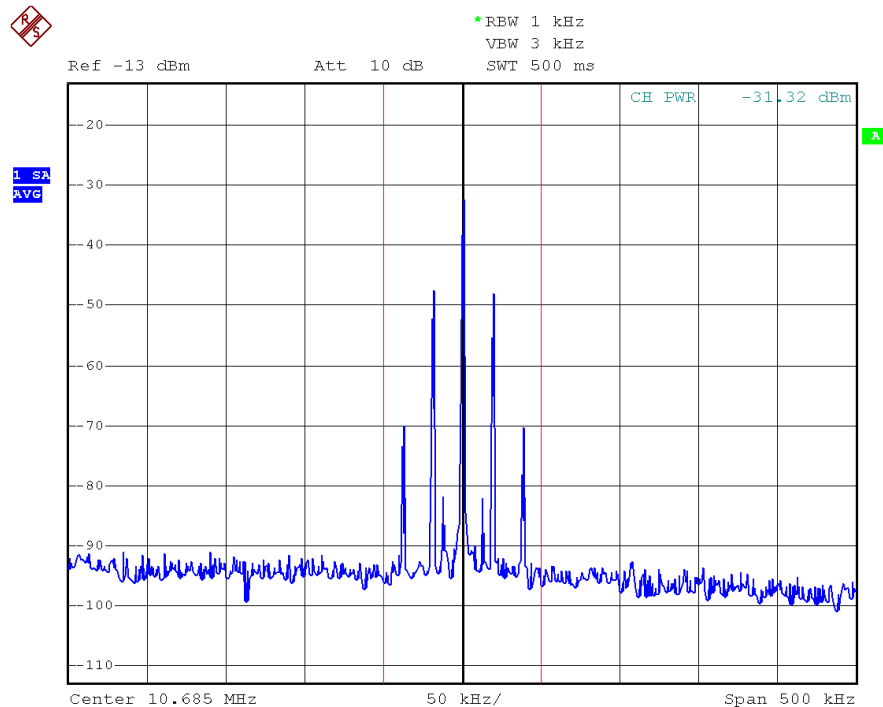


Abbildung 5.14: Erste ZF eines Empfängers - DRM+ stört FM - AGC abgeschaltet

Es sei angemerkt, dass diese Schutzabstandsmessungen den schlimmstmöglichen Fall für den Empfänger darstellen. Normalerweise wirkt eine Vielzahl an Signalen auf den Empfänger ein. Dadurch reduziert sich der Crestfaktor am Empfängereingang gegenüber den Laboruntersuchungen deutlich. Dieses Verhalten steht im Gegensatz zu dem von Empfängern bei Beeinflussung mit FM-Störsignalen gezeigten. Dort ist das Verhalten im Labor und im Feld wesentlich ähnlicher. Damit sind dort die Laboruntersuchungen erheblich aussagekräftiger für die Realität und zeigen keinen unrealistischen Worst Case. Diese Ergebnisse stellten die Motivation zu den Feldmessungen dar, um die Werte unter realistischen Bedingungen zu verifizieren.

5.1.4 Ergebnisse des Feldversuchs in Kaiserslautern

Da die Ergebnisse des Feldversuchs noch nicht vollständig ausgewertet sind, stehen erst einige Vorabinformationen zur Verfügung, diese lassen aber vermuten, dass die Verträglichkeitsproblematik bei der heutigen Bandbelegung in Band II wesentlich unkritischer ist, als die Labormesswerte erwarten lassen. Abbildung 5.15 zeigt eine im Feld gemessene Schutzabstandskurve.

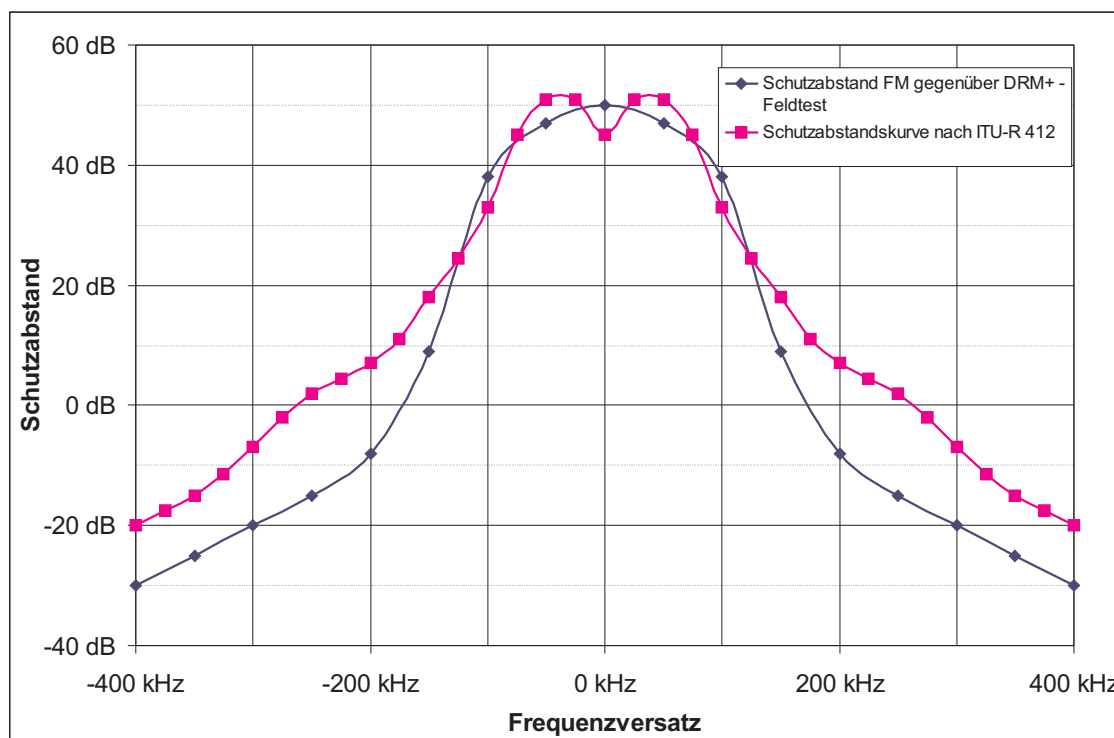


Abbildung 5.15: Schutzabstandskurve DRM+ stört FM (Feldmessung) im Vergleich zur ITU-Schutzabstandskurve

Nach dieser Schutzabstandskurve ist eine Leistungsreduktion des DRM+-Senders erforderlich, da die ITU-Schutzabstandskurve im Gleichkanal und im ersten Nebenchkanal um jeweils 5 dB überschritten wird. Dies gilt, solange der Pegel des DRM+-Senders niedrig gegenüber den anderen vorhandenen Sendern ist. Probleme sind hauptsächlich im direkten Umkreis der DRM+-Sender (hohe DRM+-Absolutpegel) zu erwarten. Genaueres hierzu kann dem im Herbst 2008 erscheinenden Abschlussbericht zum DRM+-Feldversuch entnommen werden.

Messverfahren

Abweichend vom Messverfahren nach [11] wurde der SINAD (Signal, Noise and Distortion) nach [19] gemessen. Bei diesem Verfahren wird der Sender mit einem Sinus-Signal mit definiertem Hub und Frequenz moduliert. Das Signal am Empfängeranfang wird über ein Bandpassfilter zur Unterdrückung unhörbarer Anteile und Resten des Pilottons auf ein quasi-Peak-Spannungsmessgerät geschaltet. Danach wird eine 1 kHz Bandsperre (bei 1 kHz Messton) vor das Spannungsmessgerät geschaltet. Dieser Filter unterdrückt die Grundschwingung des Testtones. Der Spannungsmesser misst nur noch Verzerrungen und Rauschen. Die Differenz der beiden Messungen ist der SINAD. Dieses Messverfahren kann über einen Audio-Analysator (in diesem Fall ein UPV der Firma Rohde & Schwarz) automatisiert werden. Wenn dieses Verfahren für Schutzabstandsmessungen verwendet wird, kann entweder die Störleistung solange erhöht werden, bis ein Störkriterium (SINAD unter definierter Schwelle) erreicht wird oder es wird direkt der SINAD-Wert bei konstanter Leistung des Störers als Ergebnis genommen.

Die Ergebnisse sind mit den Laborergebnissen nicht direkt vergleichbar, untereinander allerdings schon. Das Messverfahren wurde verwendet, da sich das Mess-

verfahren nach ITU [11] im Feld nur schwer umsetzen lässt.

5.2 DRM+ gegenüber FM

Bis jetzt wurden noch keine Labormessungen zur Verträglichkeit von DRM+ mit FM durchgeführt. Im Vorfeld soll durch eine theoretische Betrachtung geklärt werden, was bei einer späteren Messung zu erwarten ist.

Der Empfänger kann als optimal angenommen werden. Das heisst, dass Störungen ausserhalb des 100 kHz breiten DRM+-Signals nicht zu Qualitätseinbußen führen. Da ein DRM+-Empfänger schon durch den hohen Crestfaktor des Nutzsymbols eine wesentlich höhere Linearität als ein FM-Empfänger haben muss, können Störungen durch Mischprodukte aufgrund von Nichtlinearitäten vernachlässigt werden. Der Empfängereingang kann zwar breitbandiger sein, vor allem bei DRM+/FM-Kombigeräten, allerdings findet im digitalen Teil eine quasi optimale Bandpassfilterung statt. Solange keine Mischprodukte oder Aliasing-Produkte entstehen, verhält sich der Empfänger so, als hätte er eine Eingangsbandbreite von nur 100 kHz. Es wird ein AWGN-Kanal vorausgesetzt. In diesem Kanal existiert ein breitbandiger Rauschteppich, der vom Empfänger zusammen mit Nutz- und Störsignal aufgenommen wird. Zur Berechnung der Schutzabstände werden 2 verschiedene FM Spektren zugrunde gelegt. Einmal der Normstörer nach [25], zum anderen ein Dreiecksspektrum, das einem realen Rundfunksignal nachempfunden wurde. Zur Berechnung wurden die beiden Spektren durch Funktionen approximiert, deren Leistungen auf 0 dBm normiert wurden. Gleichung 5.3 gibt die Funktion für den Normstörer an, Gleichung 5.4 die für das Dreiecksspektrum.

$$f(x) = -\frac{1}{176}x - 17 \text{ dB} \quad (5.3)$$

$$f(x) = -\frac{2}{3}|x| - 11,2 \text{ dB} \quad (5.4)$$

Abbildung 5.16 zeigt die Spektren der beiden Störsignale im Vergleich.

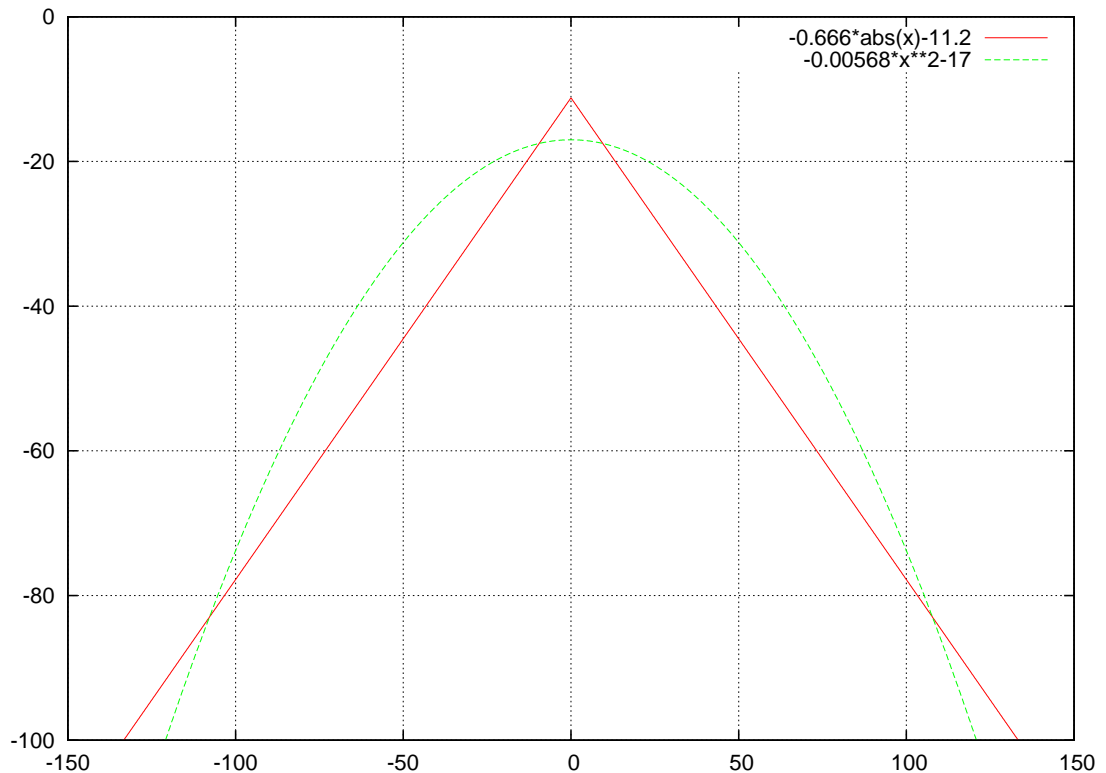


Abbildung 5.16: FM-Spektren im Vergleich (Pegel in dBm, Frequenz in kHz)

Um zur Schutzabstandsmessung FM gegenüber FM vergleichbar zu bleiben, wird für 16-QAM eine Verschlechterung des SNR von 31 auf 25 dB, also um 6 dB betrachtet. Nach [15] benötigt 16-QAM ein SNR von mindestens 25 dBm, um eine Bitfehlerrate von 10^{-4} zu erreichen. Das SNR von 31 dB entsteht durch das Rauschen des AWGN-Kanals. Bei einer Signalleistung von 0 dBm beträgt der Rauschpegel -31 dBm. Damit die Störleistung (Summe aus Störer und Grundrauschen im Kanal) -25 dBm nicht überschreitet, darf der Störer eine Leistung im Nutzkanal von -26,25 dBm haben. Dies ergibt sich aus:

$$P_s = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{-25 \text{ dBm}}{10 \text{ dBm}}} - 10^{\frac{-31 \text{ dBm}}{10 \text{ dBm}}} \right) \text{ dBm} \quad (5.5)$$

Mit diesen Werten kann nun die Schutzabstandskurve ermittelt werden. Dazu wird das Störsignal mathematisch über die Empfängereingangsfunktion hinweggeschoben und für jeden zu betrachtenden Frequenzoffset die Leistung des Störers im Nutzkanal bestimmt. Dies erfolgt mittels numerischer Integration der Störfunktion über einen 100 kHz breiten Bereich. Nach Addition der erlaubten Störleistung erhält man den entsprechenden Schutzabstand. Abbildung 5.17 zeigt die resultierenden Schutzabstandskurven für 16-QAM:

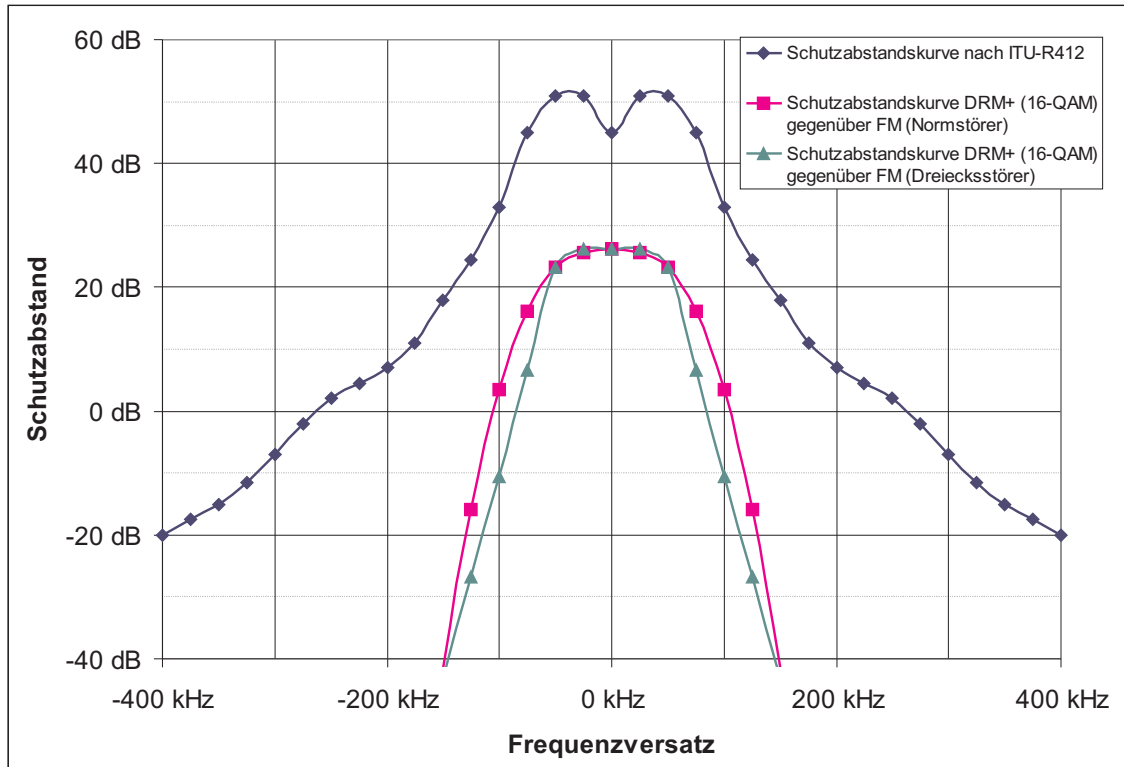


Abbildung 5.17: Schutzabstand DRM+ (16-QAM)- FM

Für 4-QAM wird analog vorgegangen, hier wird eine Verschlechterung des SNR von 21 auf 15 dB betrachtet. Dabei darf die Leistung des Störers im Kanal -16,25 dBm nicht überschreiten. Abbildung 5.18 zeigt die Ergebnisse:

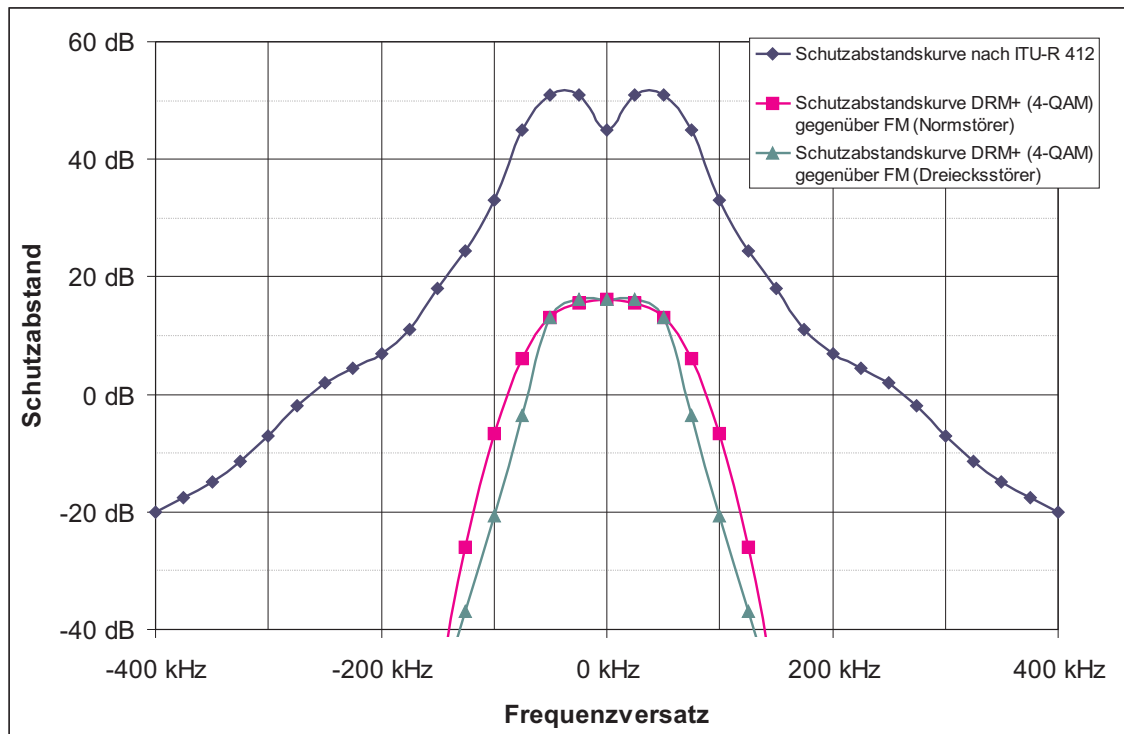


Abbildung 5.18: Schutzabstand DRM+ (4-QAM)- FM

Man erkennt, dass die Kurven für den Schutz von DRM+ deutlich unter der ITU-Schutzabstandskurve liegen (um mindestens 18,9 bzw. 29 dB). Die beiden betrachteten FM-Spektren unterscheiden sich im Schutzabstand nur geringfügig. Da der Normstörer im Bereich bis 100 kHz über den Dreiecksstörer hinausragt, sind die Schutzabstandswerte schlechter. Die hier dargestellten Berechnungen beinhalten eine gewisse Sicherheit, da mit einem benötigten SNR von deutlich unter den verwendeten Werten von 25 bzw. 15 dB gerechnet werden kann. Diese Werte stellen allerdings nur eine theoretische Betrachtung dar, die im Versuch verifiziert werden muss. Vor allem der Bereich des Nachbarkanal-Störers erfordert eine gewisse Aufmerksamkeit, da sich das Verhalten des Empfängers bei starken Störsignalen nur im Versuch ermitteln lässt.

5.3 FM gegenüber HD-Radio

5.3.1 Ergebnisse der Laboruntersuchungen

Die Verträglichkeit von HD-Radio mit FM wurde ebenfalls an der FH Kaiserslautern untersucht. Die vollständigen Ergebnisse können in [1] nachgelesen werden. An dieser Stelle wird eine repräsentative Auswahl aus den Ergebnissen der Labormessungen präsentiert. Abbildung 5.19 zeigt das Ergebnis für den JVC-Empfänger im Vergleich mit der ITU-Schutzabstandskurve.

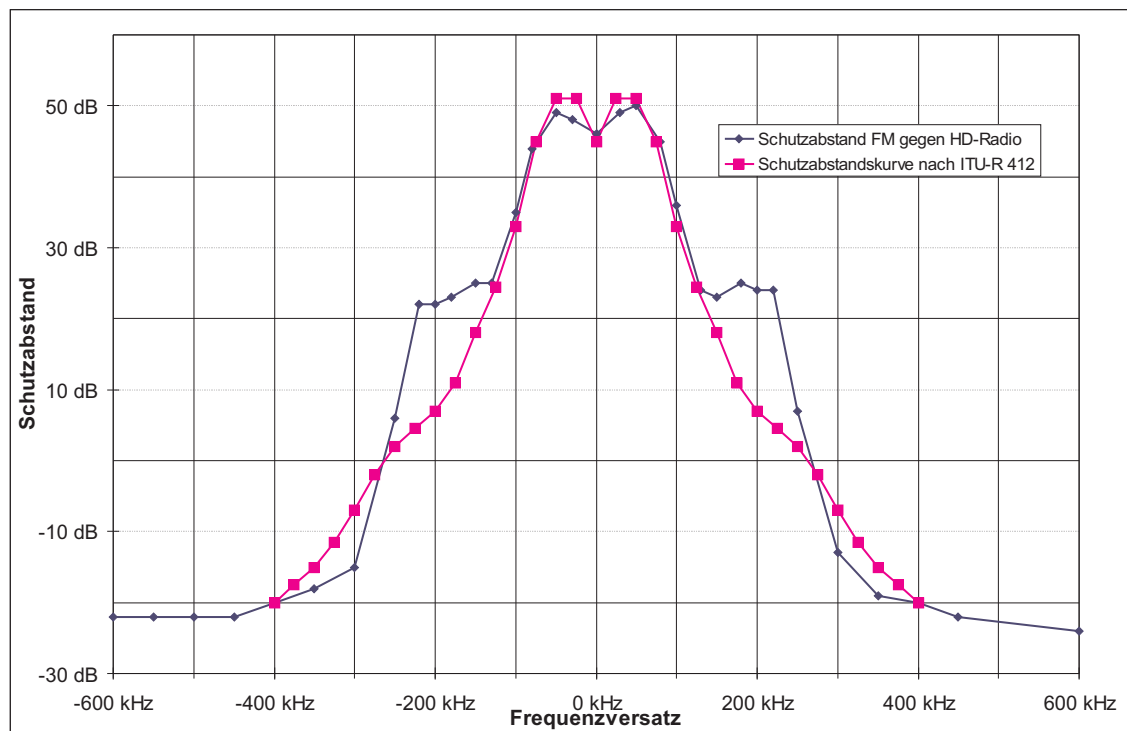


Abbildung 5.19: Schutzabstand FM-HD-Radio im Vergleich zur ITU-Kurve

Wie aus der Betrachtung des HD-Radio-Signals zu erwarten war, wird die ITU-Schutzabstandskurve in einem Bereich von 130 kHz bis 250 kHz Versatz um bis zu 17 dB verletzt. Das bedeutet vor allem für die Sender in 200 kHz Abstand ist ein höheres Störpotential zu erwarten. Da diese Störungen durch gewollte Aussendungen

im Nachbarkanal erzeugt werden und nicht durch Mischprodukte und Nebenausendungen, sind sie nicht ohne Funktionseinbußen zu beschränken. Es steht nicht zu erwarten, dass diese Störungen in der Feldsituation geringer ausfallen als im Labor. Zusätzlich ist zu beobachten, dass der Abstand der restlichen Kurve von der ITU-Maske wesentlich geringer als bei der Messung des Schutzabstandes FM gegenüber FM (mit dem selben Empfänger) ist. Dies deutet darauf hin, dass der Sender darauf optimiert ist, die Sendermaske gerade einzuhalten.

5.3.2 Auswirkungen auf die Planungsparameter

Wenn man die Gültigkeit der ITU-Schutzabstandskurve nicht anzweifelt, kann die entsprechende Kurve für HD-Radio an keiner Stelle unter dieser liegen, da im HD-Radio-System ein normales FM-Signal integriert ist. Die in Abbildung 5.20 gezeigte Kurve setzt sich aus der ITU-Schutzabstandskurve mit an die Messergebnisse angelehnten Höckern zusammen. Bei diesen Höckern handelt es sich um die durch die Digitalpakete erzeugten Störungen. Alle untersuchten Empfänger zeigten in diesen Bereichen fast übereinstimmend Schutzabstandswerte von 25 dB.

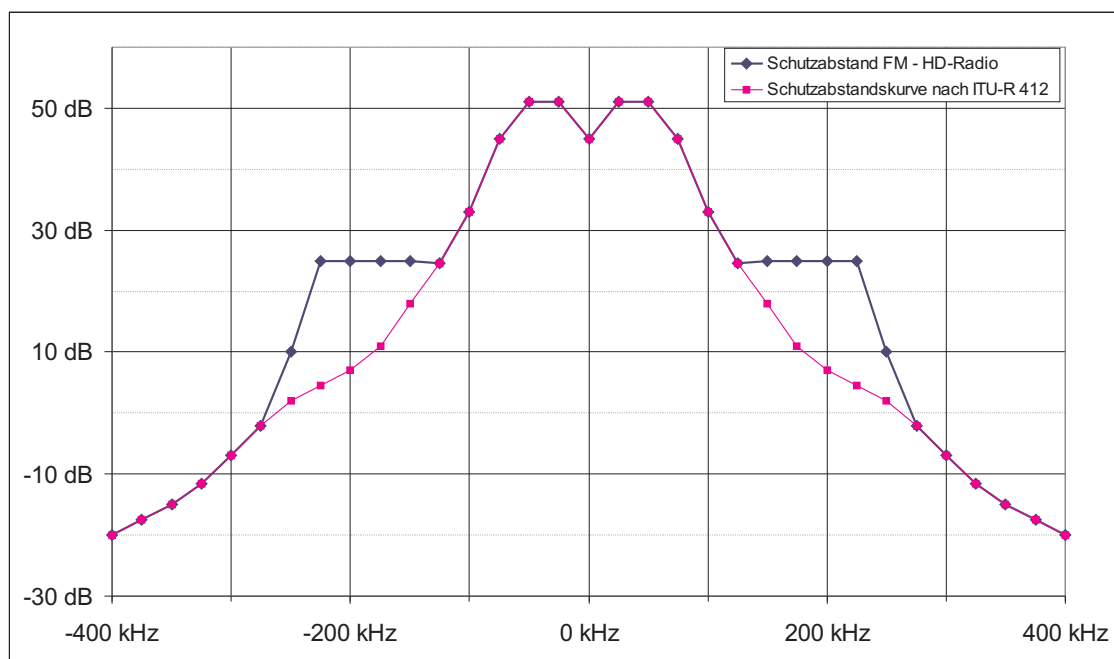


Abbildung 5.20: Planungsvorschlag Schutzabstand FM-HD-Radio

Aus Sicht des Laborversuches muss diese Schutzabstandskurve beachtet werden, um einen vergleichbaren Schutz von FM gegen HD-Radio wie von FM gegenüber FM zu erhalten.

5.4 HD-Radio gegenüber FM

Es wurden während der Labormessungen auch Versuche angestellt, wie sich HD-Radio bei einer Beeinflussung durch einen FM-Störer verhält. Arbeitet der Empfänger im analogen Modus, so ist die Störsicherheit genau wie bei FM. Sobald der

Empfänger digital arbeitet, kann keine Schutzabstandskurve üblicher Form angegeben werden. Solange nur ein digitales Seitenband gestört ist, bleibt der Empfang unabhängig von der Stärke der Störung konstant gut. Kommt allerdings dann noch eine Störung im zweiten Seitenband hinzu, bricht der Empfang sofort ab und der Empfänger schaltet in den analogen Modus zurück.

5.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Verträglichkeit von DRM+ mit FM kritisch ist. Wie gravierend diese Verträglichkeitsprobleme sind, ist stark situationsabhängig. Damit lassen sich auch die deutlich unterschiedlichen Ergebnisse des Feldversuchs zu den Labormessungen erklären. Der hohe Crest-Faktor des DRM+-Signals wurde als Quelle der Beeinträchtigungen ausgemacht. Verfahren zur Verbesserung der Verträglichkeit müssen an dieser Stelle ansetzen, um eine Erfolgschance zu haben. Die Verträglichkeit in der Gegenrichtung (FM mit DRM+) ist theoretischen Betrachtungen zu Folge unkritisch, muss aber noch praktisch untersucht werden.

Die Verträglichkeit von HD-Radio mit FM ist kritisch. Dies folgt aus der hohen Bandbreite des HD-Radio-Signals, das auch die FM-Sendermaske verletzt. Durch das proprietäre Verfahren sind Maßnahmen zur Verbesserung der Verträglichkeit nicht möglich, ein Einsatz wäre nur unter geänderten Randbedingungen für die Netzplanung möglich.

Kapitel 6

Möglichkeiten zur Verbesserung der Verträglichkeit

Die Verträglichkeit von DRM+ mit FM ist nach den Testergebnissen im Labor deutlich, im Feld immer noch leicht schlechter als die Verträglichkeit von FM mit FM. Wie Kapitel 5.1.3 zeigt, sind diese Verträglichkeitsprobleme hauptsächlich mit dem hohen Crestfaktor des DRM+-Signals zu erklären. Der Crestfaktor ist definiert als das Verhältnis von Spitzenleistung zu mittlerer Leistung eines Signals. In der Literatur findet man auch die Bezeichnung peak-to-average-power (PAP). Vielfach ist der Crestfaktor auch definiert als das Verhältnis von Spitzenamplitude zu RMS-Wert. Diese Crestfaktor-Angaben sind um 3 dB höher als die hier verwendeten. Eine Lösungsmöglichkeit für das Crestfaktor-Problem wäre ein komplett anderes Modulationsverfahren mit konstanter Hüllkurve, zum Beispiel Continuous Phase Modulation (CPM). Allerdings haben diese Verfahren wesentliche Nachteile, so fehlt die Gleichwellenfähigkeit, die spektrale Effizienz ist deutlich geringer und die Empfängertechnik wird aufwändiger. Als gangbarer Weg bleibt also nur die Reduktion des effektiven Crestfaktors am Empfängereingang. Die kann grundsätzlich über zwei verschiedene Wege erfolgen. Als erste Möglichkeit kann der Crestfaktor des DRM+-Signals an sich reduziert werden. Die zweite Möglichkeit setzt nicht beim Sender an, sondern bei der Netzplanung. Mit Hilfe von Gleichwellennetzen oder FM-Signalen (Hybrid-Modus) kann die Feldstärke der DRM+-Sender deutlich unter der FM-Feldstärke gehalten werden, was den effektiven Crestfaktor deutlich senkt.

6.1 Effektiver Crestfaktor

Entscheidend dazu ist nicht der Crestfaktor eines einzelnen Signals, sondern der Crestfaktor innerhalb der HF-Bandbreite des Empfängers. Am ersten Mischer des Empfängers (und damit an der kritischen Stelle) liegt ein, abhängig von der Vorselektion, mehrere Megahertz breites Frequenzband an. Die AGC regelt auf den Summenpegel aus allen Signalen in diesem Bereich. Abbildung 6.1 zeigt beispielhaft die Belegung des UKW-Bandes in Stuttgart Vaihingen. Der grün hervorgehobene Bereich befindet sich bei einem auf 102,0 MHz abgestimmten durchschnittlichen Empfänger im Durchlassbereich der Vorselektion. Der vom Empfänger zu verarbeitende Crestfaktor wird über diesen ganzen Bereich gebildet.

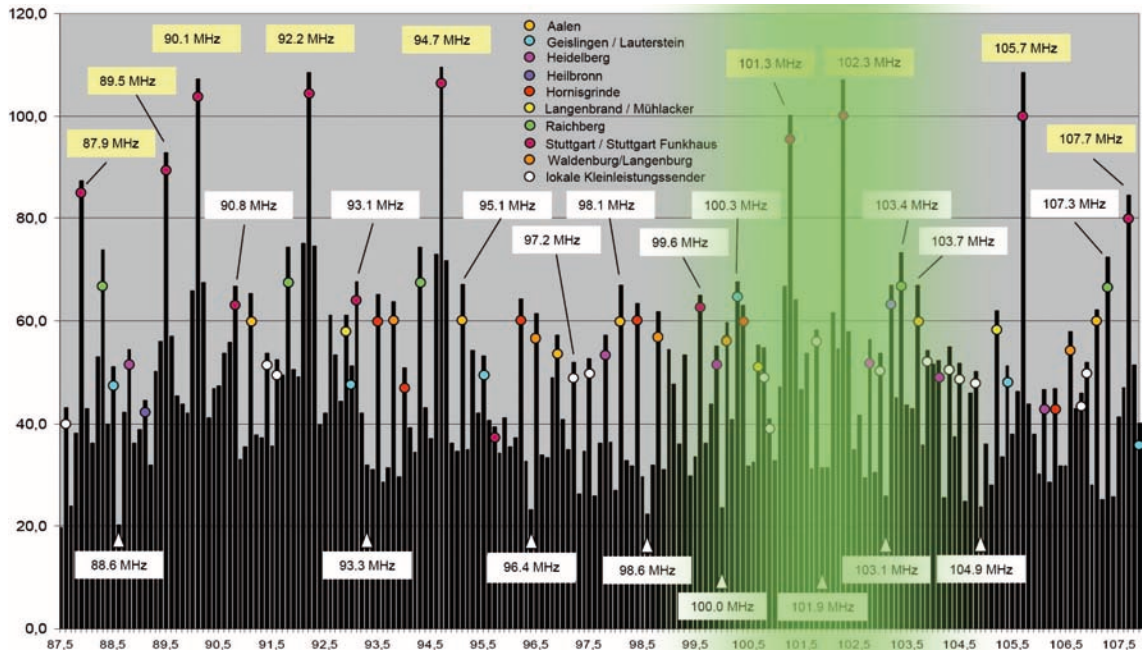


Abbildung 6.1: Belegung des UKW-Bandes in Stuttgart - Feldstärken in $dB\mu V/m$ [26]

6.1.1 Crestfaktor bei Überlagerung von FM-Signalen

Während ein einzelnes, ideal frequenzmoduliertes Signal einen Crestfaktor von 0 dB hat, ergibt sich bei Überlagerung mehrerer unkorrelierter Signale ein erhöhter Crestfaktor, da die Spitzenleistungen linear addiert werden [6], während die mittleren Leistungen nur quadratisch addiert werden. Falls mehrere Sender der gleichen Feldstärke und gleichen Crestfaktors vorliegen, kann der Summen-Crestfaktor durch folgende Formel bestimmt werden:

$$CF = 10\log_{10}(n) + CF_c, \quad (6.1)$$

wobei n die Anzahl der zu addierenden Signale und CF_c den Crestfaktor eines einzelnen Signals darstellt. Allgemein berechnet sich der Summen-Crestfaktor wie folgt:

$$CF = 20\log_{10}\left(\sum_{k=0}^n 10^{\frac{E_k + CF_k}{20dB}}\right) - 10\log_{10}\left(\sum_{k=0}^n 10^{\frac{E_k}{10dB}}\right), \quad (6.2)$$

wobei E_k die Feldstärke des k -ten Signals und CF_k den Crestfaktor des k -ten Signals darstellt. So ergibt sich bei Addition von 2 FM-Sendern gleicher Feldstärke ein Crestfaktor von 3 dB. Im Beispiel reicht es, die beiden Sender auf 101,3 MHz ($100dB\mu V/m$) und 102,3 MHz ($107dB\mu V/m$) zu betrachten. Dabei ergibt sich eine mittlere Feldstärke von $107,79dB\mu V/m$ und eine Spitzenfeldstärke von $110,2dB\mu V/m$. Dies entspricht einem Crestfaktor von 2,41 dB. Bei einer Überlagerung von drei Sendern gleicher Leistung ergibt sich ein Crestfaktor von 4,7 dB. Während dieser Fall in der Realität durchaus auftreten könnte, kann man davon ausgehen, dass Crestfaktoren über 6 dB hinreichend selten vorkommen, um von den Empfängerherstellern als nicht relevant erachtet zu werden. Das bedeutet, dass FM-Empfängern wahrscheinlich ein effektiver Crestfaktor von bis zu 6 dB zugemutet werden könnte, ohne dass es zu Störungen kommt. Der genaue Wert ist nur durch Messungen zu ermitteln, er ist stark empfängerabhängig.

6.1.2 Crestfaktor bei der Überlagerung von DRM+-Signalen mit FM-Signalen

Für den DRM+-Sender wird ein Crestfaktor von 9 dB angesetzt, der auch messtechnisch am Versuchsmodell bestätigt wurde. Bei Überlagerung eines FM-Signals und eines DRM+-Signals gleicher Leistung ergibt sich ein Crestfaktor von 8 dB. Falls das DRM+-Signal 5 dB schwächer als das FM-Signal ist, ergibt sich ein Crestfaktor von 5,2 dB, bei 10 dB Pegelunterschied einer von 4,66 dB. Ab einem Pegelunterschied von 6 dB unterschreitet der Summen-Crestfaktor den angepeilten Wert von 5 dB.

Das heisst, solange nur einzelne, lokale Sender auf DRM+ umgestellt werden, ist höchstens im Umkreis des Senders mit Problemen durch den Crestfaktor zu rechnen. Sobald allerdings die großen FM-Sender aufgrund von Umstellungen wegfallen und durch DRM+-Sender ersetzt werden, sind Störungen der verbleibenden FM-Sender möglich.

Dies soll durch eine Betrachtung der sechs stärksten Sender im Bereich von 100 bis 104 MHz in Stuttgart exemplarisch dargestellt werden. Zuerst wird der Crestfaktor und der Summenpegel für die jetzige Situation bestimmt. Daraufhin werden 3 Szenarien betrachtet. Einmal eine Umstellung des Senders bei 100,3 MHz auf DRM+, dann auch unter Wegfall der beiden stärksten Sender (Umstellung auf DAB), zum dritten eine Umstellung der Sender bei 100,3 MHz sowie bei 101,3 MHz und 102,3 MHz auf DRM+. Der Pegel der DRM+-Sender ist um jeweils 5 dB abgesenkt, da dieser Wert nach den Ergebnissen des Feldversuchs verträglich erscheint. Die Reichweite bei einer Leistungsabsenkung um 5 dB ist nach ersten Simulationsrechnungen deutlich größer als die FM-Reichweite. Tabelle 6.1 zeigt die Ergebnisse der Betrachtung im Überblick (F $\hat{=}$ FM, D $\hat{=}$ DRM+):

Tabelle 6.1: Betrachtung zur Umstellung auf DRM+ (DRM+ um 5 dB abgesenkt)

Sender	aktuell	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
100,3 MHz	F 68 dB μ V/m	D 63 dB μ V/m	D 63 dB μ V/m	D 63 dB μ V/m
101,3 MHz	F 100 dB μ V/m	F 100 dB μ V/m	entfällt	D 95 dB μ V/m
102,3 MHz	F 107 dB μ V/m	F 107 dB μ V/m	entfällt	D 102 dB μ V/m
103,2 MHz	F 67 dB μ V/m	F 67 dB μ V/m	F 67 dB μ V/m	F 67 dB μ V/m
103,4 MHz	F 75 dB μ V/m	F 75 dB μ V/m	F 75 dB μ V/m	F 75 dB μ V/m
103,7 MHz	F 67 dB μ V/m	F 67 dB μ V/m	F 67 dB μ V/m	F 67 dB μ V/m
Feldstärke	107,8 dB μ V/m	107,8 dB μ V/m	76,4 dB μ V/m	102,8 dB μ V/m
Crestfaktor	2,75 dB	2,78 dB	6,57 dB	11,64 dB

Eine Umstellung eines einzelnen Senders kleiner Leistung hat keinen relevanten Einfluss auf den Crestfaktor. Wenn dann jedoch die starken Sender durch Umstellung auf DAB wegfallen, so wird der Crestfaktor selbst ohne DRM+ deutlich ansteigen (mehrere Sender ähnlicher Leistung). Wenn Sender 1 in diesem Szenario auf DRM+ verbleiben würde, wäre der Crestfaktor immer noch 5,21 dB. Besonders kritisch wird die Situation, falls sich die Betreiber stärkerer Sender zur Umstellung auf DRM+ entscheiden sollten. Man sieht, dass eine Betrachtung von Techniken zur Reduktion des Crestfaktors erforderlich ist.

Falls sich im Bereich von 2 MHz um den DRM+-Sender herum starke FM-Sender befinden, so ist die Störsituation deutlich besser, als wenn der DRM+-Sender der

stärkste Sender im frequenzmäßigen Umfeld ist. Abbildung 6.2 zeigt zwei verschiedene Schutzabstandskurven. Die unkritische Schutzabstandskurve kann in den meisten Fällen (Lokalsender im normalen FM-Umfeld) angewendet werden. Bei schwierigeren Bedingungen bewegt sich diese Schutzabstandskurve auf die Laborkurve zu, die den Worst Case darstellt. Diese Laborkurve ist eine Schranke, diese wird im Feld nicht unterschritten werden.

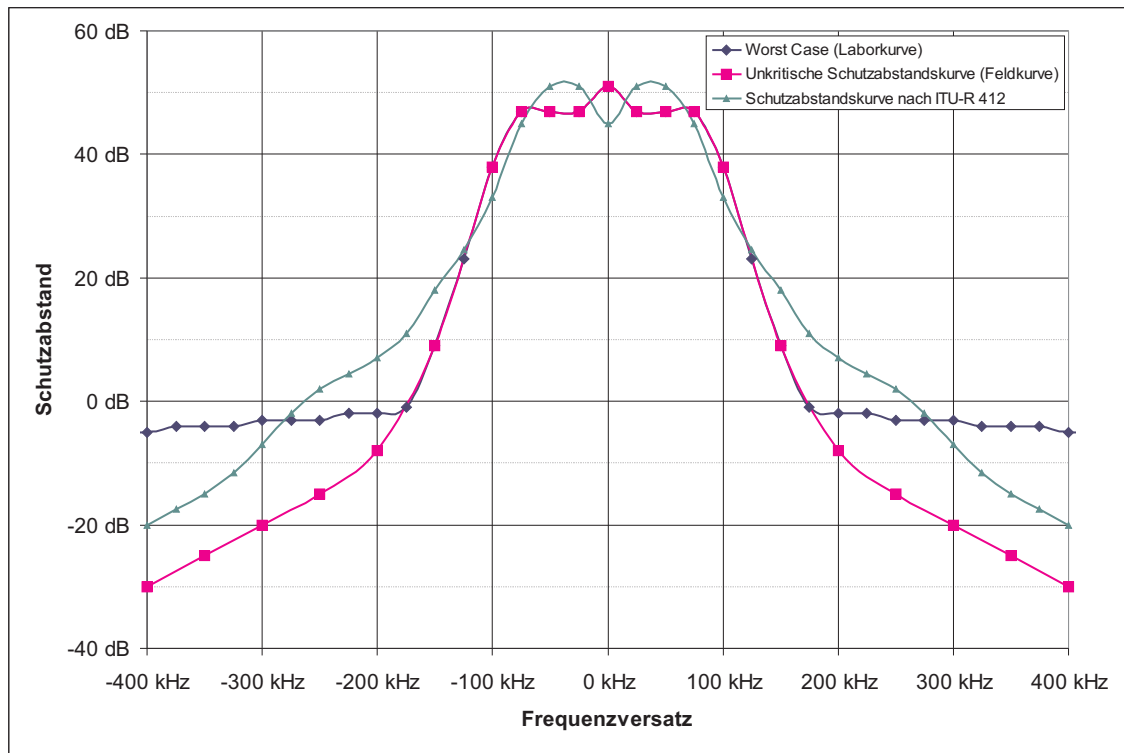


Abbildung 6.2: Kritische und unkritische Schutzabstandskurve für DRM+

6.2 Techniken zur Reduktion des Crestfaktors des DRM+-Signals

Ein OFDM-Signal hat von Natur aus einen hohen Crestfaktor, der an den von weißem Rauschen heranreicht. Wie Kapitel 5.1.3 zeigt, hat der Crestfaktor des DRM+-Signals einen entscheidenden Einfluss auf die Verträglichkeit. Bei einem hohen Crestfaktor müssen Verstärker zudem mit einem hohen Input-Backoff betrieben werden, um Ausserband-Störungen zu begrenzen. Es ist also ein lohnendes Unterfangen, über die Reduktion des Crestfaktors nachzudenken. Es gibt im wesentlichen drei Gruppen von Verfahren, mit denen der Crestfaktor reduziert werden kann [23], [24]. Bei der ersten Gruppe handelt es sich um Verzerrungs-Techniken. Zu diesen Techniken gehört Clipping, Fensterung und Spitzenunterdrückung. Bei der zweiten Gruppe handelt es sich um spezielle algebraische Codes, die den Crestfaktor reduzieren. Beim dritten Verfahren wird jedes OFDM-Symbol mit verschiedenen Verwürfelungs-Sequenzen bearbeitet und das resultierende Signal mit dem geringsten Crestfaktor ausgewählt.

Diese Verfahren werden im Weiteren genauer vorgestellt, wobei das Hauptaugenmerk auf den Verzerrungstechniken liegt. Diese Techniken können im Sender

umgesetzt werden und erfordern keine Änderungen am Empfänger. Alle Verfahren wurden in [23] und in [24] vorgestellt.

6.2.1 Verzerrungs-Verfahren

Clipping

Beim Clipping werden die Spitzenwerte des OFDM-Signals hart begrenzt. Clipping ist das einfachste Verfahren zur Begrenzung des Crestfaktors. Allerdings werden die Ausserbandaussendungen durch die nichtlineare Verzerrung des Signals deutlich erhöht. Das Clipping lässt sich als Multiplikation des OFDM-Signals mit einem Rechteck-Fenster darstellen. Im Frequenzbereich ergibt sich daraus eine Faltung des OFDM-Spektrums mit dem Rechteck-Spektrum. Da das Rechteck-Spektrum sehr breit ist, wird das resultierende Spektrum ebenfalls breiter als das ursprüngliche OFDM-Spektrum sein. Die Bitfehlerrate wird durch das Clipping ebenso beeinträchtigt. Ein von 16 dB auf 5 dB geclipptes OFDM-Signal benötigt im AWGN-Kanal ein um 1 dB höheres SNR, um eine Bitfehlerrate von 10^{-2} zu erreichen [23].

Fensterung

Die Probleme, die beim Clipping auftreten, lassen sich durch die Wahl einer geeigneten Fensterung wesentlich reduzieren. Dazu muss zuerst der Zeitpunkt der Spitze ermittelt werden und das Fenster entsprechend verschoben werden. Dabei muss das Signal zwischengespeichert und verzögert werden. An die Fensterfunktion bestehen zwei gegensätzliche Anforderungen. Zum einen soll sie so schmalbandig wie möglich sein, um die Ausserbandaussendungen nicht zu erhöhen. Auf der anderen Seite soll die Funktion eine geringe zeitliche Ausdehnung haben, um nicht zu viele Samples zu beeinträchtigen, was die Bitfehlerrate deutlich ansteigen lässt. Ein von 16 dB auf 5 dB gefensterteres OFDM-Signal benötigt im AWGN-Kanal ein um 1,5 dB höheres SNR, um eine Bitfehlerrate von 10^{-2} zu erreichen [23]. Man tauscht also Ausserbandauswirkungen gegen Bitfehlerrate ein.

Spitzenunterdrückung

Die beiden vorher beschriebenen Verfahren setzen nichtlineare Verzerrungen ein, um das OFDM-Signal zu begrenzen. Die Spitzenunterdrückung ist dagegen ein lineares Verfahren. Hier wird eine zeitlich verschobene und skalierte Referenzfunktion vom OFDM-Signal subtrahiert. Diese Referenzfunktion sollte so gewählt werden, dass ihr Spektrum nicht größer als das des OFDM-Signals ist. Da die Fourier-Transformation bezüglich der Addition linear ist, erhält man spektral das ursprüngliche Signal abzüglich der Fourier-Transformierten der Referenzfunktion. Die sinc-Funktion ist spektral sehr gut geeignet, hat aber eine unendliche zeitliche Ausdehnung. Durch Multiplikation mit einer Fensterfunktion lässt sich die zeitliche Ausdehnung begrenzen. Dabei werden die spektralen Eigenschaften nur geringfügig verschlechtert. Die Länge der Fensterfunktion kann variiert werden, um eine Abwägung zwischen Komplexität der Signalverarbeitung und Ausserbandstrahlung zu erreichen. Bei geeigneter Wahl der Parameter erhöht sich die Ausserbandstrahlung so gut wie nicht. Allerdings wird das erforderliche SNR um 1,2 dB angehoben (Bitfehlerrate 10^{-2}).

Mathematisch entspricht die Spitzenunterdrückung einem Clipping mit anschließender idealer Tiefpassfilterung des Ausgangssignals. Da bei der Basisbanderzeugung nach Hinzufügen des Guard-Intervalls sowieso gefiltert werden muss, bietet sich dieses Verfahren an, da der Zusatzaufwand gering ist. Die Verschlechterung der Bitfehlerrate ist nicht zu vermeiden, ist aber noch in einem tolerablen Rahmen, wenn die Reduktion des Crestfaktors nur im wirklich benötigten Umfang vorgenommen wird. Eine Reduktion von 16 bis auf 6 dB Crestfaktor erhöht das benötigte SNR im gleichen Maße wie eine Reduktion von 6 auf 5 dB (jeweils 0,6 dB) [6].

Die Verschlechterung des SNR erfasst die Situation bei DRM+ nur bedingt. Da ein Großteil der OFDM-Symbole unter der gesetzten Schwelle liegt, werden wenige amplitudenstarke Symbole stark verformt. Dieser Effekt kann von der FEC (Forward Error Correction) einfach reduziert werden, wenn ein zeitliches Interleaving der Sendesymbole erfolgt (dies ist bei DRM+ der Fall). Falls man diesen Effekt ausschalten möchte, kann ein iteratives Verfahren eingesetzt werden. Hier wird bei jedem OFDM-Symbol überprüft, ob die Verzerrung ein tolerables Maß überschreitet. Ist das der Fall, wird eine andere Begrenzungsfunktion angewendet. Diesem Vorteil steht der Nachteil des hohen Aufwandes für die Signalverarbeitung entgegen. So muss das Sendesignal für die Prüfung verzögert werden und es müssen mehrere Begrenzungsfunktionen mit unterschiedlichen Eigenschaften eingesetzt werden. Die Crestfaktor-Begrenzung bei HD-Radio arbeitet zum Beispiel nach dieser Methode.

6.2.2 Codierung zur Reduktion des Crestfaktors

Da der Crestfaktor durch nur wenige OFDM-Symbole erzeugt wird, kann man diese Symbole vermeiden. Dies geschieht systematisch durch eine spezielle Codierung des Sendesignals. Es kann gezeigt werden, dass es einen Code gibt, der bei einer Code rate von $3/4$ einen Crestfaktor von 3 dB erzeugt [24]. Dies sagt allerdings nur aus, dass ein solcher Code prinzipiell existiert, macht aber keine Aussagen darüber, wie man diesen Code auf eine systematische Weise erzeugt und wieder decodiert oder wie die Fehlerkorrektureigenschaften eines solchen Codes sind. Viele der simulativ gefundenen Codes gehören zur Klasse der komplementären Golay-Sequenzen. Bei Golay-Sequenzen ist die Autokorrelationsfunktion für alle von Null verschiedenen Zeitpunkte gleich Null. Es gibt in dieser Klasse einige Codes, die einen niedrigen Crestfaktor mit guten Fehlerkorrektureigenschaften kombinieren. Dadurch kann auf eine zusätzliche Codierung zum Fehlerschutz verzichtet werden. Allerdings sind diese Codes nicht so gut wie die klassischen Block- oder Faltungscodes, die zudem wesentlich einfacher zu erzeugen sind. Auch bei den komplementären Codes tauscht man Übertragungskapazität gegen einen niedrigen Crestfaktor ein, da sich der Symbolvorrat deutlich reduziert. Eine tiefere Einführung in diese Verfahren findet sich in [23] und [24].

6.2.3 Verwürfelungsverfahren

Beim Verwürfelungsverfahren wird jedes OFDM-Symbol mit mehreren verschiedenen Interleaver-Sequenzen bearbeitet und die Variante mit dem geringsten Crestfaktor ausgewählt. Für den Fall, dass für jedes Symbol k Interleaver-Sequenzen zur Verfügung stehen, reduziert sich die Wahrscheinlichkeit p , dass ein bestimmter Wert überschritten wird auf p^k . Dieses Verfahren reduziert also nur die Wahrscheinlich-

keit des Auftretens von Symbolen mit hohem Crestfaktor, ganz verhindern kann es dies nicht. Da die Spitzenwerte deutlich seltener auftreten, hat eine dort stattfindende Begrenzung keine so starken Auswirkungen wie beim normalen OFDM-Signal. Es ist sinnvoll, dem Empfänger auf irgendeinem Weg mitzuteilen, welche Interleaver-Sequenz verwendet wurde, damit dieser nicht alle Möglichkeiten durchprobieren muss. Dies kann zum Beispiel über die Phase eines Piloten erfolgen. Es existiert auch die Möglichkeit, zufällige Phasen-Umtast-Sequenzen auf das Signal anzuwenden, um den Crestfaktor zu senken [27]

6.2.4 Anwendbarkeit bei DRM+

Tabelle 6.2 stellt die Stärken und Schwächen der einzelnen Verfahren gegenüber:

Tabelle 6.2: Vergleich der verschiedenen Verfahren zu Reduktion des Crestfaktors

Verfahren	Crestfaktor	Störwirkung	Kanalkap.	Anwendbarkeit
Clipping	++	-	o	++
Fensterung	++	o	-	+
Spitzenunterdrückung	++	++	o	++
Codierung	+	++	-	-
Verwürfelung	o	++	-	-

Ohne Veränderungen am DRM+-Standard reduzieren sich die Möglichkeiten zur Begrenzung des Crestfaktors deutlich (Spalte Anwendbarkeit). Das Verwürfelungsverfahren und die komplementären Codes verlangen Modifikationen am Übertragungsstandard und damit an Sender und Empfänger. Der Vorteil der Verzerrungsverfahren ist, dass diese nur durch Modifikationen am Sender umgesetzt werden können. Besonders geeignet hierzu ist die Spitzenunterdrückung, da nur ein einfaches Clipping des OFDM-Signals vor dem digitalen FIR-Filter erforderlich ist und die Ausserbandaussendungen (Spalte Störwirkung) nicht erhöht werden. Zusätzlich wird die Kanalkapazität nicht mehr als erforderlich abgesenkt. Außerdem kann mit diesem Verfahren ein beliebig niedriger Crestfaktor garantiert werden (Spalte Crestfaktor). Einen ähnlichen Effekt erreicht man auch, wenn der Endverstärker das Signal weich begrenzt und am Ausgang ein steilflankiges Bandpassfilter eingesetzt wird. Allerdings sinkt dadurch die Kanalkapazität mehr als es bei einer Begrenzung vor der D/A-Wandlung der Fall wäre.

Tabelle 6.3 zeigt ein ähnliches Szenario wie Tabelle 6.1, es wurde nur der Crestfaktor des DRM+-Signals durch Spitzenunterdrückung auf 5 dB begrenzt.

Tabelle 6.3: Betrachtung zur Umstellung auf DRM+ - reduzierter Crestfaktor
(Leistungsreduktion DRM+ 5 dB)

Sender	aktuell	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
100,3 MHz	F 68 dB μ V/m	D 63 dB μ V/m	D 63 dB μ V/m	D 63 dB μ V/m
101,3 MHz	F 100 dB μ V/m	F 100 dB μ V/m	entfällt	D 95 dB μ V/m
102,3 MHz	F 107 dB μ V/m	F 107 dB μ V/m	entfällt	D 102 dB μ V/m
103,2 MHz	F 67 dB μ V/m	F 67 dB μ V/m	F 67 dB μ V/m	F 67 dB μ V/m
103,4 MHz	F 75 dB μ V/m	F 75 dB μ V/m	F 75 dB μ V/m	F 75 dB μ V/m
103,7 MHz	F 67 dB μ V/m	F 67 dB μ V/m	F 67 dB μ V/m	F 67 dB μ V/m
Feldstärke	107,8	107,8	76,4	102,8
Crestfaktor	2,75 dB	2,75 dB	5,62 dB	7,74 dB
Differenz	0 dB	-0,03 dB	-0,95 dB	-3,9 dB

Man sieht deutlich, dass sich der Summencrestfaktor vor allem im kritischen Szenario 3 deutlich reduziert hat. Eine weitere Reduktion des Crestfaktors um 1 dB reduziert den Summencrestfaktor in Szenario 3 nochmals um knapp 1 dB auf 6,77 dB. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass man es je nach Bedarf anwenden kann, wenn die Störsituation es erfordern sollte. Auf diese Weise werden nur die Stationen mit einem schlechteren SNR belastet, bei denen es erforderlich ist. Nach Abschaltung der analogen Sender kann die Reduktion abgeschaltet werden, wodurch sich entweder die Reichweite der Sender erhöht oder die Leistung reduziert werden kann. Falls eine Reduktion des Crestfaktors auf 4 dB bis 5 dB gelingt, kann möglicherweise die kritische Schutzabstandsmaske (siehe Abbildung 6.2) der unkritischen angenähert werden oder ganz entfallen.

6.3 Gleichwellennetze

Wie bereits angesprochen ist DRM+ gleichwellentauglich. Das Guard-Intervall lässt mit bis zu 60 km Senderabstand auch große Gleichwellennetze zu. Zur Versorgung kleinerer Gebiete (lokale Veranstalter) sind kleine Gleichwellennetze möglich, die nicht nur bei der Verträglichkeit sondern möglicherweise auch in finanzieller Hinsicht Vorteile bieten. In Gleichwellennetzen sind die Pegelverhältnisse wesentlich homogener als bei Versorgung durch einen einzelnen Sender.

6.3.1 Kleine Gleichwellennetze

Kleine Gleichwellennetze eignen sich zur Abdeckung einer Stadt oder einer kleinen Region. Sie kommen ohne die traditionellen hohen Senderstandorte aus, hier reichen kleine Standorte mit einfachen Antennen. Durch den Mobilfunk existieren bereits viele geeignete Antennenstandorte. Vor allem die Mastspitzen, die zum Einsatz einer Groundplane geeignet wären, sind seit Umstellung des Mobilfunks auf Sektorantennen vielfach frei.

Eine Stadt von der Größe Kaiserslauterns sollte durch drei bis vier Kleinleistungssender im Bereich von 10 W bis 50 W vollständig zu versorgen sein. Durch die homogene Feldstärkeverteilung und den Empfang aus mehreren Richtungen wirken

sich Abschattungen in städtischem Gelände wesentlich weniger aus, Empfangsausfälle bei mobilem Empfang nehmen ab. Zusätzlich wird der In-House-Empfang erheblich verbessert. Für die Verträglichkeit ist die geringe Feldstärke außerhalb des versorgten Gebietes von Vorteil. Dies rührt daher, dass die Antennen niedrig montiert sind und die Sender mit geringer Leistung arbeiten. Dadurch kann eine Frequenz deutlich häufiger wiederholt werden, was eine effizientere Frequenznutzung ermöglicht. Durch die homogene Feldstärkeverteilung gibt es fast keine Gebiete, in denen der effektive Crestfaktor auch ohne Maßnahmen zur Verminderung des Crestfaktors des DRM+-Signals ein tolerables Maß überschreitet. Drei kleinere Standorte könnten sich möglicherweise auch finanziell gegenüber einem größeren Standort lohnen. Dazu müssen allerdings günstige Sender im Leistungsbereich um die 10 W zur Verfügung stehen. Da heute IP-basierende Netze fast überall zur Verfügung stehen, stellt auch die Signalzuführung keine unüberwindliche Hürde dar.

Für Anwendungen in dieser Netzform ist das Guard-Intervall deutlich überdimensioniert, bei einer Verkürzung des selben könnte die Nutzdatenrate gesteigert werden. Allerdings spezifiziert die DRM+-Spezifikation bislang nur ein mögliches Guard-Intervall von $250 \mu\text{s}$. Für diese kleinen Gleichwellennetze wäre ein Guard-Intervall von $T_g = 83\frac{1}{3} = T\mu\text{s}$ entsprechend 25 km Senderabstand ausreichend. Dadurch kann die Nutzdatenrate um 7,1 % gesteigert werden. Eine weitere Verkürzung auf $T_g = 50\mu\text{s}$ wäre sinnvoll, liegt allerdings nicht im Raster der Vielfachen von T und würde deshalb deutlich erhöhten Aufwand bedeuten.

Alle Betrachtungen, die bis jetzt durchgeführt wurden, beziehen sich auf eine Coderate des MSC von $1/2$. Zusätzlich sieht der Standard Coderaten von 0,33; 0,41 und 0,62 vor. Bei geringeren Bandbreitenanforderung kann die Robustheit des Signals durch die Wahl einer geringeren Coderate deutlich gesteigert werden. Bei gleicher geforderter Reichweite kann die Sendeleistung reduziert und damit die Verträglichkeit nochmals verbessert werden. Für regionale Veranstalter ist auch eine Kombination aus einem zentralen Senderstandort höherer Leistung mit mehreren kleinen Stationen zur Abdeckung von Städten mit ihren schwierigen Empfangssituationen vorstellbar.

6.3.2 Große Gleichwellennetze

Auch große Gleichwellennetze führen zu einer effektiveren Frequenznutzung, da alle Standorte eines Netzes die gleiche Frequenz benutzen und somit insgesamt weniger Frequenzen benötigt werden. Durch Gewinneffekte des Gleichwellennetzes ist auch hier eine Verringerung der Sendeleistung der einzelnen Standorte möglich, was die Verträglichkeit nach außen verbessert. Diese Art der Gleichwellennetze eignet sich hauptsächlich für überregionale Senderketten, für die DAB allerdings ebenso eine Option ist.

6.4 Hybrid-Modus

Die Kombination eines FM-Signals mit einem zusätzlichen DRM+-Signal zu einem Hybrid-Signal würde direkt zwei Probleme lösen: Zum einen sinkt der Crestfaktor des resultierenden Summensignals deutlich, zum anderen ist ein Empfang auch für Hörer mit analogen Geräten noch möglich. Dadurch, dass das zusätzliche DRM+-Signal frei eingeplant werden kann, steigen die Chancen, gegenüber einem festen

Frequenzabstand (wie bei HD-Radio) eine Lücke im Spektrum zu finden. Durch den Einsatz von 4-QAM kann auch bei Leistungsabsenkungen um 20 dB und mehr eine Reichweite entsprechend dem FM-Sender erzielt werden. Dies ist wichtig, da die spektralen „Lücken“ größtenteils nur geringe DRM+-Leistungen zulassen.

6.4.1 Technische Parameter

Um die maximale Flexibilität bei der Frequenzplanung zu erreichen, ist es sinnvoll, den Abstand des DRM+-Signals vom FM-Träger relativ frei wählbar zu gestalten. Aus der Schutzabstandskurve für FM gegenüber DRM+ ergibt sich die maximal mögliche DRM+-Leistung in Abhängigkeit vom Frequenzversatz. Auf der anderen Seite gibt die Schutzabstandskurve DRM+ gegenüber FM die Mindestleistung vor. Abbildung 6.3 zeigt die entsprechenden Kurven.

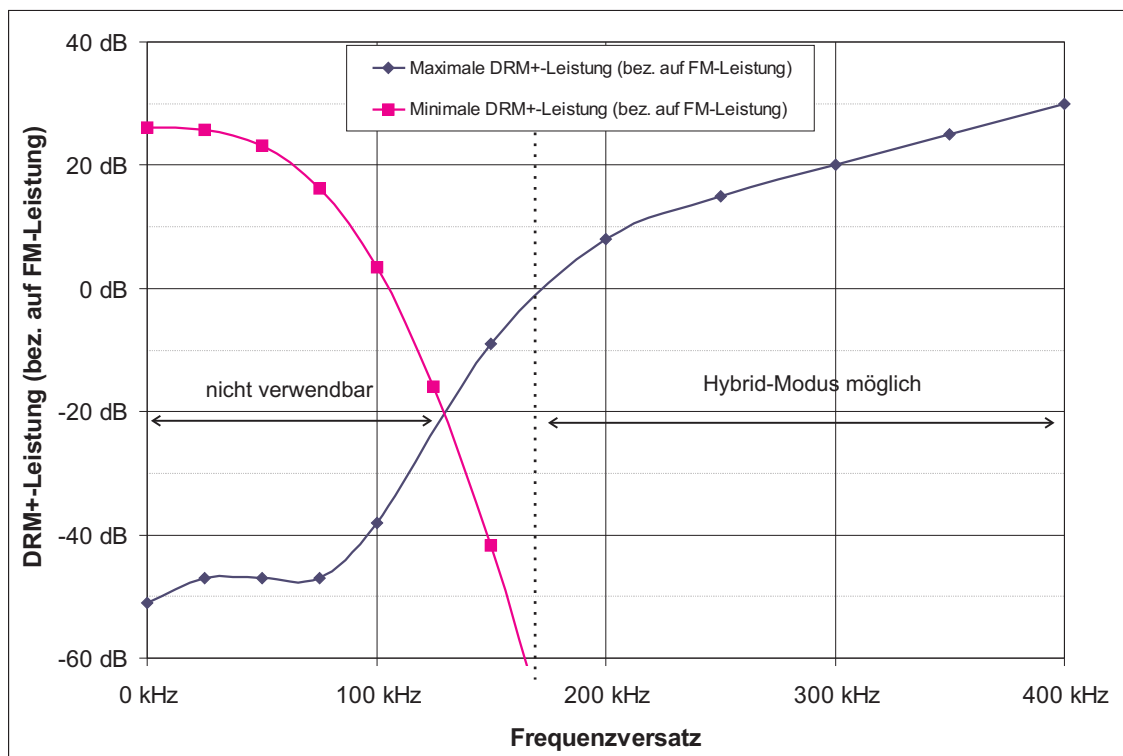


Abbildung 6.3: Minimale und Maximale Leistung eines DRM+-Signals in Abhängigkeit vom Frequenzversatz

Für den Schutz des FM-Signals wurde die im Feld gemessene Schutzabstandskurve (Abbildung 6.2) zu Grunde gelegt, für den Schutz des DRM+-Signals die berechnete Kurve für 16-QAM aus Abbildung 5.17. Bei Einsatz von 4-QAM liegen diese Werte um 10 dB niedriger. Aber auch so stellt diese Bedingung keine relevante Einschränkung dar. Der Bereich zwischen 130 kHz und 175 kHz wäre zwar theoretisch ebenfalls nutzbar, da aber die Schutzabstandskurve für den Schutz von DRM+ nur aus einer theoretischen Betrachtung resultiert, sollten gewisse Reserven vorgesehen werden, bis man für diesen Fall verlässliche Daten zur Verfügung hat. Das DRM+-Signal sollte sich in einem Abstand von höchstens 400 kHz vom zugehörigen FM-Signal befinden, damit eine gemeinsame Sendeantenne genutzt werden kann.

Zusätzlich würde ein zu großer Versatz dazu führen, dass der Summencrestfaktor wieder ansteigt.

Die Arbeitsfrequenz von DRM+ muss nicht zwingend im 100 kHz-Raster liegen. Da DRM+-Empfänger aus Stabilitätsgründen mit einer digitalen Frequenzerzeugung arbeiten werden, sind auch Schrittweiten von 25 kHz, 12,5 kHz oder 10 kHz kein Problem. Erste Berechnungen haben gezeigt, dass es sinnvoll ist, das DRM+-Signal genau zwischen die Rasterfrequenzen zu legen, da die Störungen von FM durch DRM+ im Gleichkanal besonders deutlich sind.

Aus Gründen der Reichweite sollte das Digitalsignal bei Einsatz von 4-QAM nicht mehr als 25 dB gegenüber dem FM-Träger abgesenkt sein. Bei Verwendung von 16-QAM sollte die Absenkung 15 dB nicht überschreiten. Eine DRM+-Leistung von 15 dB unter der FM-Leistung ist bereits ab einem Abstand der beiden Mittenfrequenzen von 125 kHz möglich. Da die Schutzabstandskurve für den Schutz von DRM+ gegen FM bis jetzt nur eine theoretische Annahme ist, sollten gewisse Reserven eingeplant werden. Daraus ergibt sich ein minimaler Versatz von 150 kHz. Zusätzlich soll der Summen-Crestfaktor des Hybridsignals nicht über 5 dB liegen. Abbildung 6.4 zeigt den Verlauf des Summencrestfaktors für verschiedene Leistungsdifferenzen (Berechnung nach Gleichung 6.2).

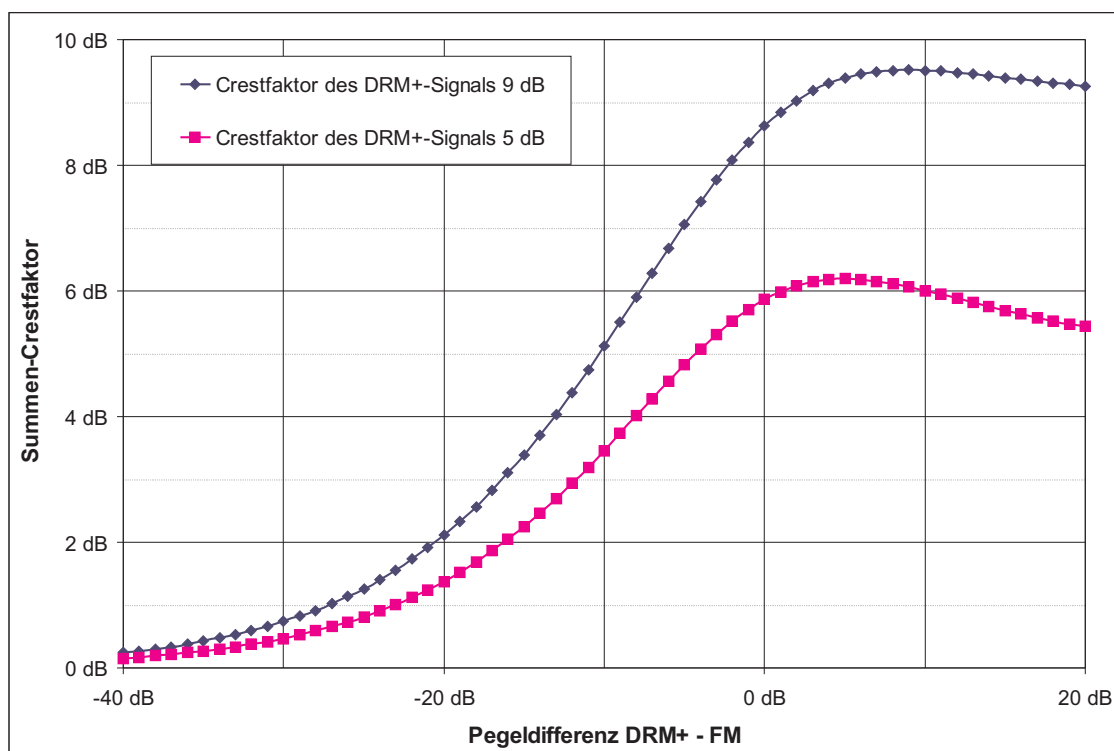


Abbildung 6.4: Summen-Crestfaktor abhängig von der Leistungsdifferenz

Für einen Crestfaktor des DRM+-Signals von 9 dB ergibt sich damit eine maximale Leistung des DRM+-Signals von 10 dB unter der FM-Leistung. Falls es gelingt, den Crestfaktor des DRM+-Signals auf 5 dB zu reduzieren, kann diese Leistungsdifferenz auf 5 dB verringert werden. Abbildung 6.5 zeigt schematisch mögliche Spektren eines Hybrid-Signals. Es ist das nächstmögliche (Versatz 175 kHz) und das entferntestmögliche DRM+-Signal (Versatz 400 kHz) zusammen mit dem FM-Träger dargestellt. Der DRM+-Pegel wurde gegenüber dem FM-Signal um 15

dB abgesenkt. Der Digital-Anteil kann sich natürlich nicht nur oberhalb, sondern auch unterhalb des FM-Signals befinden, je nachdem wie die Planungssituation es erfordert. Für den effektiven Crestfaktor ist der Frequenzversatz nicht von Interesse, solange sich beide Signale in der Eingangsbandbreite (typisch rund 2 MHz) des verwendeten Empfängers befinden.

Bei einer Leistungsdifferenz von 20 dB und einem Crestfaktor des DRM+-Signals von 5 dB wird ein Summencrestfaktor von 1dB erreicht. Dies kommt dem gemessenen Crestfaktor von HD-Radio (1,3 dB), das mit ähnlichen Parametern arbeitet sehr nahe.

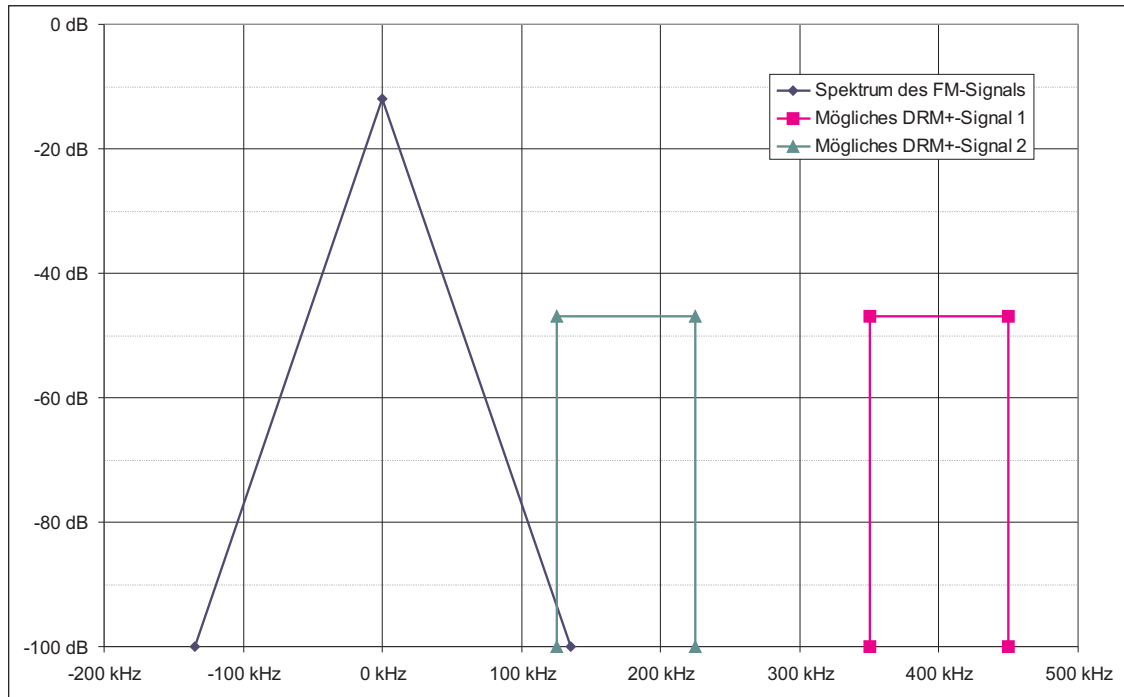


Abbildung 6.5: Spektrum eines möglichen Hybrid-Signals

Dieses Signal kann sowohl mit einem FM- als auch mit einem DRM+-Empfänger empfangen werden, da beide Signale für sich den entsprechenden Standards entsprechen. Vorstellbar wäre auch eine Aufteilung des DRM+-Signals in zwei einzelne Blöcke oberhalb und unterhalb des FM-Trägers (ähnlich HD-Radio). Durch die Aufteilung des Signals wird es breitbandiger (Frequenz-Diversity), dadurch steigt die Störsicherheit deutlich an. Zusätzlich kann man noch über eine Verzögerung eines Seitenbandes nachdenken, um kurze Empfangsausbrüche zu überbrücken (Delay-Diversity). Wenn mehrere Sendeantennen benutzt werden können, kann auch mit Modulation Diversity [28] gearbeitet werden. Auch eine Verzögerung des analogen Signals gegenüber dem digitalen wäre möglich, um dem Empfänger ein Umblenden bei kurzen Empfangseinbrüchen zu ermöglichen. Dies erfordert allerdings spezielle Empfänger, die mit dem Hybrid-Modus umgehen können.

6.4.2 Planungstechnische Gesichtspunkte

Der Hybrid-Modus wäre vor allem für lokale Veranstalter interessant, die sich für eine Digitalisierung entscheiden, aber ihre FM-Hörer nicht verlieren möchten. Da-

durch, dass der Hybrid-Modus potentiell eine hohe Flexibilität liefert, wird die Einplanung des zusätzlichen DRM+-Trägers deutlich vereinfacht. Falls das in dieser Form nicht machbar ist, wäre es möglich, das FM-Signal von einem vorhandenen Standort auszustrahlen und das DRM+-Signal über ein kleines Gleichwellennetz zu verteilen. Damit wäre der Pegel des DRM+-Signals ausserhalb des Versorgungsbereiches noch einmal deutlich abgesenkt, wodurch die Frequenz schneller erneut genutzt werden kann.

Schutzabstände

Da die beiden Signale in der Planung getrennt behandelt werden, können einfach die beiden Schutzabstandskurven grundsätzlich für sich angewendet werden. Problematisch ist allerdings die Abstrahlung beider Signale vom selben Standort. Dadurch ist die örtliche und zeitliche Verteilung der Amplitude miteinander korreliert. Es ist fraglich, ob das von den gängigen Planungstools verwendete Lognormal-Verfahren (siehe Kapitel 2.2.1) diese Korrelation korrekt abbilden kann. Falls man allerdings beide Signale gemeinsam betrachtet, wirken sich notwendige Absenkungen direkt auf die FM-Leistung aus, die aber konstant bleiben soll.

6.5 Zusammenfassung

Um die Verträglichkeit von DRM+ mit FM zu verbessern, muss der effektive Crestfaktor gesenkt werden. Eine Reduktion des Crestfaktors des DRM+-Signals ist der erste Schritt. Dazu eignet sich die Spitzenunterdrückung besonders gut, da diese ohne großen Aufwand im Sender implementiert werden kann und auch situationsabhängig eingesetzt werden kann. Hierbei sind keine Änderungen am Standard oder an den Empfängern erforderlich. Allerdings erhöht sich das erforderliche SNR um bis zu 3 dB, wodurch wieder Reichweite verloren geht. Das System bietet allerdings so viele Reserven, dass dieser Verlust tolerabel erscheint. Die Wirksamkeit und Störwirkung dieses Verfahrens muss allerdings noch praktisch untersucht werden. Die Auswirkungen des Crestfaktors auf die Verträglichkeit von DRM+ mit FM wurden 2007 bereits in einer Diplomarbeit an der Universität Hannover untersucht. Die darin durch Simulation gefundenen Erkenntnisse decken sich mit der Betrachtung in diesem Kapitel.

Der netzplanerische Ansatz zur Reduktion des effektiven Crestfaktors bietet neben der verbesserten Verträglichkeit auch noch einen deutlichen Mehrwert. Gleichwellennetze erlauben den Betrieb auch von günstigen kleinen Standorten bei gleichzeitig verbessertem Empfang durch die homogenere Feldstärkeverteilung. Der Hybrid-Modus ermöglicht den Empfang mit analogen und digitalen Empfängern und eignet sich gut als Umstiegsszenario.

Kapitel 7

Schlußbetrachtungen

7.1 Eignung der Verfahren für die Rundfunkversorgung

7.1.1 DRM+

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass sich ein DRM+-System im heutigen Umfeld im Band II implementieren lässt, ohne zu Störungen zu führen. Durch das offene System können Verbesserungen der Verträglichkeit relativ einfach umgesetzt werden. Durch diese Maßnahmen, vor allem die Reduktion des Crestfaktors, kann die nötige Leistungsreduktion im Vergleich zu FM deutlich verringert werden. Dadurch ist mit DRM+ eine höhere Reichweite als mit FM möglich. Bei einer Leistungsabsenkung um 5 dB könnte es sogar möglich sein, die derzeit gültige ITU-Schutzabstandskurve zur Planung zu nutzen, um eine auch planerische Kompatibilität zu FM zu erreichen. Im Hybrid-Modus kann der zusätzliche DRM+-Träger in vorhandene kleine Belegungslücken im Umfeld der vorhandenen FM-Frequenz flexibel eingeplant werden. Mit Hilfe von kleinen Gleichwellennetzen lässt sich eine Versorgung realisieren, ohne dass hohe Feldstärken erforderlich sind. Dadurch können Frequenzen häufiger wiederholt werden, als das mit FM-Sendern möglich wäre. Wie stark diese Effekte genau ausfallen, muss in weiteren Versuchen geklärt werden. Das DRM+-System ist in Bezug auf Modulationsarten und Coderaten sehr flexibel, damit kann der Senderbetreiber zwischen Reichweite und benötigter Datenrate ein individuelles Optimum ermitteln.

Nach einer eventuellen vollständigen Umstellung des Bandes II auf DRM+ wäre die Verträglichkeit wesentlich besser als heute bei FM gegenüber FM. Diese gewonnene Verträglichkeitsreserve könnte danach entweder in höhere Reichweiten oder höhere Datenraten investiert werden.

7.1.2 HD-Radio

HD-Radio ist unter den aktuellen regulatorischen Randbedingungen nur sehr schwer einzusetzen, da das Signal durch seine hohe Bandbreite die FM-Sendermaske verletzt, was zu einer deutlich schlechteren Schutzabstandskurve führt. Da es sich bei HD-Radio um ein geschlossenes System handelt, sind keine Maßnahmen zur Verbesserung der Verträglichkeit möglich. Da die digitalen Unterträger fest an den Pegel des FM-Signals gekoppelt werden, geht eine netzverträgliche Absenkung der HD-

Radio-Leistung um 15 dB oder mehr mit massiven Reichweitenverlusten des FM-Anteils einher. Auch Gleichwellennetze lassen sich bei HD-Radio im Hybrid-Modus nur sehr schwer realisieren. Von Vorteil ist die sofortige Verfügbarkeit von Sendern sowie Empfängern, allerdings werden bei Einsatz dieses Systems Lizenzzahlungen an iBiquity fällig.

7.1.3 Vergleich

Beide betrachteten Verfahren (DRM+ und HD-Radio) eignen sich, um die heutige organisatorische Struktur im Band II abzubilden. Sie können von einzelnen Senderbetreibern autark eingesetzt werden, ohne an einen Multiplex mehrerer Veranstalter gebunden zu sein. Den Vorteil der Abwärtskompatibilität zum klassischen FM, den HD-Radio von Haus aus bietet, kann in DRM+ mit Hilfe des Hybrid-Modus integriert werden.

Die größten Differenzen zwischen den beiden Systemen findet man im Bereich der Verträglichkeit. Während DRM+ mit einer Leistungsabsenkung von 5 bis 15 dB (je nach Situation) auch ohne besondere Verfahren im Band II verträglich eingesetzt werden könnte, ist dies bei HD-Radio aufgrund des Signalaufbaus nicht möglich. Tabelle 7.1 zeigt die Vor- und Nachteile der Systeme im Überblick:

Tabelle 7.1: Vergleich von HD-Radio, DRM+ und DRM+-Hybrid

	HD-Radio	DRM+	DRM+-Hybrid
Verträglichkeit	-	0	+
Flexibilität	-	++	++
Abwärtskompatibilität	++	-	++
Lizenzzahlungen	-	++	++
Empfängerverfügbarkeit	+	-	-
Gleichwellentauglichkeit	-	++	++ (DRM+-Teil)
Reichweite	+	+	+

7.2 Regulatorische Randbedingungen

Um eine Nutzung des UKW-Rundfunkbandes für digitale Dienste zu vereinfachen oder diese gar erst zu ermöglichen, müssen die regulatorischen Rahmenbedingungen der Wirklichkeit angepasst werden. Die derzeit gültige ITU-Schutzabstandskurve wird von heutigen Empfängern bei Offsets größer 100 kHz deutlich unterschritten. Daraus ergeben sich in der Praxis wesentlich größere Sendereichweiten als in der Planung zu erwarten war. Wenn ohne grundlegende Änderung der Rahmenbedingungen Schutzabstandskurven für neue digitale Systeme aufgestellt werden, müssten diese ähnlich viel Spielraum lassen wie die ITU-Kurve, um diese „erweiterten Verbreitungsgebiete“ nicht zu gefährden. An dieser Stelle wird es in Zukunft erforderlich sein, eine neue Planungsgrundlage zu schaffen, um für alle faire und vorhersagbare Bedingungen zu schaffen. Dabei kann durchaus berücksichtigt werden, dass ein Audio-SNR von 50 dB von vielen (vor allem portablen) Empfängern nicht mehr erreicht wird. Zusätzlich findet kein Ballempfang mehr statt, der besonders geschützt werden muss.

Dabei sollte auch das Messverfahren für die Schutzabstandsmessungen überdacht werden, da das Messverfahren nach [11] sehr aufwändig ist. Wenn statt eines Psophometers ein Audio-Analysator eingesetzt wird, ist eine Messung des SINAD problemlos und schnell möglich. Die Aussagekraft gegenüber der reinen Rauschleistungsmessung steigt damit an, da auch Verzerrungen mitgemessen werden.

7.3 Weitere Arbeiten

Zu vielen Bereichen des DRM+-Systems liegen nur theoretische Betrachtungen vor. Diese Betrachtungen sollten durch Messungen im Labor sowie im Feld überprüft werden. Hierbei verdienen folgende Punkte besondere Beachtung:

- Schutzabstand DRM+ bei Beeinflussung durch FM und auch DRM+
- Erforderliche Mindestfeldstärke für den DRM+-Empfang
- Erforderliches SNR am Empfängereingang für DRM+
- Reduktion des Crest-Faktors:
 - Wirksamkeit der Verfahren
 - Störwirkung außerhalb des Kanals
 - Störwirkung innerhalb des Kanals
 - Auswirkungen auf den Schutzabstand DRM+ stört FM in verschiedenen Szenarien
- Hybrid-Modus:
 - Wirkung auf den Crestfaktor
 - Erforderliche DRM+-Leistung für gleiches Versorgungsgebiet
- Gleichwellennetze:
 - Nötige Feldstärken und Sendeleistungen zur Versorgung einer Stadt
 - Störwirkung/Feldstärken ausserhalb des versorgten Gebietes
 - technische Eignung
 - verschiedene Netzgrößen
- Eignung für Band I

Die Ergebnisse dieser Arbeiten sollten anschließend in einem Pilotnetz verifiziert werden. Ein solcher Pilotversuch kann beispielsweise die zusätzliche Ausstrahlung einer regionalen Senderkette in DRM+ beinhalten. Aus den Ergebnissen eines solchen Pilotversuchs können dann abschließende Planungskriterien für DRM+ gewonnen werden. Ein solcher Großversuch ist allerdings nur unter Beteiligung von Senderbetreibern und Empfängerherstellern sinnvoll möglich, um genügend Aussagekraft über die vollständige Übertragungskette zu erhalten.

7.4 Schlusswort

Aufgrund der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse ist es lohnend, die Entwicklung des DRM+-Systems weiter zu verfolgen, da dem Einsatz von DRM+ in Band II keine größeren Bedenken technischer Art entgegenstehen. Nach heutigen Randbedingungen stellt sich HD-Radio nicht als Alternative dar, da es für den US-Markt entwickelt wurde, wo andere und regulatorische Parameter gelten als in Europa.

Literaturverzeichnis

- [1] FH Kaiserslautern, Bundesnetzagentur: Abschlussbericht "Verträglichkeitsuntersuchungen von OFDM-basierten Systemen im UKW-FM-Band", Kaiserslautern/München, 2007
- [2] FCC; Iqity: IBOC FM Transmission Specification, FCC-02-286A2, Nov. 2001
- [3] Stepp, Gressmann, Kaltbeizer, Grosskopf, Bangen, Fastert: Technische Hausmitteilung des NWDR, Hamburg, 1952
- [4] Orban: Optimod FM 8200 Datasheet
- [5] Recommendation ITU-R BS.412-9 Planning standards for terrestrial FM sound broadcasting at VHF, Genf, 1998
- [6] Rohde&Schwarz: Application Note 7TS02, Der Crestfaktor bei DVB-T-(OFDM-) Sendeanlagen und seine Auswirkung auf die Dimensionierung der Leistungskomponenten, München, 2007
- [7] RRC 04: Propagation Information, Genf, 2004
- [8] RRC 04: Technical basis and characteristics, Genf, 2004
- [9] RRC 04: Planning principles and methods, Genf, 2004
- [10] Gaspard, I.: Bitfehlerhäufigkeit und Optimierung des DVB-T-Systems für hochmobile Teilnehmer, Darmstadt, 2003
- [11] Recommendation ITU-R BS.641 Determination of radio-frequency protection ratios for frequency-modulated sound broadcasting, Genf, 1986
- [12] Recommendation ITU-R BS.704 Characteristics of FM sound broadcasting reference receivers for planning purposes, Genf, 1990
- [13] L. Litz: Wahrscheinlichkeitstheorie für Ingenieure, Hüthig, Heidelberg, 2001
- [14] Recommendation ITU-R BS.415-2 Minimum Performance specifications for low-cost Sound Broadcasting receivers, Genf, 1986
- [15] Bernhardt, F.: Untersuchung zur Implementierung eines digitalen Übertragungssystems auf OFDM-Basis im UKW-Band, FH Kaiserlautern, 2005
- [16] Kammeyer, K.-D.: Nachrichtenübertragung, Teubner, Wiesbaden, 2008

- [17] Weck, C.: Optimierung der Kanalcodierung im Hinblick auf das Ausstiegsverhalten eines digitalen Hörrundfunksystems, TU Berlin, 1996
- [18] ETSI: ES 201 980 V 3.1.1 Final Draft - Digital Radio Mondiale System Specification Draft, 2008
- [19] DIN EN 60315-4: Meßverfahren für Funkempfänger für verschiedene Sendearten, 1998
- [20] Recommendation ITU-R P.1546-1 Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz, Genf, 2003
- [21] Recommendation ITU-R BS.1114-5 Systems for terrestrial digital sound broadcasting to vehicular, portable and fixed receivers in the frequency range 30-3 000 MHz, Genf, 2004
- [22] Poole, R.: DRM Transmissions on VHF: Will FM Receivers Be Affected?, BBC, 2006
- [23] van Nee, R., Prasad, R.: OFDM for wireless Multimedia Communications, Artech House, Boston/London, 2000
- [24] Hanzo, L., Münster, M., Choi, B.J., Keller, T.: OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-User Communications, WLANs and Broadcasting, Wiley, West Sussex, 2004
- [25] Recommendation ITU-R BS.559-2 Objective measurement of radio-frequency protection ratios in LF, MF and HF broadcasting, Genf, 1990
- [26] Lamer, M., Kretzschmann, R.: HD-Radio-Feldversuch - Vorstellung der Ergebnisse der erste Voruntersuchungen, Lfk & T-Systems, 2007
- [27] Fischer, R.: Peak-to-Average Power Ratio (PAR) Reduction in OFDM Based on Lattice Decoding, Erlangen, 2006
- [28] Wittneben, A.: A New Bandwidth Efficient Transmit Antenna Modulation Diversity Scheme for Linear Digital Modulation, Proc ICC93, 1993
- [29] Skupin, C.: Untersuchungen zur Beeinflussung des FM-Rundfunks durch DRM+, Hannover, 2007

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Dichtefunktion der Standardnormalverteilung	10
Abb. 2.2:	Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung	11
Abb. 2.3:	inverse Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung	12
Abb. 2.4:	Dichtefunktion der logarithmischen Normalverteilung ($\mu = 100$)	13
Abb. 2.5:	Dichtefunktion der logarithmischen Normalverteilung ($\mu = 100$) in linearer Skalierung	13
Abb. 2.6:	Ausbreitung bei 100 MHz und 50 % Zeitwahrscheinlichkeit [20]	16
Abb. 2.7:	Abschläge für Freiheitswinkel des Empfängers [20]	20
Abb. 2.8:	Offenes Gleichwellennetz mit sieben Sendern [8]	25
Abb. 2.9:	Offenes Gleichwellennetz mit drei Sendern [8]	25
Abb. 2.10:	Geschlossenes Gleichwellennetz mit drei Sendern [8]	26
Abb. 3.1:	Genormte Schutzabstandskurven [5]	28
Abb. 3.2:	Messaufbau nach [11]	29
Abb. 3.3:	Realisierter Messaufbau	30
Abb. 4.1:	Spektrum des FM-Multiplexes	34
Abb. 4.2:	Spektrumsmasken für FM-Sender	35
Abb. 4.3:	Spektrum eines unmodulierten FM-Senders	36
Abb. 4.4:	Spektrum eines modulierten FM-Senders	37
Abb. 4.5:	Sendermaske für DRM+ und FM im Vergleich	39
Abb. 4.6:	Spektrum des DRM+-Senders	40
Abb. 4.7:	Aufbau eines DRM+-Signalgenerators	41
Abb. 4.8:	Prinzipielles Spektrum eines HD-Radio-Signals [2]	45
Abb. 4.9:	Foto eines HD-Radio-Senders kleiner Leistung	46
Abb. 4.10:	Spektrumsmasken für HD-Radio	47
Abb. 4.11:	Spektrum eines HD-Radio Senders (FXi 250)	48
Abb. 5.1:	Schutzabstand FM gegenüber FM / DRM+	50
Abb. 5.2:	Berechnete Schutzabstandskurven [22] - DRM+ stört FM	51
Abb. 5.3:	Schutzabstand FM-FM - Empfänger JVC	52
Abb. 5.4:	Schutzabstand FM-FM - Empfänger Blaupunkt Woodstock DAB	53
Abb. 5.5:	Schutzabstand FM-DRM+ - Empfänger JVC	54
Abb. 5.6:	Schutzabstand FM-DRM+ - Empfänger Blaupunkt Woodstock DAB	54
Abb. 5.7:	Schutzabstand über einen großen Frequenzbereich FM-DRM+ - Empfänger JVC	55
Abb. 5.8:	Schutzabstand RDS gegenüber FM und DRM+	56
Abb. 5.9:	Schutzabstand FM-DRM+ - Annahme verschiedener Störmechanismen	56
Abb. 5.10:	Schutzabstand FM-DRM+ - Filterung der Rauschemissionen	57

Abb. 5.11: Schutzabstand FM gegenüber Signalen mit verschiedenen Crestfaktoren	58
Abb. 5.12: Erste ZF eines Empfängers - DRM+ stört FM	59
Abb. 5.13: Erste ZF eines Empfängers - MCCW (2dB Crestfaktor) stört FM	59
Abb. 5.14: Erste ZF eines Empfängers - DRM+ stört FM - AGC abgeschaltet	60
Abb. 5.15: Schutzabstandskurve DRM+ stört FM (Feldmessung) im Vergleich zur ITU-Schutzabstandskurve	61
Abb. 5.16: FM-Spektren im Vergleich (Pegel in dBm, Frequenz in kHz)	63
Abb. 5.17: Schutzabstand DRM+ (16-QAM)- FM	64
Abb. 5.18: Schutzabstand DRM+ (4-QAM)- FM	64
Abb. 5.19: Schutzabstand FM-HD-Radio im Vergleich zur ITU-Kurve	65
Abb. 5.20: Planungsvorschlag Schutzabstand FM-HD-Radio	66
Abb. 6.1: Belegung des UKW-Bandes in Stuttgart - Feldstärken in $dB\mu V/m$ [26]	69
Abb. 6.2: Kritische und unkritische Schutzabstandskurve für DRM+	71
Abb. 6.3: Minimale und Maximale Leistung eines DRM+-Signals in Abhängigkeit vom Frequenzversatz	77
Abb. 6.4: Summen-Crestfaktor abhängig von der Leistungsdifferenz	78
Abb. 6.5: Spektrum eines möglichen Hybrid-Signals	79

Anhang A

Tabellen

A.1 Schutzabstand nach ITU [5]

Tabelle A.1: Tabellierte Schutzabstandswerte [5]

Carrier frequency spacing (kHz)	Radio-frequency protection ratio (dB) using a maximum frequency deviation of ± 75 kHz			
	Monophonic		Stereophonic	
	Steady interference	Tropospheric interference	Steady interference	Tropospheric interference
0	36.0	28.0	45.0	37.0
25	31.0	27.0	51.0	43.0
50	24.0	22.0	51.0	43.0
75	16.0	16.0	45.0	37.0
100	12.0	12.0	33.0	25.0
125	9.5	9.5	24.5	18.0
150	8.0	8.0	18.0	14.0
175	7.0	7.0	11.0	10.0
200	6.0	6.0	7.0	7.0
225	4.5	4.5	4.5	4.5
250	2.0	2.0	2.0	2.0
275	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0
300	-7.0	-7.0	-7.0	-7.0
325	-11.5	-11.5	-11.5	-11.5
350	-15.0	-15.0	-15.0	-15.0
375	-17.5	-17.5	-17.5	-17.5
400	-20.0	-20.0	-20.0	-20.0

A.2 Schutzabstand DRM+ (16-QAM) gestört durch FM

Tabelle A.2: zu Abbildung 5.17

Frequenzversatz	Schutzabstand Normstörer	Schutzabstand Dreiecksstörer
-400 kHz	-681,8 dB	-210,1 dB
-350 kHz	-497,8 dB	-176,9 dB
-300 kHz	-340,8 dB	-142,8 dB
-250 kHz	-212,8 dB	-110,2 dB
-200 kHz	-113,8 dB	-76,8 dB
-175 kHz	-73,8 dB	-60,2 dB
-150 kHz	-41,8 dB	-43,5 dB
-125 kHz	-16,0 dB	-26,9 dB
-100 kHz	3,5 dB	-10,7 dB
-75 kHz	16,2 dB	6,6 dB
-50 kHz	23,2 dB	23,2 dB
-25 kHz	25,7 dB	26,2 dB
0 kHz	26,2 dB	26,2 dB
25 kHz	25,7 dB	26,2 dB
50 kHz	23,2 dB	23,2 dB
75 kHz	16,2 dB	6,6 dB
100 kHz	3,5 dB	-10,7 dB
125 kHz	-16,0 dB	-26,9 dB
150 kHz	-41,8 dB	-43,5 dB
175 kHz	-73,8 dB	-60,2 dB
200 kHz	-113,8 dB	-76,8 dB
250 kHz	-212,8 dB	-110,2 dB
300 kHz	-340,8 dB	-142,8 dB
350 kHz	-497,8 dB	-176,9 dB
400 kHz	-681,8 dB	-210,1 dB

A.3 Schutzabstand DRM+ (4-QAM) gestört durch FM

Tabelle A.3: zu Abbildung 5.18

Frequenzversatz	Schutzabstand Normstörer	Schutzabstand Dreiecksstörer
-400 kHz	-691,8 dB	-220,1 dB
-350 kHz	-507,8 dB	-186,9 dB
-300 kHz	-350,8 dB	-152,8 dB
-250 kHz	-222,8 dB	-120,2 dB
-200 kHz	-123,8 dB	-86,8 dB
-175 kHz	-83,8 dB	-70,2 dB
-150 kHz	-51,8 dB	-53,5 dB
-125 kHz	-26,0 dB	-36,9 dB
-100 kHz	-6,6 dB	-20,7 dB
-75 kHz	6,1 dB	-3,5 dB
-50 kHz	13,1 dB	13,1 dB
-25 kHz	15,6 dB	16,1 dB
0 kHz	16,1 dB	16,1 dB
25 kHz	15,6 dB	16,1 dB
50 kHz	13,1 dB	13,1 dB
75 kHz	6,1 dB	-3,5 dB
100 kHz	-6,6 dB	-20,7 dB
125 kHz	-26,0 dB	-36,9 dB
150 kHz	-51,8 dB	-53,5 dB
175 kHz	-83,8 dB	-70,2 dB
200 kHz	-123,8 dB	-86,8 dB
250 kHz	-222,8 dB	-120,2 dB
300 kHz	-350,8 dB	-152,8 dB
350 kHz	-507,8 dB	-186,9 dB
400 kHz	-691,8 dB	-220,1 dB

A.4 Schutzabstand FM gestört durch DRM+ (Messwerte)

Tabelle A.4: zu Abbildung 5.19

Frequenzversatz	Schutzabstand HD-Radio
-600 kHz	-22 dB
-550 kHz	-22 dB
-500 kHz	-22 dB
-450 kHz	-22 dB
-400 kHz	-20 dB
-350 kHz	-18 dB
-300 kHz	-15 dB
-250 kHz	6 dB
-220 kHz	22 dB
-200 kHz	22 dB
-180 kHz	23 dB
-150 kHz	25 dB
-130 kHz	25 dB
-100 kHz	35 dB
-80 kHz	44 dB
-50 kHz	49 dB
-30 kHz	48 dB
0 kHz	46 dB
30 kHz	49 dB
50 kHz	50 dB
80 kHz	45 dB
100 kHz	36 dB
130 kHz	24 dB
150 kHz	23 dB
180 kHz	25 dB
200 kHz	24 dB
220 kHz	24 dB
250 kHz	7 dB
300 kHz	-13 dB
350 kHz	-19 dB
400 kHz	-20 dB
450 kHz	-22 dB
500 kHz	-24 dB
550 kHz	-25 dB
600 kHz	-25 dB

A.5 Schutzabstand FM gestört durch DRM+ (Planungsvorschlag)

Tabelle A.5: zu Abbildung 5.20

Frequenzversatz	Schutzabstand HD-Radio
-400 kHz	-20 dB
-375 kHz	-18 dB
-350 kHz	-15 dB
-325 kHz	-12 dB
-300 kHz	-7 dB
-275 kHz	-2 dB
-250 kHz	10 dB
-225 kHz	25 dB
-200 kHz	25 dB
-175 kHz	25 dB
-150 kHz	25 dB
-125 kHz	25 dB
-100 kHz	33 dB
-75 kHz	45 dB
-50 kHz	45 dB
-25 kHz	51 dB
0 kHz	45 dB
25 kHz	51 dB
50 kHz	51 dB
75 kHz	45 dB
100 kHz	33 dB
125 kHz	25 dB
150 kHz	25 dB
175 kHz	25 dB
200 kHz	25 dB
225 kHz	25 dB
250 kHz	10 dB
275 kHz	-2 dB
300 kHz	-7 dB
325 kHz	-12 dB
350 kHz	-15 dB
375 kHz	-18 dB
400 kHz	-20 dB