

Technische Universität Kaiserslautern  
Fachbereich Elektrotechnik  
Nachrichtentechnik

# Entwicklung und Fertigung eines Multinorm-Empfängers zum Empfang von DRM im Mode E (DRM+) gemeinsam mit DAB+ und UKW-FM und von weiteren Hörfunksystemen

Abschlussbericht  
von

**Bernd Knodt**

**Lars Schimmele**

Betreut durch:

Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky (TU-KL)

Dipl.-Ing. Joachim Lehnert (LMK)

Dipl.-Ing. Mark Rosenbaum (TU-KL)

Dr.-Ing. Wolfgang Sauer-Greff (TU-KL)

Kaiserslautern, den 30. Januar 2013



## Vorwort

Im Sommer 2011 besuchten wir die Vorlesung *Digitaler Rundfunk* von Herrn Dipl.-Ing. Joachim Lehnert an der TU Kaiserslautern und kamen so das erste Mal in Berührung mit der Thematik des „Digitalen Radios“. Durch die Informationen über das digitale Rundfunksystem *DRM+* und die nicht vorhandenen Empfangsgeräte wurde unser Interesse geweckt. Gemeinsame Überlegungen mit Herrn Lehnert führten zu der Idee, einen Prototypen-Empfänger im Rahmen einer gemeinsamen Studienarbeit am Lehrstuhl für Nachrichtentechnik von Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky zu entwerfen.

Unser Dank gilt der Landeszentrale für Medien und Kommunikation Rheinland-Pfalz (LMK) in Ludwigshafen, die als Auftraggeber die Durchführung dieses Projekts ermöglichte. Herrn Dipl.-Ing. Joachim Lehnert, technischer Leiter der LMK, möchten wir für die Unterstützung und Betreuung während der Arbeit danken.

Einen besonderen Dank richten wir an die Mitarbeiter des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen (IIS) in Erlangen, besonders an Herrn Dipl.-Ing. Ewald Hedrich und Dipl.-Inf. Kerim Merdenoglu, die dieses Projekt mit der notwendigen Software unterstützt haben.

Unser Dank geht an M.Sc. Michael Feilen, der ebenfalls mit seiner Software und seinen Ideen bedeutsam zum Gelingen des Projekts beigetragen hat.

Prof. Dr.-Ing. Andreas Steil von der Fachhochschule in Kaiserslautern möchten wir für die Bereitstellung der Senderhardware und die Unterstützung in fachlichen Fragen danken.

Unser Dank geht auch an Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky, welcher am Lehrstuhl für Nachrichtentechnik der TU Kaiserslautern die Durchführung der Arbeit ermöglichte.

Unser spezieller Dank geht an Dr.-Ing. Wolfgang Sauer-Greff und Dipl.-Ing. Mark Rosenbaum, welche uns mit tatkräftiger Unterstützung, nicht nur in fachlichen Fragen, über den Zeitraum der Studienarbeit immer zur Seite standen.

Des Weiteren möchten wir uns bei der Firma *Terratec* für die Bereitstellung der Noxon-Hardware bedanken.

Diese Auflistung impliziert in keinster Weise irgendeine Gewichtung.



## Abstract

Das digitale Rundfunksystem DRM+ ermöglicht es in den VHF-Bändern I, II und III bei einer Signalbandbreite von 96 kHz bis zu zwei Hörfunkprogramme über Gleichwellennetze zu übertragen. DRM+ bietet damit lokalen Rundfunkbetreibern die Möglichkeit digitale Sendungen auszustrahlen. Fehlende kostengünstige Empfänger für dieses digitale System sind zur Zeit einer der ausschlaggebenden Faktoren für die zögernde Umsetzung dieses Konzepts.

Kostengünstige und frei auf dem Markt erhältliche Hardwareprodukte für den Zusammenbau eines Multinormempfängerprototypen bilden die Basis für das in diesem Bericht beschriebene Projekt. Der zu konzipierende Prototyp soll den Empfang von DRM+ und DAB+ sowie UKW-FM, AM und auch Internetradio ermöglichen. Mit der Systemplattform *pandaboard ES* in Kombination mit dem *Noxon DAB USB*-Stick als HF-Frontend wurde ein Demonstrator zum Empfang von DRM+ verwirklicht. In Kombination mit einer Entwicklungsversion einer DRM+ Decodersoftware wird der Empfänger messtechnisch bewertet.

Eine DRM+ Sendekonfiguration bestehend aus Contentserver, Basisband- und HF-Modulator liefert das Sendesignal. Die Qualität des Demonstrators wird unter anderem anhand der Bitfehlerraten der Decodersoftware beurteilt. Des Weiteren werden verfügbarer Dynamikbereich, notwendige Signal-Stör-Abstände zum erfolgreichen Decodieren sowie das Verhalten des Empfängers bei Fading untersucht. Bei einem Dynamikbereich von 50 dB und einem Signal-Stör-Abstand von mindestens 12 dB ist der Empfang von DRM+ mit dem Empfängerprototyp möglich, die Soll-Geschwindigkeiten der DRM+ Fadingprofile werden erreicht. Auf einem Treffen des Deutschen DRM Forums wurde der Empfang eines DRM+ Multiplexdatenstroms mit dem Laboraufbau erfolgreich demonstriert.

Der entworfene Demonstrator stellt als Entwicklungsplattform für zukünftige Forschungsprojekte eine gute Basis dar und kann unter anderem zur Vorführungen auf Messen oder als Messempfänger in Feldversuchen dienen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation und Aufgabenstellung . . . . .	1
1.2. Prinzip der digitalen Übertragung . . . . .	2
1.2.1. Quadratur-Amplitudenmodulation . . . . .	3
1.2.2. Orthogonal-Frequency-Division Multiplexing . . . . .	4
1.2.3. Digital Radio Mondiale . . . . .	6
1.3. Vorgaben für das Gerät . . . . .	7
1.4. Grundlagen für die Arbeit . . . . .	7
1.4.1. Standards . . . . .	7
1.4.2. Kooperationen . . . . .	8
1.5. Vorüberlegungen . . . . .	8
1.5.1. Funktionelle Beschreibung - Software . . . . .	10
1.5.1.1. Decodersoftware WaveSink . . . . .	10
1.5.1.2. Decodersoftware des <i>Fraunhofer IIS</i> . . . . .	10
1.5.2. Physikalische Beschreibung - Hardware . . . . .	11
1.5.2.1. HF-Frontend . . . . .	12
1.5.2.1.1. Terratec Noxon DAB-Stick . . . . .	12
1.5.2.1.2. Ettus Research USRP 1 . . . . .	12
1.5.2.1.3. Microtelecom Perseus . . . . .	13
1.5.2.2. Systemplattform: <i>pandaboard ES</i> . . . . .	13
1.5.2.3. Ein-/Ausgabe: Benutzerinterface . . . . .	14
1.5.2.3.1. Chumby 8 . . . . .	14
1.5.2.3.2. LCD Screen mit Touchpanel . . . . .	15
1.5.2.3.2.1. Chipsee - Pandaboard Expansion Kit . . . . .	15
1.5.2.3.2.2. LVDS Adapter V2 + 10“ LCD mit Touchscreen . . . . .	15
1.6. Umsetzung . . . . .	15
1.6.1. Idealer Empfänger . . . . .	15
1.6.1.1. Hörfunksysteme . . . . .	16
1.6.1.2. Hardwarekomponenten . . . . .	16
1.6.1.2.1. Noxon DAB-Stick . . . . .	16
1.6.1.2.2. USRP 1 . . . . .	17
1.6.1.2.3. <i>pandaboard ES</i> . . . . .	17
1.6.1.2.4. LCD Screen mit Touchpanel . . . . .	17
1.6.1.3. Schnittstellen . . . . .	17
1.6.1.4. Graphical User Interface . . . . .	18
1.6.2. Realer Empfänger . . . . .	19
1.6.2.1. Hörfunksysteme . . . . .	19
1.6.2.2. Hardwarekomponenten . . . . .	20
1.6.2.2.1. Noxon DAB-Stick . . . . .	20

1.6.2.2.2.	<i>pandaboard ES</i> . . . . .	20
1.6.2.2.3.	LCD Screen mit Touchpanel . . . . .	20
1.6.2.3.	Schnittstellen . . . . .	20
1.6.2.4.	Graphical User Interface . . . . .	20
1.7.	Produktliste . . . . .	21
<b>2.</b>	<b>Kofferaufbau</b>	<b>23</b>
2.1.	Idee zum Bau des Multinormradios im Design „Kofferradio“ . . . . .	23
2.2.	Aufbau . . . . .	24
2.2.1.	Die wichtigsten Bauteilen des Kofferradios . . . . .	24
2.2.1.1.	Aluminiumkoffer . . . . .	24
2.2.1.2.	Anschlussplatte . . . . .	25
2.2.1.3.	<i>pandaboard ES</i> . . . . .	25
2.2.1.4.	LCD-Touchscreen . . . . .	27
2.2.1.5.	Audioverstärker . . . . .	28
2.2.1.6.	NOXON-Stick . . . . .	28
2.2.1.7.	KFZ-Spannungswandler . . . . .	28
2.2.1.8.	Akku . . . . .	28
2.2.2.	Der Zusammenbau des Prototypen . . . . .	29
2.2.2.1.	Lochbohrungen . . . . .	29
2.2.2.2.	Befestigung der Komponenten . . . . .	30
2.3.	Betriebssystem . . . . .	31
<b>3.</b>	<b>Messanforderungen</b>	<b>33</b>
3.1.	Messungen auf der Senderseite . . . . .	33
3.1.1.	Signalparameter . . . . .	33
3.1.2.	DRM+ . . . . .	34
3.1.2.1.	Sendesignale . . . . .	34
3.1.2.2.	Contentserver und Modulator . . . . .	34
3.1.3.	DAB+ . . . . .	35
3.1.3.1.	Sendsignal . . . . .	35
3.1.3.2.	Contentserver und Modulator . . . . .	35
3.2.	Messungen auf der Empfängerseite . . . . .	35
3.2.1.	DRM+ . . . . .	36
3.2.2.	DAB+ . . . . .	36
3.2.3.	Schutzabstände . . . . .	37
<b>4.</b>	<b>Labora Aufbau</b>	<b>39</b>
4.1.	Sender . . . . .	40
4.1.1.	DRM+ . . . . .	40
4.1.1.1.	Contentserver . . . . .	40
4.1.1.1.1.	Fraunhofer DRM ContentServer . . . . .	40
4.1.1.1.2.	Spark Contentserver . . . . .	41
4.1.1.2.	Basisbandmodulator . . . . .	42
4.1.1.2.1.	Fraunhofer IIS Basisbandmodulator . . . . .	42
4.1.1.2.2.	Spark Basisbandmodulator . . . . .	43

4.1.1.3.	HF-Modulator . . . . .	43
4.1.1.3.1.	Rohde & Schwarz SMU 200A . . . . .	43
4.1.1.3.2.	Ettus Research USRP B100 . . . . .	44
4.1.1.4.	Mögliche DRM+ Senderkombinationen . . . . .	45
4.1.1.4.1.	Kombination 1 (S-S-R) . . . . .	45
4.1.1.4.2.	Kombination 2 (F-S-R) . . . . .	46
4.1.1.4.3.	Kombination 3 (F-F-U) . . . . .	46
4.1.2.	DAB+ . . . . .	47
4.1.2.1.	Contentserver . . . . .	47
4.1.2.2.	Basisbandmodulator . . . . .	47
4.1.2.3.	HF-Modulator . . . . .	48
4.1.2.4.	DAB+ Sendekette . . . . .	48
4.2.	Empfänger . . . . .	48
4.2.1.	DRM+ . . . . .	48
4.2.1.1.	Kofferradio mit Fraunhofer DRM+ Decoder . . . . .	48
4.2.1.2.	DRM+ Decoder WaveSink . . . . .	50
4.2.2.	DAB+ . . . . .	51
4.3.	Messaufbau . . . . .	51
4.3.1.	DRM+ . . . . .	53
4.3.2.	DAB+ . . . . .	54
4.3.3.	Automatisierung . . . . .	54
<b>5.</b>	<b>Messungen</b>	<b>55</b>
5.1.	Sendsignale . . . . .	55
5.1.1.	DRM+ . . . . .	55
5.1.1.1.	Senderkombination 1 . . . . .	55
5.1.1.2.	Senderkombination 2 . . . . .	59
5.1.1.3.	Senderkombination 3 . . . . .	62
5.1.1.4.	Bewertung . . . . .	65
5.1.2.	DAB+ . . . . .	65
5.2.	Rauschzahl Noxon DAB Stick . . . . .	67
5.3.	DRM+ Empfang . . . . .	68
5.3.1.	Dynamikbereich . . . . .	68
5.3.1.1.	Noxon DAB-Stick Rev. 1 . . . . .	69
5.3.1.2.	Noxon DAB-Stick Rev. 2 . . . . .	74
5.3.2.	Signal-Stör-Abstand . . . . .	78
5.3.3.	Fadingmessungen . . . . .	80
5.3.3.1.	Geschwindigkeitsmessungen . . . . .	80
5.3.3.2.	Signal-Stör-Abstand Messungen . . . . .	84
5.3.4.	Schutzabstand . . . . .	88
5.3.5.	Vergleich der beiden DRM+ Decodervarianten . . . . .	91
5.4.	DAB+ Empfang . . . . .	95
<b>6.</b>	<b>Präsentation des Empfängerprototypen</b>	<b>97</b>
<b>7.</b>	<b>Fazit</b>	<b>99</b>

<b>A. Anhang</b>	<b>101</b>
A.1. Dämpfungsverluste . . . . .	101
A.1.1. PAD-Glied . . . . .	101
A.1.2. BNC-Kabel . . . . .	101
A.2. Empfängermessungen . . . . .	102
A.2.1. Vergleich zweier Messmethoden . . . . .	102
A.2.2. Filterkoeffizienten . . . . .	103
A.3. Angepasste Boot-Datei für das Ubuntu-Betriebssystem . . . . .	104

# 1. Einführung

## 1.1. Motivation und Aufgabenstellung

Digitale Rundfunksysteme erlauben eine effizientere Nutzung der knappen Ressource Frequenz bei gleichzeitiger Reduktion der Sendeleistung und Verbesserung der Qualität und Vielfalt der Ausstrahlungen. Insbesondere durch das Übertragungsverfahren Orthogonal-Frequency-Division Multiplexing (OFDM) und durch die Nutzung von Gleichwellennetzen werden diese Vorteile ermöglicht. Mit dem digitalen Rundfunksystem DAB+ (Digital Audio Broadcasting) erfolgt die Ausstrahlung der digitalen Programme im VHF-Band III nun über sogenannte Multiplexe. Diese kann man als Paket von Rundfunkprogrammen auffassen, die sich einen Übertragungskanal teilen. Der DAB+ Multiplex ist für eine landes- und bundesweite Ausstrahlung einer Vielzahl von Angeboten gedacht. Dies birgt jedoch eine Problematik für lokale Anbieter, denn sie besitzen in der Regel nicht die Ressourcen einen DAB+ Multiplex vollständig zu füllen.

Eine Alternative bietet hier DRM+ (Digital Radio Mondiale), ein System, welches ein bis zwei Hörfunkprogramme mit einer Bandbreite von 96 kHz bereitstellt. Das System ist bei der ITU (International Telecommunication Union) und bei ETSI (European Telecommunications Standards Institute) im VHF-Band I, II und III standardisiert, kann also im Frequenzbereich von 30 - 300 MHz eingesetzt werden. Es bietet auch den lokalen Anbietern eine Möglichkeit, ihre Sendungen digital auszustrahlen. Eine Nutzung dieses Systems im UKW-Band (VHF-Band II) ist aber aus regulatorischen Gründen und wegen des Mangels an freien Sendefrequenzen nicht möglich. Die Gefahr, Störungen im Flugnavigationsfunk zu verursachen und das überfüllte UKW-Band mit analogen UKW-Sendern sprechen gegen die Nutzung im VHF-Band II. DRM+ kann aber zusammen mit DAB+ im VHF-Band III genutzt werden und ermöglicht so eine zukunftsweisende Ausrichtung zur Digitalisierung des gesamten Rundfunks. Aufgrund der Schmalbandigkeit von DRM+ passen in einen DAB+ Sendeblock bis zu 15 DRM+ Sendeblocke. Es ergibt sich somit die Möglichkeit, neben den DAB+ Aussendungen, genügend Ressourcen für DRM+ Programme bereitzustellen. Das Problem liegt jedoch in den fehlenden Empfangsgeräten. Es gibt zur Zeit faktisch keine preiswerten und universellen Radioempfänger für analoge und die beiden digitalen Rundfunksysteme auf dem Markt. Zur Etablierung des DRM+ Systems ist es aber zwingend erforderlich, dass bestehende DAB+ Empfangsgeräte mit einfachen Mitteln auf das neue System umgerüstet werden können, oder bereits die Unterstützung für DRM+ beinhalten.

Hieraus resultiert das Ziel dieser Arbeit: Der Entwurf und Bau eines günstigen Empfängers auf Basis eines DAB+ Frontends, der neben den bekannten Rundfunksystemen wie AM, FM oder DAB+ auch DRM+ empfangen kann. Der Empfänger soll aus frei auf dem Markt erhältlichen Bauteilen bestehen und vom Aussehen und der Bedienung einem handelsüblichen portablen Radioempfänger entsprechen. Die Qualität des Empfängers soll in dieser Arbeit anschließend messtechnisch bewertet werden.

## 1. Einführung

---

Der vorliegende Bericht gliedert sich wie folgt:

**Kapitel 1** beschreibt die Vorgaben an den Empfänger und listet mögliche Hardwarekomponenten zur Verwirklichung auf.

**Kapitel 2** beschreibt detailliert den Aufbau des Empfängerprototyps mit der getroffenen Hardwareauswahl.

**Kapitel 3** erläutert die Messanforderungen zur Bewertung der Qualität des Empfängers.

**Kapitel 4** zeigt den Messaufbau mit der verwendeten Hardware auf.

**Kapitel 5** beschreibt die Messungen, die im Rahmen der Arbeit auf der Sendeseite und mit dem Empfängerprototyp auf der Empfangsseite in Bezug auf Dynamikbereich, Signal-Stör-Abstand, Fadingverhalten und Schutzabstand durchgeführt wurden.

**Kapitel 6** beschreibt die Präsentation des Empfängers.

**Kapitel 7** fasst das Ergebnis der Arbeit zusammen und gibt eine Bewertung über den entwickelten Empfänger.

### 1.2. Prinzip der digitalen Übertragung

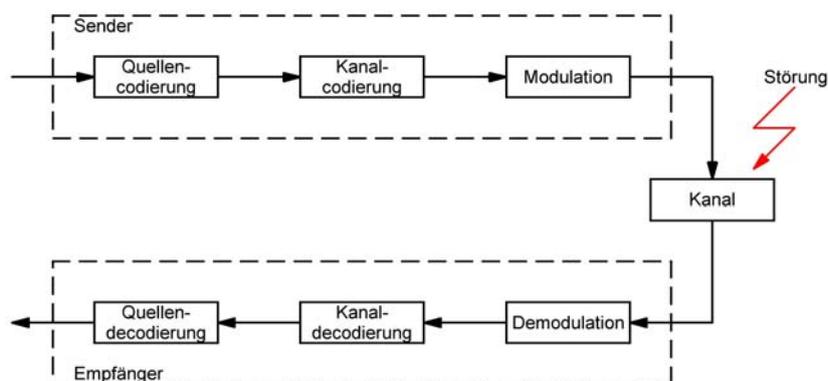


Abbildung 1.1.: Elemente eines digitalen Übertragungssystems

In der Abb. 1.1 ist das prinzipielle Blockschaltbild eines digitalen Kommunikationssystems zu sehen. [1]

Bei jedem digitalen Übertragungssystem ist die Quellencodierung entscheidend für die Datenraten der zu übertragenden Nachrichten. Deshalb werden bei der Quellencodierung Redundanzen und Irrelevanzen aus dem Datenstrom gefiltert.

Der nächste wichtige Schritt ist, die Information, die durch den Kanal gesendet werden soll, vor Störungen zu schützen. Es wird eine absichtliche Redundanz in den Datenstrom eingefügt, um eine gestörte Nachricht am Empfänger zu erkennen und zu korrigieren. Diese Art der Redundanz nennt man Kanalcodierung.

### 1.2.1. Quadratur-Amplitudenmodulation

Die Quadratur-Amplitudenmodulation (QAM) findet sich in vielen heutigen Kommunikationssystemen wieder. Ob Kabelfernsehen, Satellitenfernsehen oder Hörfunk, die QAM ist eine der wichtigsten digitalen Modulationsarten der heutigen Zeit. Abb. 1.2 zeigt den schematischen Aufbau des QAM-Modulators.

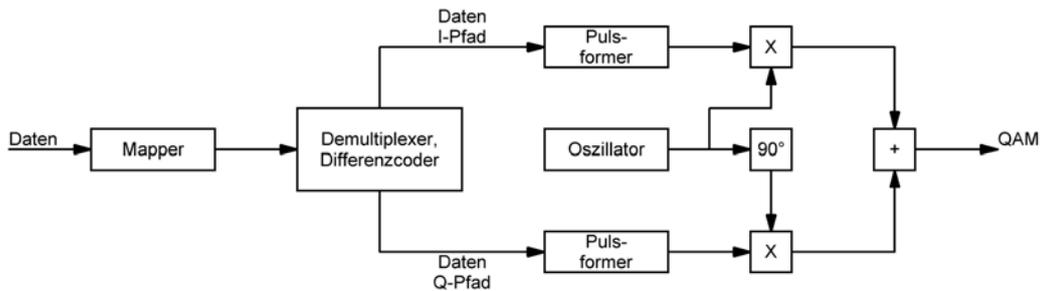


Abbildung 1.2.: QAM-Modulator

Die Datenbits gelangen vom Mapper in den Demultiplexer, der die Bits auf den I- und Q-Pfad aufteilt. Die Pulsformer bilden aus einer Gruppe von Bits Pulse. Bei 4-QAM wird ein Bit genommen und anschließend entweder ein positiver oder ein negativer Puls erzeugt. Für 16-QAM benötigt der Pulsformer zwei Bits und wandelt aus ihnen Pulse mit den Amplitudenstufen -3, -1, 1, oder 3.

Die Pulse werden im I-Pfad in Phase moduliert und im Q-Pfad erfolgt die Modulation mit einem um  $90^\circ$  phasenverschobenen Träger. Zum Schluss folgt die Addition der beiden Komponenten und man erhält das QAM-Signal. [2]

In Abb. 1.3 sieht man das typische Konstellationsdiagramm eines 16-QAM Signals. Die einzelnen Punkte sind mit Hilfe des Gray-Codes codiert. Die vorderen beiden Bits geben den Quadranten an, die hinteren die Position innerhalb des Quadranten.

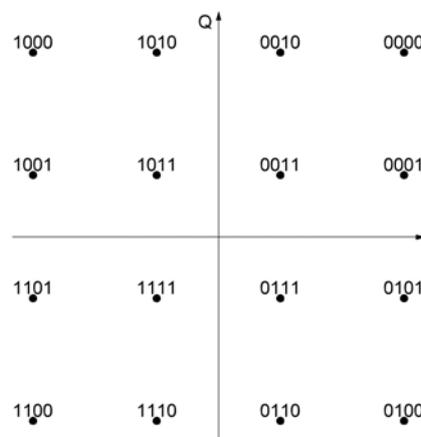


Abbildung 1.3.: Konstellationsdiagramm 16-QAM

### 1.2.2. Orthogonal-Frequency-Division Multiplexing

Orthogonal-Frequency-Division Multiplexing (OFDM) gehört zur Klasse der Mehrträgermodulationsarten. Die Idee dieses Verfahrens ist es, dass man im Gegensatz zur reinen QAM nicht einen einzigen Breitbandkanal zur Übertragung benutzt, sondern aus dem Kanal viele schmalbandige Subkanäle erzeugt und über diese die Informationen überträgt.

Das hat folgende Vorteile:

- Robustheit bei Mehrwegeausbreitung
- relativ unempfindlich gegen ungenaue Zeitsynchronisation
- flexibel hinsichtlich Anpassung an schlechte Kanalzustände

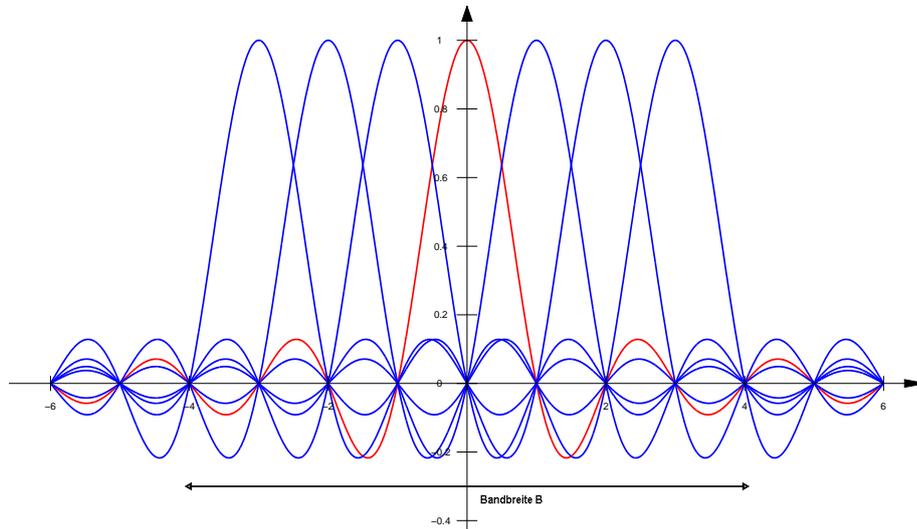


Abbildung 1.4.: Fourier-Spektrum des OFDM-Signals

Abb. 1.4 zeigt beispielhaft das ideale Spektrum eines OFDM-Signals. Jeder sinc-Wellenzug repräsentiert einen Subträger der Breite  $\Delta f$  mit einem Abstand von  $\frac{1}{T_u}$ . Wie oben erwähnt, kann man auf einem Übertragungskanal für ein QAM-Einträgersignal, welches einen Breitbandkanal  $B$  belegt, mit Hilfe des OFDM-Verfahrens auch ein Mehrträgersignal mit  $n$  schmalbandigen QAM-modulierten Subkanälen übertragen.

Die Orthogonalität der Subkanäle zeigt sich in Abb. 1.4 darin, dass bei jedem Peak die anderen Subträger Nulldurchgänge aufweisen.

Durch die Mehrwegeausbreitung kann die Orthogonalität verloren gehen und es entstehen sogenannte Intersymbol- und Intercarrierinterferenzen (ISI und ICI). Dies kann man durch die Einführung eines Guardintervalls verhindern, das die Symboldauer  $T_u$  auf  $T_u + T_G$  verlängert.

Das Guardintervall lässt sich mit Hilfe des „zyklischen Präfix“ realisieren. Bei dieser Lösung wird das Ende eines OFDM-Symbols dem OFDM-Symbol selbst vorangestellt. Dadurch, dass das Empfangssignal erst nach dem Präfix ausgewertet wird, tritt keine ISI und ICI auf, sofern  $T_G$  länger als die Dauer der Kanalimpulsantwort ist. Zur besseren Anschaulichkeit der Vermeidung von ISI und ICI hilft Abb. 1.5.

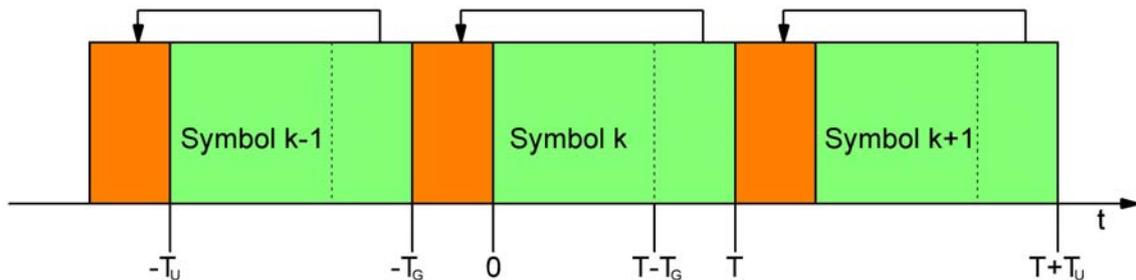


Abbildung 1.5.: zyklischer Präfix zur Aufhebung von ISI und ICI [3]

In der nächsten Abb. 1.6 wird der schematische Aufbau des OFDM-Modulators dargestellt.

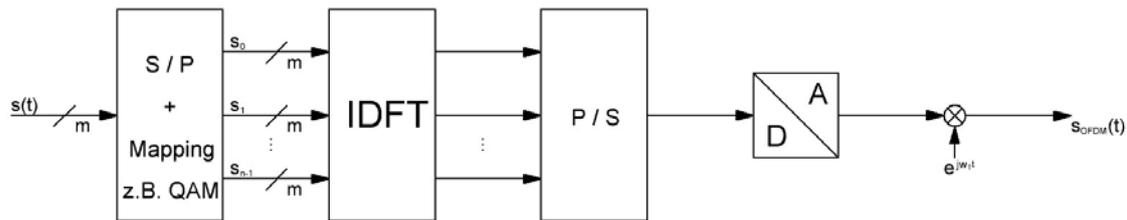


Abbildung 1.6.: OFDM-Modulator

Die Informationsbits werden nach dem Seriell-Parallel-Wandler zum Mapper geleitet und dort für jeden Subträger z. B. auf QAM-Signale abgebildet. Dann verteilen sich die Symbole auf die parallelen Zweige. Die Anzahl der Zweige kann frei gewählt werden. Diese ist gleich der Anzahl der Subträger eines OFDM-Signals. Anschließend durchläuft der parallele Datenstrom die IDFT (Inverse Diskrete Fourier-Transformation). Die IDFT ist leicht mit Hilfe des Algorithmus der Fast-Fourier-Transformation (FFT) zu realisieren. Um das OFDM-Signal zu erzeugen, folgt die Umsetzung auf einen seriellen Datenstrom, welcher anschließend digital-analog gewandelt wird. [2]

Die mathematische Beschreibung des OFDM-Signals lautet:

$$s_{OFDM}(t) = \sum_{k=0}^{n-1} s_k \cdot e^{j2\pi k \frac{t}{T_{Symbol}}} \cdot \text{rect} \left( \frac{t - \frac{T_{Symbol}}{2}}{T_{Symbol}} \right) \quad (1.1)$$

$$S_{OFDM}(f) = \sum_{k=0}^{n-1} |s_k| \cdot e^{j\varphi_{s_k}} \cdot \text{si} \left( \pi T_{Symbol} \left( f - \frac{k}{T_{Symbol}} \right) \right) \quad (1.2)$$

Nach dieser Basisband-Modulation wird das OFDM-Signal auf die für das Sendesignal gewünschte Trägerfrequenz gemischt.

### 1.2.3. Digital Radio Mondiale

Digital Radio Mondiale (DRM) wurde ursprünglich entwickelt um den Lang-, Mittel-, Kurwellenbereich zu digitalisieren. Das Ziel war es, die schlechte Audioqualität der Mittelwelle zu verbessern, also eine Ablösung der Amplitudenmodulation im LW/MW/KW - Bereich bis 30 MHz.

DRM nutzt als Übertragungsverfahren OFDM, das auch bei DAB/DAB+ Verwendung findet. Im DRM Standard sind fünf verschiedene Ausbreitungsmodi definiert (Modus A bis Modus E). Der Modus E stellt eine Erweiterung des ursprünglichen DRM-Konzeptes dar und spezifiziert die Systemvariante *DRM+*, welche für die Übertragung im VHF-Band genutzt wird. DRM+ unterscheidet sich von DRM lediglich in den OFDM-Parametern und der Datenkapazität. [4]

Technische Spezifikationen DRM+:

- Bandbreite: 96 kHz
- Maximale Nettodatenrate:  $186 \frac{kbit}{s}$
- Maximale Spektrumseffizienz:  $1,9 \frac{bit/s}{Hz}$
- Audiocodec: MPEG 4 AACv2
- Multiplex mit max. vier Diensten (Audio/Daten/Zusatzdienste)

In Abbildung 1.7 wird beispielhaft die Erzeugung eines DRM-Sendesignals gezeigt.

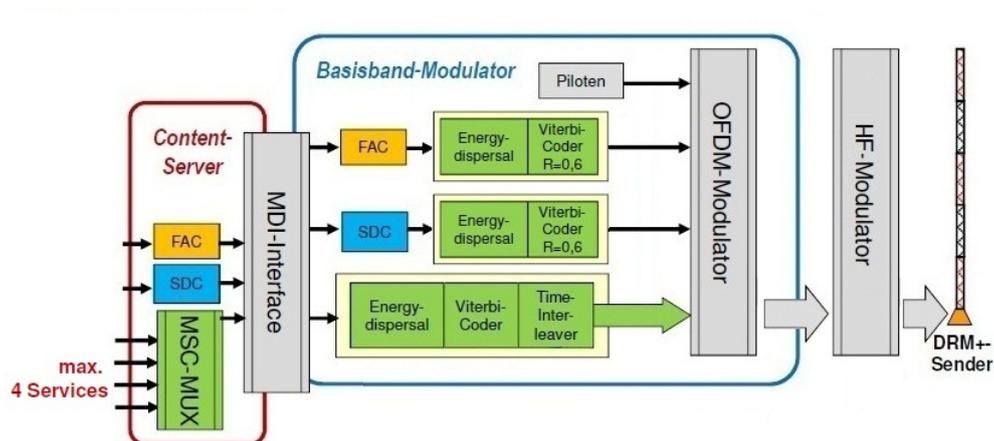


Abbildung 1.7.: Erzeugung DRM-Sendesignal [5]

Im Contentserver werden die Komponenten Fast Access Channel (FAC), Service Description Channel (SDC) und Main Service Channel (MSC) zum Multiplexdatenstrom zusammengefasst und über die MDI Schnittstelle an den Basisbandmodulator übertragen. Der FAC beinhaltet

z.B. Informationen zu Kanalbandbreite, Sub- und Pilotträgerabstand und der QAM Auflösung. Der SDC liefert Informationen zum Aufbau des Multiplexstroms und der MSC beinhaltet die maximal vier Programm- oder Datendienste.

### 1.3. Vorgaben für das Gerät

Ziel des Projekts ist der Entwurf und Bau eines Multinorm-Empfängers, der verschiedene Hörfunkprogramme und Zusatzdienste empfangen kann. Der Empfänger soll vom Aussehen und der Bedienung einem handelsüblichen portablen Radioempfänger entsprechen. Die Hardware soll aus kostengünstigen und frei auf dem Markt erhältlichen Bauteilen bestehen. Der Empfang folgender Hörfunksysteme soll verwirklicht werden:

- DRM im Mode E (DRM+) im VHF-Band II (87,5 - 108 MHz)
- DRM im Mode E (DRM+) im VHF-Band III (174 - 230 MHz)
- UKW-FM mit RDS im VHF-Band II (87,5 - 108 MHz)
- AM und DRM im Bereich von 150 kHz - 30 MHz
- Internetradio wahlweise über LAN oder WLAN
- DAB/DAB+ im VHF-Band III (174 - 230 MHz)
- *optional*: DRM+ im VHF-Band I (47 - 74 MHz)

### 1.4. Grundlagen für die Arbeit

#### 1.4.1. Standards

Die Grundlage zur Verwirklichung des Projekts bilden die folgenden, zur Zeit gültigen ETSI-Normen und Standards:

- **ETSI-Norm ES 201980** DRM System Specification, *V3.2.1 (2012-06)* [6]
- **ETSI-Norm EN 300401** DAB Standard, *V1.4.1 (2006-01)* [7]
- **Digital Radio Receiver Profiles** des World DMB Forums, *aktuelle Version vom 17. Dezember 2008* [8]
- **Digital Radio Receiver Profiles** des DRM Consortiums, *aktuelle Version vom 11. September 2009* [9]
- **Minimum Receiver Requirements** des DRM Consortiums, *aktuelle Version 1.0* (Empfang im Band III noch nicht beschrieben, wird jedoch umgesetzt) [10]

### 1.4.2. Kooperationen

Softwareseitig wird das Projekt von zwei Seiten unterstützt:

Michael Feilen [11], wissenschaftlicher Mitarbeiter am „Lehrstuhl für Integrierte Systeme“ der Technischen Universität München, stellt seine selbstentwickelte DRM+ Empfängersoftware *WaveSink* sowie den FM-Decoder *FM Stack* bereit.

Das Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen IIS [12] in Erlangen stellt eine DRM+ Empfängersoftware sowie eine DAB+ Empfängersoftware zur Verfügung.

Auf der Hardwareseite erhält das Projekt die Unterstützung für den Labor- und Messaufbau von Prof. Dr.-Ing. Andreas Steil [13] von der Fachhochschule Kaiserslautern und ebenfalls vom Fraunhofer IIS.

### 1.5. Vorüberlegungen

Für die Verwirklichung des Projekts sind verschiedene Vorüberlegungen notwendig. Hierzu zählen sowohl die Auswahl der Software zur Decodierung der Hörfunksysteme, die der Multinorm-Empfänger beherrschen soll, als auch die Auswahl der möglichen Hardwarekomponenten.

Zur besseren Übersicht soll zuerst der Grundaufbau des Empfängers grob beschrieben werden. Dieser besteht aus einer Kombination verschiedener HF-Receiver für die verschiedenen Frequenzbändern mit einem Einplatinencomputer und einem Anzeige-/ Eingabegerät, siehe Abb. 1.8.

Zur Auswahl stehen folgende Hardwarekomponenten:

- Terratec Noxon DAB-Stick [14]
- Ettus Research USRP 1 [15]
- Microtelecom Perseus VLF-LF-MF-HF Receiver [16]
- *pandaboard ES (Einplatinencomputer)* [17]
- Chumby 8 (*Touchscreen-Internetradio*) [18]
- Chipsee - Pandaboard Expansion Kit (*LCD + Touchpanel*) [19]
- LVDS Adapter V2 + 10“ LCD mit Touchscreen (*LCD + Touchpanel*) [20]

Die Basis des Empfängers bildet das *pandaboard ES*. Es dient als Systemplattform mit einem Linux-Betriebssystem für die Empfängersoftware und übernimmt damit die komplette digitale Signalverarbeitung. Über die USB-Schnittstelle können die HF-Receiver mit dem Board verbunden werden. Zur Bedienung und Anzeige (I/O) stellt die Systemplattform in Kombination mit dem Chumby 8 einen HTTP-Server bereit, der zur Steuerung der Empfängersoftware verwendet wird. Bei Verwendung eines LCD-Bildschirms mit Touchpanel ist die Bereitstellung einer grafischen Bedienoberfläche (GUI - *Graphical User Interface*) durch die Systemplattform notwendig.

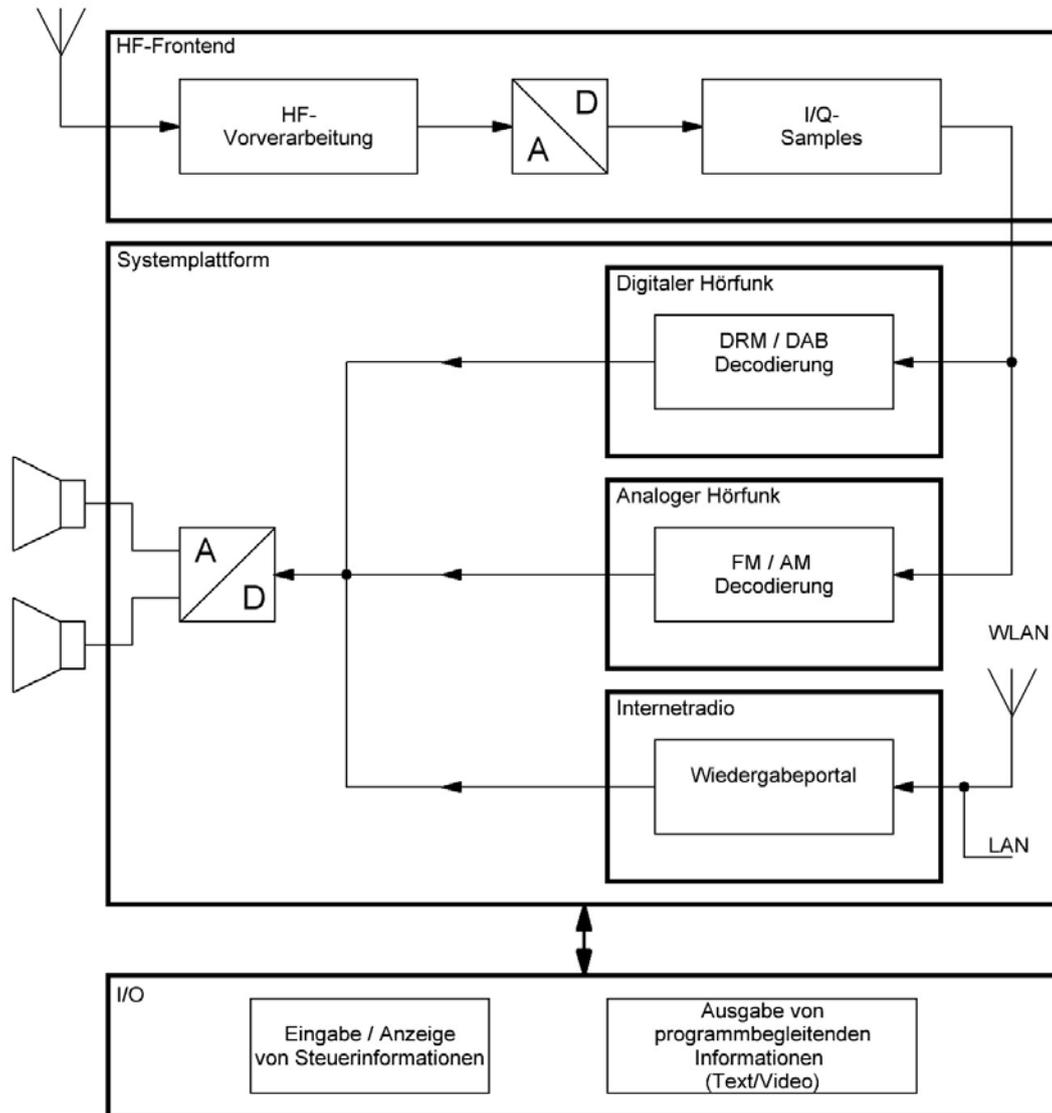


Abbildung 1.8.: Empfängeraufbau

### 1.5.1. Funktionelle Beschreibung - Software

Der Multinorm-Empfänger soll, wie in Kapitel 1.3 angegeben, die folgenden Hörfunksysteme unterstützen (siehe Abb. 1.9). Zusätzlich werden Angaben gemacht, mit welcher Software die Decodierung erfolgen kann.

- **DRM30**

Die Decodierung kann mit Hilfe einer Software des Fraunhofer IIS (*Fraunhofer Software Radio* [21]) oder mit freien Softwareangeboten wie z.B. *DREAM* [22] oder *GNU Radio* [23] erfolgen.

- **DRM+**

Die Decodierung von DRM+ soll mit den in Kapitel 1.4.2 genannten Softwarelösungen von Michael Feilen und dem Fraunhofer IIS erfolgen.

- **DAB/DAB+**

Es muss beim Fraunhofer IIS angefragt werden, ob eine entsprechende Decodersoftware zur Verfügung gestellt wird. Durch die TU München kann evtl. eine weitere Decodersoftware bereitgestellt werden.

- **UKW-FM mit RDS**

Zur Decodierung kann die Software *FM Stack* von Michael Feilen verwendet werden.

- **LW/MW/KW-AM**

Die AM-Decodierung kann entweder über eine frei verfügbare Software (*GNU Radio*) oder evtl. über eine des Fraunhofer IIS erfolgen.

- **Internetradio**

Zum Empfang von Internetradio kann ein benutzerfreundliches Webportal wie z.B. *Shoutcast* [24] oder *Icecast* [25] eingebunden werden.

#### 1.5.1.1. Decodersoftware WaveSink

Die *WaveSink* DRM+ Decodersoftware von Michael Feilen nutzt den Audiocodec *CELT* [26]. Alternativ besteht die Möglichkeit der Umstellung auf den *MPEG4 AAC+* Audiocodec. Der Zusatzdienst *MOT* wird unterstützt.

Mit der Software *FM Stack* wird der UKW-FM Empfang ermöglicht. Die Funktionalität des Dienstes RDS ist wünschenswert, jedoch besitzt die Integration im Multinorm-Empfänger niedrige Priorität.

#### 1.5.1.2. Decodersoftware des Fraunhofer IIS

Die Decodersoftware des Fraunhofer IIS ermöglicht den Empfang von DRM+. Die Software nutzt als Audiocodec *MPEG4 AAC+*. Eine entsprechende Lizenz zur Nutzung dieses Codecs wird benötigt. Als Dienste sollen *Journaline/MOT* und *Diveemo* [27] integriert werden.

Der Empfang von DAB/DAB+ soll ebenfalls mit einer Decodersoftware des Fraunhofer IIS ermöglicht werden.

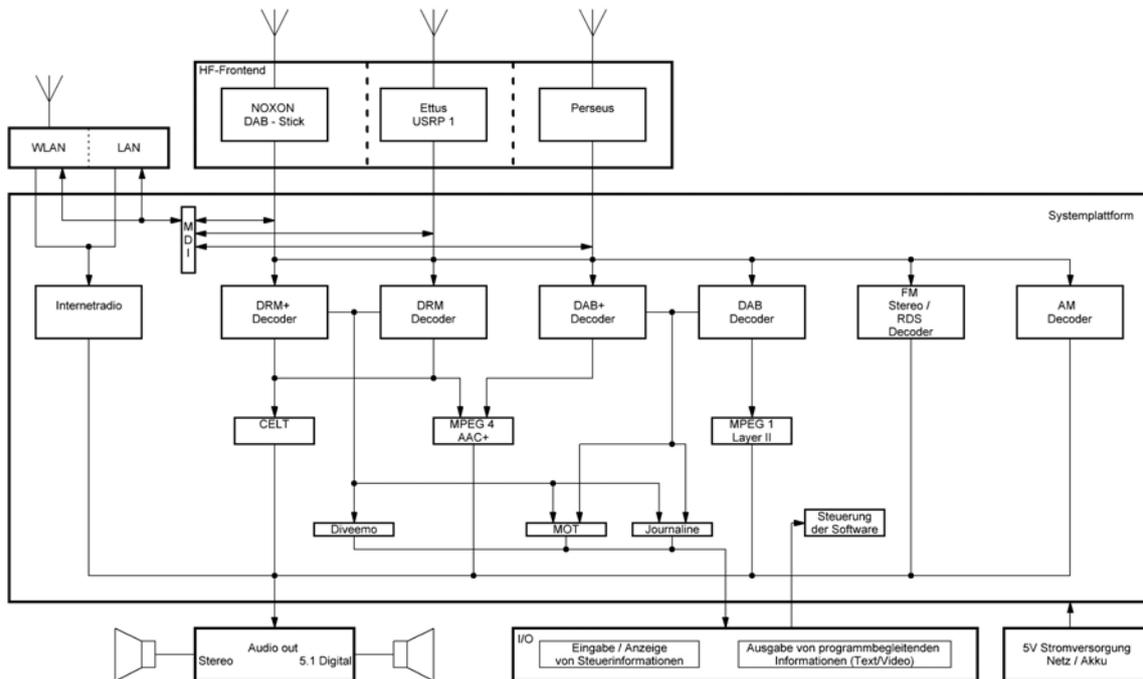


Abbildung 1.9.: Funktioneller Aufbau des Empfängers

### 1.5.2. Physikalische Beschreibung - Hardware

Die Hardwarekomponenten müssen den Empfang sowie die Wiedergabe der Hörfunksysteme des vorherigen Abschnitts möglich machen. Der Multinorm-Empfänger muss Informationen ausgeben sowie Steuerbefehle entgegen nehmen können. In Abbildung 1.10 ist beispielhaft der Empfangsweg eines DRM+ Signals aufgeführt.

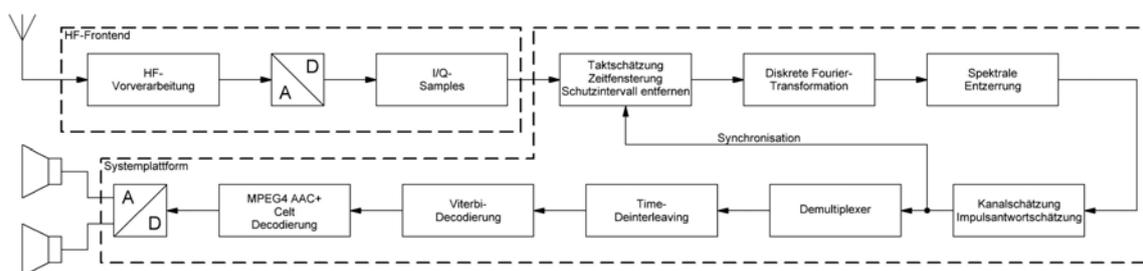


Abbildung 1.10.: Empfangskette DRM+

### 1.5.2.1. HF-Frontend

#### 1.5.2.1.1. Terratec Noxon DAB-Stick

Der Noxon DAB-Stick [14] der Firma Terratec (Abb. 1.11) ermöglicht eine Frequenzabdeckung von 60 MHz - 1,7 GHz. Der verbauten Chip von der Firma Realtek hat die Modellnummer *RTL2832U* [28]. Der Stick dient zum Empfang von DRM+, DAB+, UKW-FM sowie DVB-T. Empfang im AM-Bereich ist nicht möglich. Durch seinen niedrigen Preis von 24,99 € ermöglicht er eine kostengünstige Möglichkeit, die VHF Bänder II und III zu empfangen. Es gibt zwei verschiedene Revisionen des Noxon DAB-Sticks, die sich jedoch nur durch den verbauten Tuner unterscheiden. Noxon DAB-Sticks der Revision 1 haben den *Fitipower FC0013* Tuner, Sticks der Revision 2 den *Elonics E4000* Tuner verbaut. In wieweit sich der Stick mit seinen HF-Eigenschaften für die Realisierung des Projektes eignet, wird sich im Verlauf der Studienarbeit herausstellen.

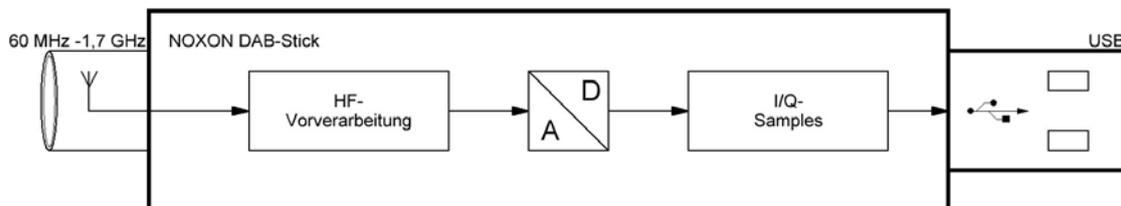


Abbildung 1.11.: Terratec Noxon DAB-Stick

#### 1.5.2.1.2. Ettus Research USRP 1

Der Name des USRP 1 [15] der Firma Ettus Research steht für *Universal Software Radio Peripheral* und bezeichnet ein Gerät, welches als SDR (*Software Defined Radio*) arbeitet, also der Realisierung von Sender und Empfänger mit digitaler Signalverarbeitung. Durch die Erweiterungen des Basismainboards mit bestimmten Daughterboards kann man verschiedene HF-Frequenzbereiche abdecken, siehe Abb. 1.12. Durch Integration des Daughterboards *LFRX* für den Frequenzbereich von 0 - 30 MHz und das Daughterboard *WBX* für den Frequenzbereich von 50 MHz - 2,2 GHz hat man das Frequenzspektrum für LW/MW/KW und die VHF Bänder I, II und III komplett erfasst.

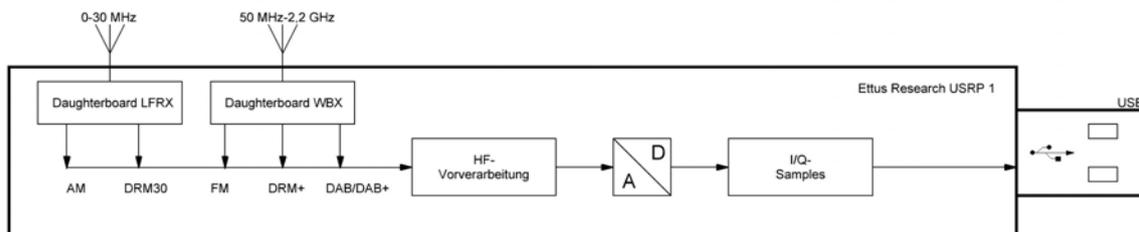


Abbildung 1.12.: Ettus Research USRP 1 + LFRX und WBX - Board

Der Vorteil des USRP liegt eindeutig in der hohen Samplefrequenz (Signalbandbreite) mit anschließender digitaler Filterung, als Nachteil erweist sich der doch recht hohe Anschaffungspreis von 700 USD für den *USRP 1*, 75 USD für das Daughterboard *LFRX* und 450 USD

für das Daughterboard *WBX*. Zu beachten ist auch, dass andere Basisgeräteversionen der USRP-Familie die Möglichkeit der gleichzeitigen Integration beider Daughterboards nicht bereitstellen.

### 1.5.2.1.3. Microtelecom Perseus

Der Perseus-Empfänger [16] ist ein SDR-Frontend für den Frequenzbereich von 10 kHz bis 30 MHz (Abb. 1.13). Dieser wird benötigt, um den Frequenzbereich von AM und DRM30 abzudecken. Durch auswählbare Filterbänke wird vermutlich eine hohe Frequenzselektivität und Spiegelfrequenzunterdrückung erreicht. Mit einem Preis von 849,00 € ist dies jedoch nicht die kostengünstigste Methode, um in erster Linie AM/DRM30 empfangen zu können.

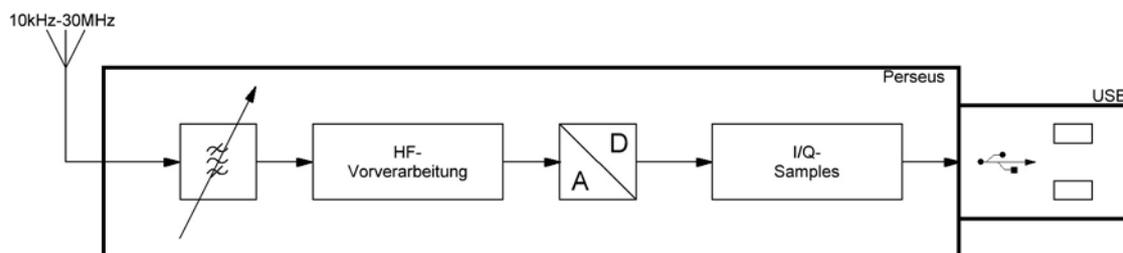


Abbildung 1.13.: Microtelecom Perseus SDR Empfänger

### 1.5.2.2. Systemplattform: *pandaboard ES*

Das *pandaboard ES* dient zum einen als zentrale Kommunikationsschnittstelle zwischen allen weiteren Komponenten, zum anderen übernimmt es die Funktion der digitalen Signalverarbeitung. Über die USB-Schnittstelle werden I/Q-Samples der Frontend-Receiver verarbeitet. Aufgrund der geringen Abmaße ist es leicht in ein kleines Gehäuse zu integrieren und mit 182 USD auch relativ günstig. Durch die einfache Spannungsversorgung von 5V kann es auch ohne Probleme mit einem Akku betrieben werden. Das *pandaboard ES* hat einen *OMAP 4460*-Prozessor (Dualcore ARM Cortex-A9) mit 1,2 GHz - 1,5 GHz, siehe Abb. 1.14. Als Betriebssystem wird eine Linux-Distribution auf einer SDHC-Karte genutzt.

Das *pandaboard ES* liefert von Werk aus nachfolgend aufgeführte Anschlussmöglichkeiten:

- 1x 5 VDC Spannungsversorgung
- 1x 10/100 MBit LAN Anschluss
- 2x USB 2.0 Anschlüsse
- 1x Mini-USB 2.0 On-the-go Anschluss
- 1x HDMI (DVI) out
- 1x HDMI Digital Audio out
- 1x 3,5 mm Stereo in
- 1x 3,5 mm Stereo out
- WLAN
- Bluetooth
- RS 232 COM-Schnittstelle
- SD-Kartenslot

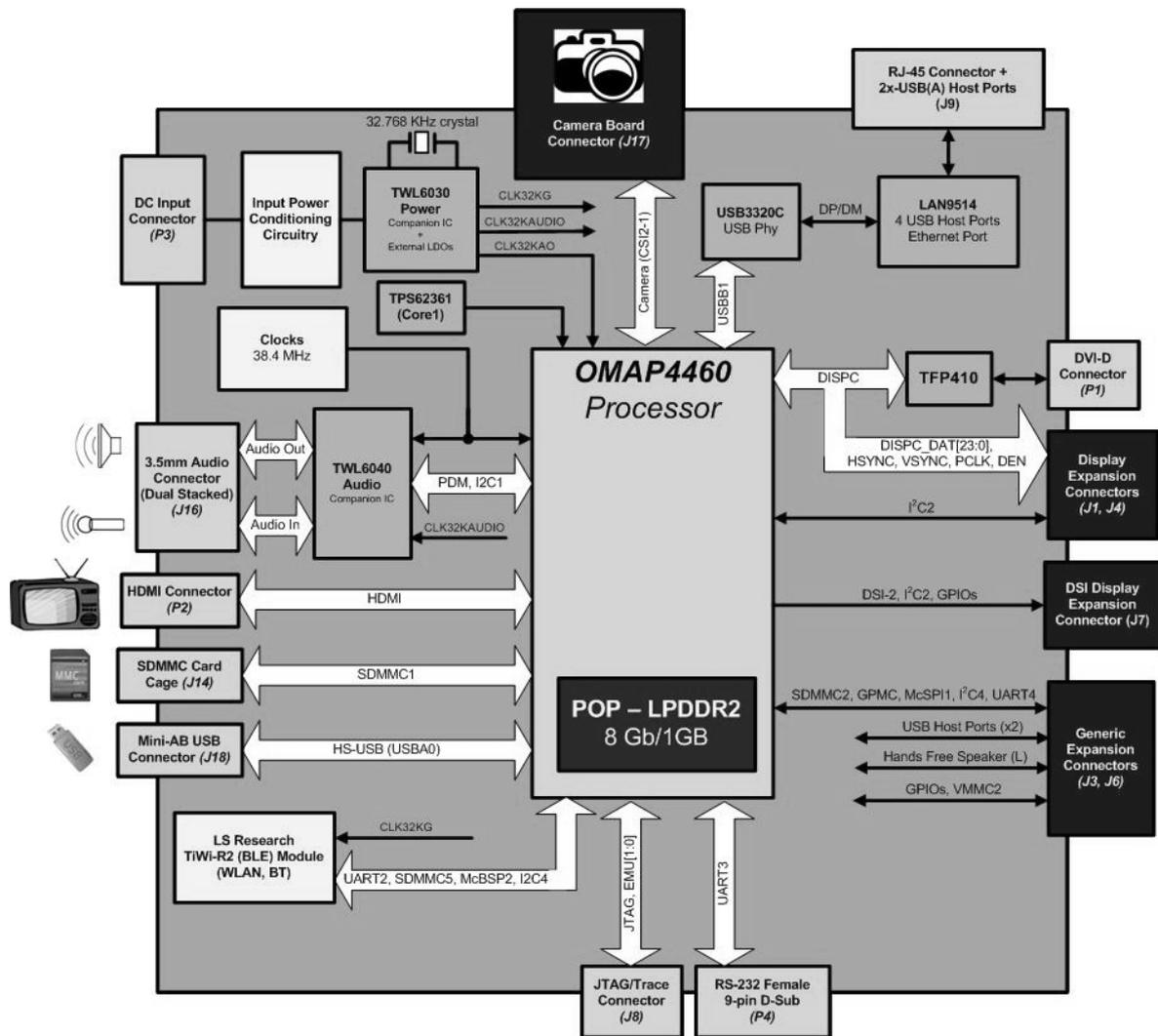


Abbildung 1.14.: Blockschaltbild *pandaboard ES* [17]

### 1.5.2.3. Ein-/Ausgabe: Benutzerinterface

#### 1.5.2.3.1. Chumby 8

Das Chumby 8 der Firma *chumby industries* ist ein Internetradio mit Touchscreen für 179,00 €. Da die Software des Gerätes auf einem Linux-Betriebssystem basiert, ist es möglich, eine alternative Linuxdistribution zu installieren, um sie an die Bedürfnisse des Projekts anzupassen. Das *pandaboard ES* müsste dazu einen HTTP-Server bereitstellen, über welchen die Empfängersoftware gesteuert und Informationen ausgegeben werden können. Mit Hilfe des Touchscreens kann man alle Eingabefunktionen bequem ausführen und sich sämtliche Bildinformationen ausgeben lassen.

### 1.5.2.3.2. LCD Screen mit Touchpanel

Neben der Nutzung des Chumby 8 gibt es noch die Möglichkeit des Anschlusses eines LCD-Bildschirmes mit Touchpanel direkt am *pandaboard ES*. Man könnte so die Steuerung des *pandaboard ES* ohne Umweg über ein weiteres Linuxsystem realisieren. Das Board würde in diesem Fall auch die Ein- und Ausgabe übernehmen und müsste eine GUI zur Steuerung der Empfängersoftware bereitstellen. Welches System sich für das Projekt eignet, hängt u.a. von der Stromaufnahme sowie von der Bedienerfreundlichkeit ab und soll sich im Verlauf der Arbeit herausstellen.

Folgende Systeme stehen zur Auswahl:

#### 1.5.2.3.2.1. Chipsee - Pandaboard Expansion Kit

Das Chipsee - Pandaboard Expansion Kit [19] kostet 189,00 € und beinhaltet einen 7 Zoll LCD-Bildschirm (Auflösung: 800x480) mit Touchpanel sowie eine Anschlussplatine, die außer dem Displayconnector noch 5 Hardwaretasten, einen SIM Kartenslot sowie Anschlussmöglichkeiten für eine GPS- oder WCDMA-Antenne bereitstellt. Das Erweiterungskit ist eigentlich zum Entwickeln von Smartphone-Programmen auf dem *pandaboard ES* gedacht, daher die Unterstützung der mobilen Kommunikation. Für den Multinorm-Empfänger dient aber in erster Linie das Display inkl. Touchpanel und die Hardwaretasten, z.B. zur Lautstärkeregelung. Die Verbindung zum *pandaboard ES* wird über Steckkontakte hergestellt.

#### 1.5.2.3.2.2. LVDS Adapter V2 + 10“ LCD mit Touchscreen

Dieses Touchpanel Kit [20] kostet 132,09 € und beinhaltet einen 10 Zoll großen LCD-Bildschirm (Auflösung: 1024x600) sowie eine kleine Anschlussplatine, welche die Ansteuerung des Displays übernimmt und sogar eine Helligkeitsregelung bereitstellt. Das Touchpanel wird über die USB-Schnittstelle angeschlossen, die Platine wird über Steckkontakte mit dem *pandaboard ES* verbunden. Durch die große Auflösung und die große Bilddiagonale lassen sich auf diesem Bildschirm viele Informationen grafisch darstellen.

## 1.6. Umsetzung

Zunächst wird ein idealer Empfängeraufbau beschrieben, anschließend folgt die Erläuterung des vorerst zu realisierenden Empfängers.

### 1.6.1. Idealer Empfänger

Im idealen Empfänger sind alle geforderten Hörfunksysteme und Empfangsarten implementiert, und er agiert als kompaktes Kofferradio mit eigenständiger Stromversorgung (Abb. 1.15). Der Betrieb am Netzanschluss sowie über den Akku ist möglich. Auf die Implementierung des Perseus Receivers wird verzichtet, da der Frequenzbereich bis 30 MHz sonst durch Nutzung des USRP 1 doppelt abgedeckt wäre.

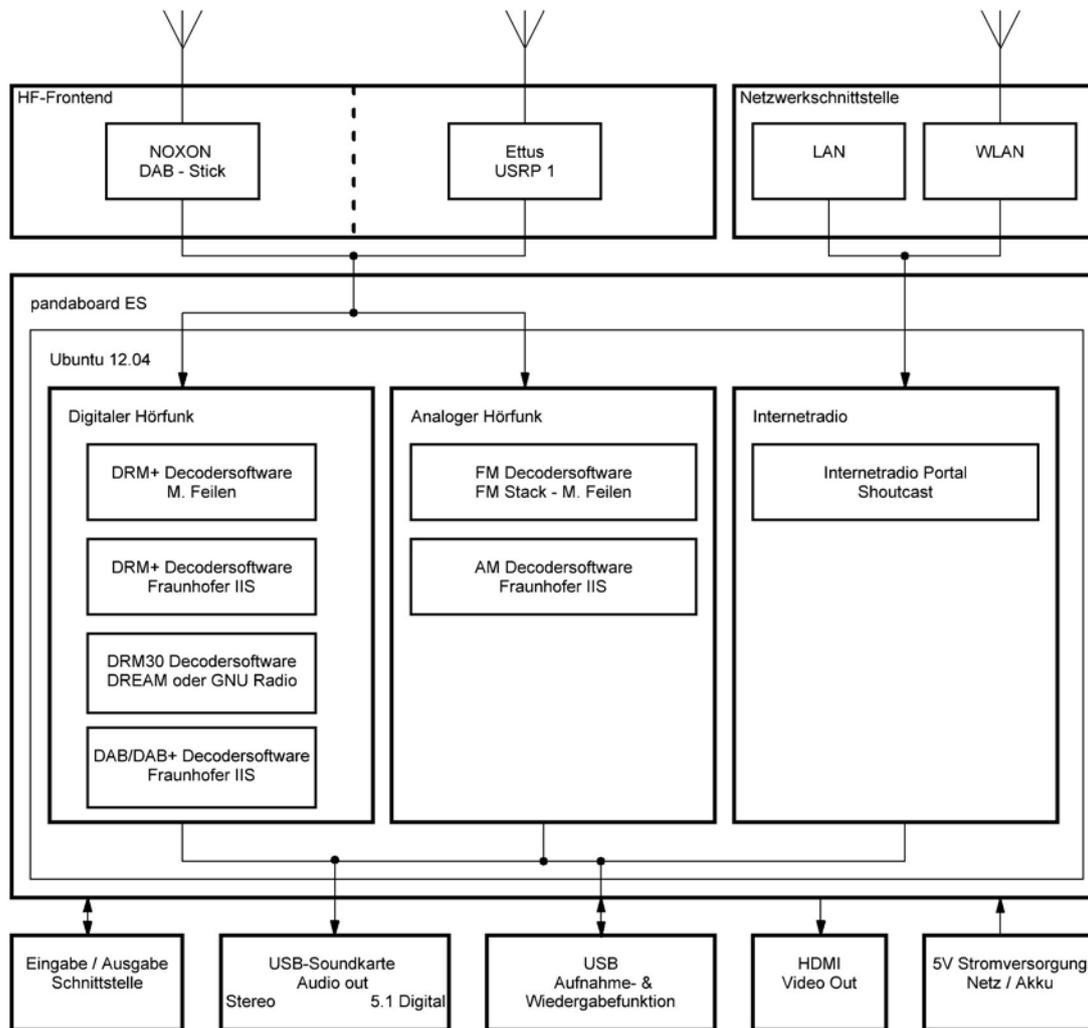


Abbildung 1.15.: Blockschaltbild “Idealer Empfängeraufbau“

### 1.6.1.1. Hörfunksysteme

Der Empfang der Hörfunksysteme **DRM+**, **DRM30**, **DAB+**, **FM-UKW**, **LW/MW/KW-AM** und **Internetradio** ist möglich. Zusätzlich kann **DVB-T** empfangen werden. Die Wiedergabe erfolgt über den verbauten internen LCD-Bildschirm oder alternativ über ein an der HDMI-Schnittstelle angeschlossenes Wiedergabegerät. Die Zusatzdienste *Journaline/MOT* sind über DRM und DAB zu empfangen, *Diveemo* nur über DRM. Bei FM-Empfang wird auch der Dienst *RDS* unterstützt.

### 1.6.1.2. Hardwarekomponenten

#### 1.6.1.2.1. Noxon DAB-Stick

Der Noxon DAB-Stick wird über die USB-Schnittstelle mit dem *pandaboard ES* verbunden und besitzt eine Antennenbuchse zum Anschluss einer externen Antenne. Das Frontend liefert I/Q-Samples an die Decodersoftware. Der Stick ermöglicht den Empfang der Hörfunksysteme DRM+ und DAB+ sowie den Empfang von DVB-T.

#### 1.6.1.2.2. USRP 1

Der USRP 1 mit Daughterboard *LFRX* wird ebenfalls per USB mit dem *pandaboard ES* verbunden, liefert auch I/Q-Samples an die Decodersoftware und stellt mit einer weiteren Antennenanschlussbuchse die Möglichkeit zum Umstecken der externen Antenne für das jeweilig gewünschte Hörfunksystem bereit. Der USRP dient zum Empfang von LW/MW/KW-AM und DRM30.

#### 1.6.1.2.3. *pandaboard ES*

Zur digitalen Signalverarbeitung sind, wie in Kapitel 1.4.2 aufgeführt, die beiden DRM+ Decodersoftwareversionen von Michael Feilen und dem Fraunhofer IIS auf dem *pandaboard ES* installiert. Die Zusatzdienste *Journaline/MOT* sowie *Diveemo* werden unterstützt. Die Decodierung von DAB/DAB+ sowie AM wird über eine weitere Software des Fraunhofer IIS ermöglicht; Michael Feilen sorgt mit seiner Software *FM Stack* für den UKW-FM Empfang. DRM30 decodiert eine frei verfügbare Software wie *DREAM* oder *GNU Radio*. Über das Streamingportal *Shoutcast* können verschiedene Internetradio-Streams ausgewählt werden. Die Audiocodecs *CELT* sowie *MPEG4 AAC+* für den DRM+ bzw. DAB+ - Empfang sind implementiert, zusätzlich für DAB auch der *MPEG1 Layer 2* - Codec. Durch einen 4-fach USB-Hub werden die internen USB - Anschlussmöglichkeiten erweitert und genutzt, um den analogen Soundausgang durch den Anschluss einer USB-Soundkarte mit einem digitalen Audioausgang zu erweitern.

#### 1.6.1.2.4. LCD Screen mit Touchpanel

Zur Anzeige der Bedienoberfläche und zur Entgegennahme von Steuerbefehlen dient ein LCD-Bildschirm mit Touchpanelfunktion.

#### 1.6.1.3. Schnittstellen

Zusätzlich zu den Standardschnittstellen des *pandaboard ES* (Kapitel 1.5.2.2) stehen folgende Anschlussmöglichkeiten zur Verfügung:

- **Antennenanschluss**

Man hat die Möglichkeit zwischen zwei Antennenbuchsen zu wählen; einmal wird das Frontend für den Frequenzbereich bis 30 MHz und einmal das Frontend ab 30 MHz mit der externen Antenne verbunden.

- **Audioanschluss**

Die Audioausgabe kann wahlweise über den analogen Stereo-Ausgang, die digitale "HDMI-Audio out"- Schnittstelle oder über den digitalen Ausgang der USB-Soundkarte erfolgen. Ohne den Anschluss externer Soundwiedergabegeräte erfolgt die Soundausgabe über Stereolautsprecher, welche im Gehäuse des Radios verbaut sind.

- **USB-Anschluss**

Über den USB-Anschluss kann man Mitschnitte der aktuell laufenden Sendung auf einem USB-Stick anfertigen (USB-Aufnahmefunktion). Die Wiedergabe von Audiodateien vom USB-Stick ist ebenfalls möglich.

- **LAN / WLAN**

Die LAN bzw. WLAN-Schnittstelle kann zur Verbindung mit dem Internet genutzt werden und um MDI Daten (DRM - Multiplex Distribution Interface [29]) ein- oder auszu-lesen.

### 1.6.1.4. Graphical User Interface

Die grafische Anzeige dient der Steuerung des *pandaboard ES* und somit auch der Empfängersoftware über das Touchpanel. Der Benutzer kann individuell zwischen den verschiedenen zur Auswahl stehenden Hörfunksystemen wechseln. Die Lautstärkeregelung kann unabhängig vom Hörfunksystem direkt über das Touchpanel oder über die optional zusätzlichen Hardwaretasten geregelt werden.

Folgende Funktionen können angewählt werden:

- Auswahl des gewünschten Hörfunksystems
- Sendersuchlauf (automatisch / manuell / nach Programmname)
- Lautstärkeeinstellung
- Allgemeine Audioeinstellungen
- Anzeige von Senderinformationen
- Datendienste (Journaline / Diveemo)
- DVB-T
- Speicherung von Livemitschnitten
- Wiedergabe von Audiodateien
- Anzeige eines elektronischen Programmführers (EPG)

### 1.6.2. Realer Empfänger

Der reale Empfänger nach Abb. 1.16 wird zunächst als Prototyp im Laboraufbau verwirklicht, anschließend muss ein Gehäuse entworfen werden. Die Stromversorgung erfolgt vorerst nur über Netzgeräte; in einem späteren Entwicklungsschritt soll eine passende Akkustromversorgung realisiert werden.

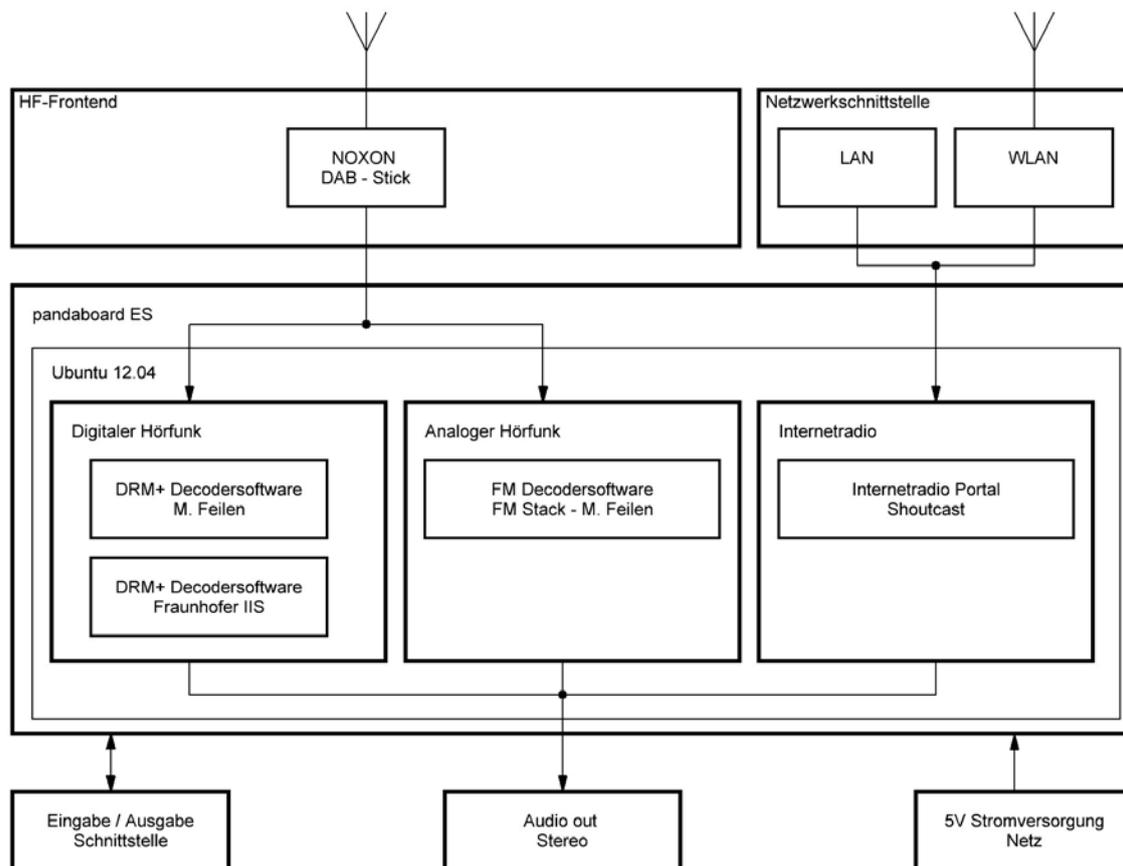


Abbildung 1.16.: Blockschaltbild “Realer Empfängeraufbau“

#### 1.6.2.1. Hörfunksysteme

Dieser Empfänger unterstützt in erster Linie das Hörfunksystem **DRM+** sowie **FM** und **Internetradio**. Optional soll bei vorhandener Decodersoftware auch **DAB+** implementiert werden. Der FM-Empfang soll auch *RDS* unterstützen. Auf die Integration von AM-Empfang wird bei diesem ersten Prototyp verzichtet, da dies den Einbau eines weiteren Frontends und eine für den AM-Bereich geeignete Signalverarbeitung, sprich Empfängersoftware, voraussetzen würde.

### 1.6.2.2. Hardwarekomponenten

#### 1.6.2.2.1. Noxon DAB-Stick

Der Noxon DAB-Stick wird über die USB-Schnittstelle mit dem *pandaboard ES* verbunden und hat eine Antennenbuchse zum Anschluss einer externen Antenne. Das Frontend liefert I/Q-Samples an die Decodersoftware.

#### 1.6.2.2.2. *pandaboard ES*

Wie auch beim idealen Empfänger arbeitet das *pandaboard ES* mit den beiden, in Kapitel 1.4.2 aufgeführten, Empfängerdecodern für DRM+ von Michael Feilen und dem Fraunhofer IIS. Zur FM Decodierung wird die Software *FM Stack* von Michael Feilen verwendet. Internetradio kann man durch Aufrufen des Streamingportals *Shoutcast* empfangen. Außerdem werden die internen Anschlussmöglichkeiten des *pandaboard ES* mit einem 4-fach USB-Hub erweitert. Die USB-Anschlüsse werden zum Anbinden des HF-Receivers genutzt.

In der Entwicklungsphase dienen die USB-Anschlüsse außerdem zum Anschluss von Tastatur und Maus. Das Board ist über den LAN-Anschluss mit dem Internet und zur Anzeige mit einem TFT-Bildschirm über einen HDMI-zu-DVI Adapter verbunden. An der 3,5 mm Stereo-Out-Buchse sind provisorisch Lautsprecher angeschlossen.

#### 1.6.2.2.3. LCD Screen mit Touchpanel

Beide verfügbaren LCD-Bildschirme mit Touchpanelfunktion (Kapitel 1.5.2.3.2) werden in der Entwicklungsphase am *pandaboard ES* angeschlossen, um aktiv feststellen zu können, welches Produkt sich für das Projekt am besten eignet. Entscheidendes Kriterium ist hier die Stromaufnahme, da später eine Akku-Stromversorgung möglich sein soll.

#### 1.6.2.3. Schnittstellen

Der Prototyp liefert somit alle Schnittstellen durch das *pandaboard ES* (Kapitel 1.5.2.2) inkl. der USB-Erweiterung durch das USB-Hub. Die Antennenbuchse des Noxon USB-Sticks ermöglicht es, eine Teleskopantenne anzuschließen. Die Soundausgabe erfolgt über den analogen Soundausgang des *pandaboard ES* auf zwei Stereo-Lautsprecher.

#### 1.6.2.4. Graphical User Interface

Durch die grafische Anzeige lässt sich das *pandaboard ES* und somit auch die Empfängersoftware über das Touchpanel bedienen. Die möglichen Funktionen sind durch die jeweilige Decodersoftware vorgegeben. Grundlegend sollen aber folgende Auswahlmöglichkeiten zur Verfügung stehen:

- Auswahl des gewünschten Hörfunksystems
- Sendersuchlauf (manuell oder automatisch)
- Lautstärkeeinstellung
- Anzeige von Senderinformationen

## 1.7. Produktliste

Tabelle 1.1.: Produktliste

Artikel	Preis	Bezugsadresse
Terratec Noxon DAB-Stick	24,99 €	<a href="http://webshop.terratecshop.net/shop/noxon/10774.html">http://webshop.terratecshop.net/shop/noxon/10774.html</a>
Ettus Research USRP 1 + Daughterboards <i>LFRX</i> und <i>WBX</i>	1225 USD	<a href="https://www.ettus.com/product/details/USRP-PKG">https://www.ettus.com/product/details/USRP-PKG</a>
Microtelecom Perseus VLF-LF-MF-HF Receiver	849,00 €	<a href="http://www.ssb.de/product_info.php?info=p1390_Perseus-SDR--10-kHz---40MHz.html">http://www.ssb.de/product_info.php?info=p1390_Perseus-SDR--10-kHz---40MHz.html</a>
<i>pandaboard ES</i>	182 USD	<a href="http://www.digikey.de/product-detail/de/UEVM4460G-02-01-00/1055-1000-ND/2771679">http://www.digikey.de/product-detail/de/UEVM4460G-02-01-00/1055-1000-ND/2771679</a>
Chumby 8	179,00 €	<a href="http://www.getdigital.de/products/Chumby_8">http://www.getdigital.de/products/Chumby_8</a>
Chipsee - Pandaboard Expansion (Touchpanel Kit)	189,00 €	<a href="http://www.tigal.de/product/2543">http://www.tigal.de/product/2543</a>
LVDS Adapter V2 + 10" LCD mit Touchscreen	132,09 €	<a href="http://www.watterott.com/de/LVDS-Adapter-V2-inkl-10-LCD-Touchscreen">http://www.watterott.com/de/LVDS-Adapter-V2-inkl-10-LCD-Touchscreen</a>



## 2. Kofferaufbau

Nach den Überlegungen des vorherigen Kapitels wird sich der Prototyp aus den folgenden Hauptkomponenten zusammensetzen: *pandaboard ES*, Noxon DAB-USB Stick und dem LVDS Adapter V2 mit 10“ LCD-Bildschirm wegen der einfacheren Integrierbarkeit. Zusätzlich ist ein Audioverstärker, ein Spannungswandler, Lautsprecher und ein USB-Hub notwendig.

### 2.1. Idee zum Bau des Multinormradios im Design „Kofferradio“

Die Idee, den Multinormempfänger in einen Aluminiumkoffer zu integrieren, basiert auf der folgenden Überlegung: Mit einem Aluminiumkoffer dieser Größe ist es relativ leicht möglich, einen ersten Prototypen zu entwerfen. Die verwendete Hardware lässt sich bequem in das Gehäuse einbauen, man kann einfach Änderungen vornehmen oder die benötigte Stromversorgung und Schnittstellenverbindungen verlegen.

Im Weiteren folgen die Details zum Aufbau des „Kofferradios“.



Abbildung 2.1.: Empfänger-Prototyp

## 2.2. Aufbau

### 2.2.1. Die wichtigsten Bauteilen des Kofferradios

#### 2.2.1.1. Aluminiumkoffer

Der ausgefräste Aluminiumkoffer (Abb. 2.2) ist das Gehäuse des Empfängers. Hinter dem Lochraster werden die Lautsprecher angebracht, und die große, rechteckige Ausfräsung ist für das LC-Display bestimmt.

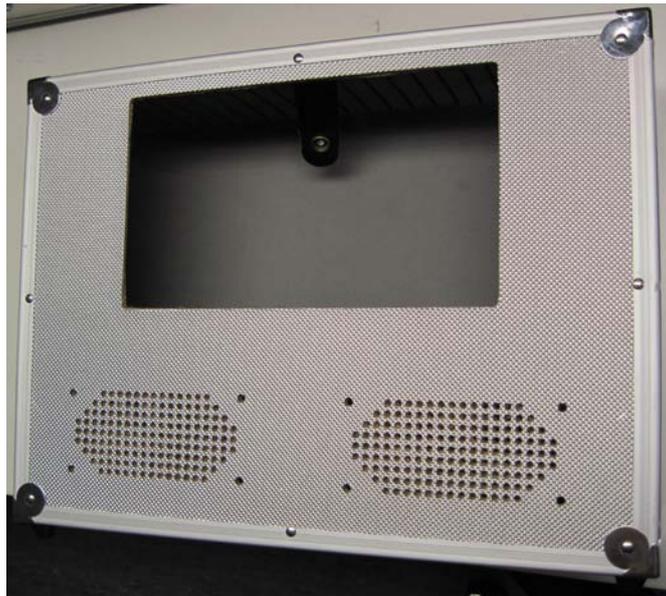


Abbildung 2.2.: Leerer Aluminiumkoffer: Frontansicht

In der seitlichen Ausfräsung (Abb. 2.3) des Koffers wird die Anschlussplatte für Buchsen und Schalter befestigt. Außerdem wurde auf den Kofferboden eine 3 mm dicke PVC-Platte montiert, die dazu dient, die einzelnen Bauteile zu fixieren.



Abbildung 2.3.: Leerer Aluminiumkoffer: Seitenansicht

### 2.2.1.2. Anschlussplatte

Die Anschlussplatte (Abb. 2.4 und 2.5) dient dazu, die Schnittstellen nach außen zu führen. Sie bietet folgende Anschlussmöglichkeiten:

- Spannungsanschluss 12 V über XLR (4-polig)
- Netzschalter
- 3,5 mm Stereo-Klinken-Buchse
- Ethernet (RJ45)
- HDMI
- 2 x USB-A
- IEC-Antennenbuchse



Abbildung 2.4.: unbestückte Anschlussplatte



Abbildung 2.5.: bestückte Anschlussplatte

### 2.2.1.3. *pandaboard ES*

Das *pandaboard ES* (Abb. 2.6) ist das Herzstück des Empfängers. Eine 8 GB SDHC-Karte stellt den Speicherplatz für die Systemsoftware zur Verfügung. Im Folgenden werden die notwendigen Hardwaremodifikationen beschrieben.

Aufgrund der Wärmeentwicklung der CPU des *pandaboard ES* wurde ein Kühlkörper mit Wärmeleitkleber auf das Gehäuse der CPU geklebt. Diese Maßnahme reicht aus, um die Wärme der CPU abzuführen. Weiterhin musste auf dem *pandaboard ES* der Widerstand R85 überbrückt werden (Abb. 2.7), damit auf dem LC-Display Anzeigeartefakte verschwinden [30]. Auf der Rückseite des *pandaboard ES* wurden für die Verbindung von Board und LC-Display noch zwei 20-polige Buchsenleisten angelötet (Abb. 2.8).



Abbildung 2.6.: *pandaboard ES* mit Kühlkörper auf der CPU

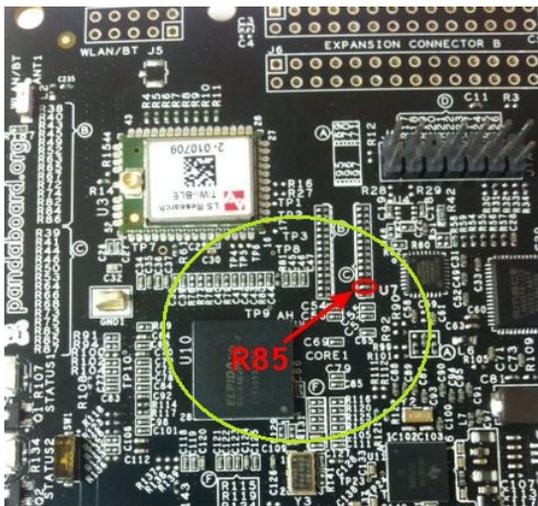


Abbildung 2.7.: überbrückter Widerstand R85 [30]



Abbildung 2.8.: Buchsenleisten

#### 2.2.1.4. LCD-Touchscreen

Das Display-Set „LVDS Adapter V2 + 10“ LCD mit Touchscreen“ (Abb. 2.9) besteht aus:

- einem kapazitiven Display
- einer Anschlussplatine
- einem USB-Kabel
- einem Verbindungskabel für die grafischen Informationen

Die Auswahl fiel auf dieses Produkt, da die Touchscreenfunktionalität einfach über die USB-Schnittstelle realisiert wird. Weiter besteht die Möglichkeit, mit dem Hersteller Kontakt aufzunehmen um Informationen zur Konfiguration des Betriebssystems zu erhalten, damit die Anzeige auf dem Bildschirm richtig dargestellt wird. Dies war bei dem anderen LCD-Bildschirm (Kap. 1.5.2.3.2.1) nicht gegeben.



Abbildung 2.9.: LCD-Touchscreen

Zu Beachten ist hier, dass auf der Anschlussplatine noch ein  $33 \Omega$  Widerstand einzulöten ist (siehe Abb. 2.10). Der Widerstand wird in die Taktleitung der Anschlussplatine integriert und beeinflusst so das Taktsignal der LCD-Steuerung. Dadurch werden Anzeigeartefakte auf dem LC-Display unterbunden [30].

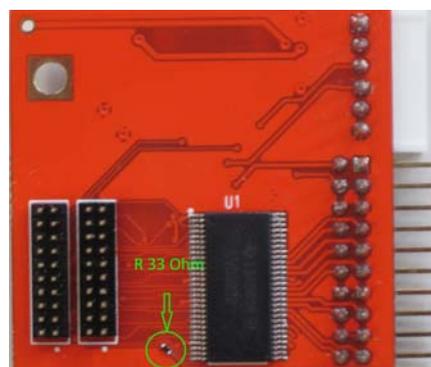


Abbildung 2.10.: LCD-Platine mit eingebautem Widerstand

### 2.2.1.5. Audioverstärker

Der Audioverstärker (Abb. 2.11) hat eine Ausgangsleistung von  $2 * 5 \text{ W}$  und ist ein Fertigbausatz. Seine Betriebsspannung liegt zwischen  $8 \text{ V}$  und  $16 \text{ V}$ . Er dient lediglich dazu, die Audiosignale zu verstärken und an die Lautsprecher weiterzugeben. Wenn externe Lautsprecher über die Stereo-Klinken-Buchse angeschlossen werden, wird der Audioverstärker automatisch deaktiviert.



Abbildung 2.11.: Audioverstärker

### 2.2.1.6. NOXON-Stick

Der NOXON-Stick (Abb. 2.12) ist das HF-Frontend des Empfängers. Dieser wandelt das empfangene HF-Signal in das Basisband um und gibt dieses Signal via USB an den Decoder auf dem *pandaboard ES* weiter.



Abbildung 2.12.: NOXON Stick

### 2.2.1.7. KFZ-Spannungswandler

Da der Empfänger mit einer Spannung von  $12 \text{ V DC}$  gespeist wird und das *pandaboard ES* eine Spannung von  $5 \text{ V DC}$  als Betriebsspannung benötigt, wurde ein handelsüblicher KFZ-Spannungswandler (Abb. 2.13) zur Bereitstellung der  $5 \text{ V DC}$  für das Board eingebaut. Das Gehäuse des Step-Down-Schaltspannungswandlers wurde entfernt, Schaltlitzen für den Anschluss der  $12 \text{ V}$  und für den  $5 \text{ V}$  Abgang angelötet.

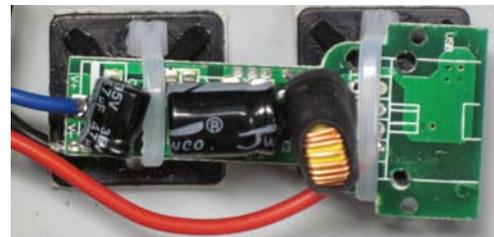


Abbildung 2.13.: Spannungswandler ohne Gehäuse

### 2.2.1.8. Akku

Der Empfänger ist mit einem Lithium-Polymer Akku ausgestattet. So kann das Kofferradio auch ohne Netzspannung betrieben werden. Die automatische Umschaltung zwischen Netz- und Akkubetrieb erfolgt durch eine Elektronikschaltung (siehe Abb. 2.15). Der Akku hat eine Kapazität von  $2700 \text{ mAh}$  und liefert  $11,1 \text{ V}$ . Im Empfänger ist eine Unterspannungsüberwachung eingebaut, diese schützt den Akku vor Tiefenentladung und trennt die restliche Hardware rechtzeitig von der Akkuversorgung. Zwei LEDs zeigen den Zustand des Akkus an, leuchtet die rote LED ist ein Akku-Betrieb nicht mehr möglich und der Akku muss an einem externen Ladegerät aufgeladen werden.



Abbildung 2.14.: Li-Polymer Akku

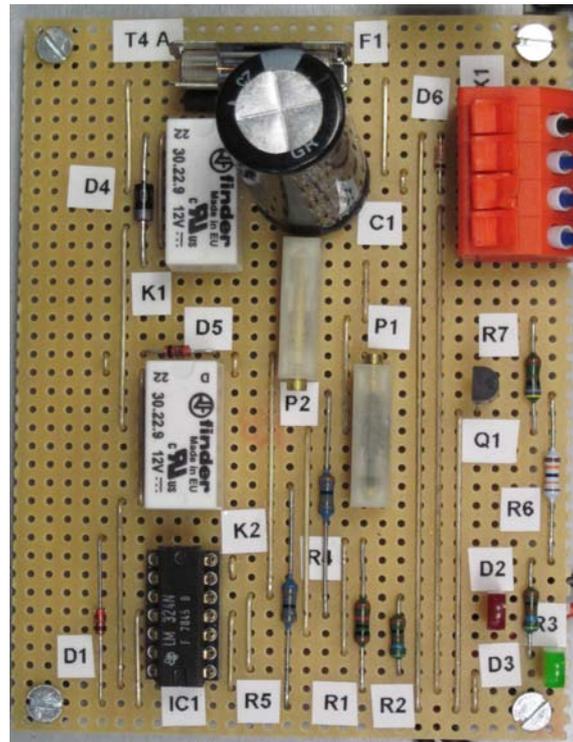


Abbildung 2.15.: Versorgungsspannungsumschaltung und Unterspannungsüberwachung

## 2.2.2. Der Zusammenbau des Prototypen

Im Folgenden wird der Zusammenbau des Kofferradios detailliert beschrieben:

### 2.2.2.1. Lochbohrungen

Damit das Display am Kofferdeckel befestigen werden kann, werden zuerst vier Löcher mit einem Durchmesser von 2,5 mm gebohrt. Die Löcher der Displayhalterung werden ebenfalls auf 2,5 mm vergrößert.

An der Anschlussplatte und an deren Position an der Kofferseite werden ebenfalls zur Fixierung Löcher gebohrt (3 mm  $\emptyset$ ). Das Markieren dieser auf der Platte und am Koffer sollte am besten von Hand vorgenommen werden, um die Platte zentral ausrichten zu können.

Weitere vier Bohrungen werden am Boden des Koffers ausgeführt, um die PVC-Platte zu befestigen. Zur Vereinfachung wird die PVC-Platte auf den Boden gelegt und die Löcher durch die Platte und Kofferboden gebohrt (3 mm  $\emptyset$ ).

Auf der PVC-Platte werden nun *pandaboard ES*, Audioverstärker und eine Miniaturhutschiene für Reihenklammern ausgerichtet, damit die Löcher für die Befestigungspunkte markiert werden können. Diese drei Komponenten haben bereits Befestigungslöcher. Es werden 10 Löcher im Durchmesser von 2,5 mm gebohrt, um anschließend ein 3 mm Gewinde in die jeweiligen Löcher zu schneiden. Optional kann ein 6 mm Loch für die Anbringung einer WLAN-Antenne in eine Seitenwand des Koffers gebohrt werden.

### 2.2.2.2. Befestigung der Komponenten

Das LC-Display und die Lautsprecher werden mit Schrauben befestigt. Vor Einsetzen der Anschlussplatte, wird diese bestückt. Dann werden das *pandaboard ES* und der Audioverstärker mit Distanzhülsen auf der Platte verschraubt. Die Hutschiene benötigt keine Distanzhülsen.

Damit die Leitungen zur Spannungsversorgung der Komponenten besser und übersichtlicher verlegt werden können, werden selbstklebende Kabelhalter an entsprechenden Positionen auf die PVC-Platte geklebt. Diese können auch zur Befestigung des KFZ-Spannungswandlers hilfreich sein. Zudem muss noch ein kleiner USB-Hub auf der Platte fixiert werden, um die USB-Anschlussmöglichkeiten zu erweitern.

Danach wird die PVC-Platte auf den Boden des Koffers geschraubt. Zum Schluss wird noch die Verkabelung durchgeführt, alle Schnittstellenverbindungen werden vom *pandaboard ES* zur Anschlussplatte geführt. Dann ist das Kofferradio hardwaremäßig betriebsbereit. In den Abbildungen 2.16 und 2.17 sind die fertig montierte Teile des Kofferradios zu sehen.

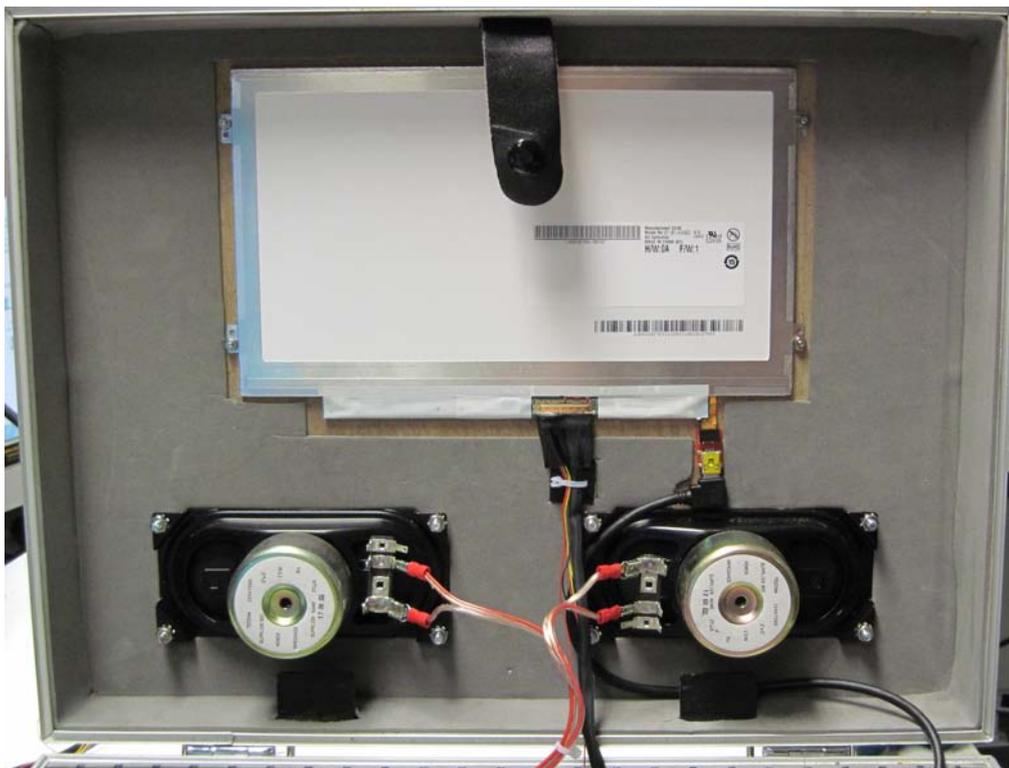


Abbildung 2.16.: Der Kofferdeckel des Empfängers

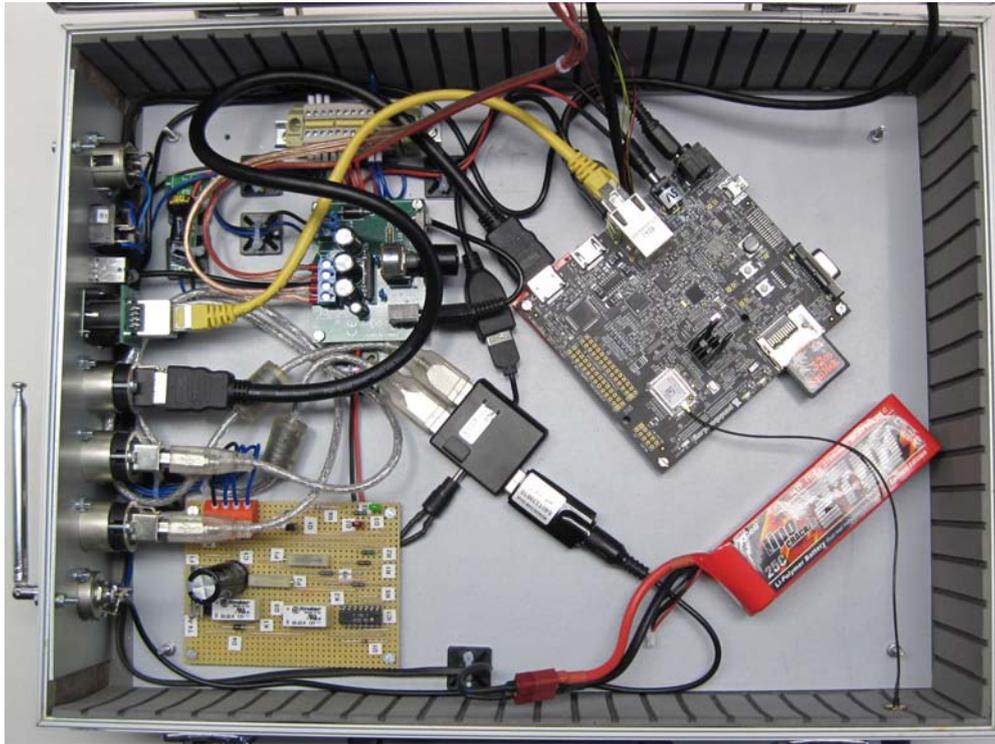


Abbildung 2.17.: Der Kofferboden des Empfängers

## 2.3. Betriebssystem

Das *pandaboard ES* kann mit einem Linuxsystem betrieben werden. Die Installation des Betriebssystems muss an die Hardwarespezifikationen des Boards angepasst sein. Dafür stehen Treiber der Firma *Texas Instruments* für die OMAP-Chips (Open Multimedia Applications Platform) zur Verfügung. Diese Chipbausteine basieren auf der ARM-Architektur. Auf der *pandaboard ES*-Website [17] stehen Systemimages zum Download bereit. Kernelanpassungen zur Unterstützung des LCD-Bildschirms und der Audioausgabe sind in den speziellen Images schon enthalten. Lediglich die Displayauflösung muss angepasst werden. Der Prototyp wurde mit einem Ubuntu-System ausgestattet. Die angepasste Boot-Datei ist im Anhang A.3 aufgezeigt. Des Weiteren erfolgte die Installation der verwendeten Decodersoftware.



## 3. Messanforderungen

Zur empfangstechnischen Verifizierung des Multinormempfängers sind verschiedene Messungen notwendig.

Als Messkriterium gilt bei den Hörfunksystemen eine Bitfehlerrate von  $10^{-4}$  sowie der Audioausfall.

Als Empfängersoftware wird für DRM+ eine Decodersoftware vom Fraunhofer IIS verwendet, welche eine Pseudozufallsfolge (Pseudorandom Binary Sequence - PRBS) empfangen und decodieren kann. Der DRM+ Decoder stellt die empfangenen Bitfehlerraten in einem RSCI-Datenstrom via UDP bereit. Für DAB+ wird der Multimedia Player [31] des Fraunhofer IIS verwendet.

Der Tuner des *Terratec Noxon DAB-Stick* Empfängerfrontends besitzt eine *AGC* (Automatic Gain Control), welche jedoch zu einem unterschiedlichen Verhalten führen kann. Um aussagekräftige Messergebnisse zu erhalten wird daher die *AGC* ausgeschaltet.

### 3.1. Messungen auf der Senderseite

#### 3.1.1. Signalparameter

Es werden jeweils die folgenden Signalparameter des DRM+ und des DAB+ Sendesignals gemessen:

- Spektrumsmaske
- Crestfaktor
- Pegel
- Bandbreite

### 3.1.2. DRM+

#### 3.1.2.1. Sendesignale

Für DRM+ werden zwei unterschiedliche Sendesignale verwendet. Zum einen ein 4-QAM moduliertes Signal und zum anderen ein 16-QAM Signal, siehe Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1.: DRM+ Signaldaten laut ITU Standard

MSC mode	4-QAM	16-QAM
MSC protection level	1	2
MSC code rate R	1/2	1/2
SDC mode	1	1
SDC code rate R	1/4	1/4
Bit rate approx.	49,7 kbit/s	149,1 kbit/s

#### 3.1.2.2. Contentserver und Modulator

Zwei verschiedene Contentserver- und Modulator-Softwareversionen stehen für das Hörfunksystem DRM+ zur Auswahl.

Vom Fraunhofer IIS steht die Software „Fraunhofer DRM ContentServer“ [32] in der Version *5.4.4.18050.2012-03-09* sowie der „Fraunhofer IIS DRM Modulator“ in der Version *0.91* zur Verfügung.

Von Michael Feilen wird die Software „Spark“ [11] in der Version *1.72* genutzt. Diese bietet zum einen einen vollwertigen Contentserver und auch gleichzeitig einen I/Q-Basisband-Modulator.

Die Kombination von Contentserver und Modulator kann nun beliebig erfolgen. Bei den Sendermessungen sollen die möglichen Zusammenstellungen auf Unterschiede überprüft und sich dann für eine geeignete Variante entschieden werden.

Für die HF-Modulation können zwei Geräte genutzt werden:

Der Vektorsignalgenerator *R&S SMU 200A* [33] von Rohde & Schwarz und der *USRP B100* [34] der Firma Ettus Research.

Der Vektorsignalgenerator *R&S SMU 200A* wird über eine *NiDAQmx*-Karte der Firma National Instruments angesprochen und arbeitet mit dem OFDM-Modulator „Spark“; dieser hat die Ausgabe des I/Q-Basisband-Signals über die Schnittstelle integriert. Der *USRP B100* wird per USB verbunden. Beide OFDM-Modulatoren unterstützen die Ausgabe des Basisbandsignals über die USB-Schnittstelle.

Die verwendeten Soft- und Hardwarekombinationen werden in Kapitel 4 detailliert aufgeführt.

### 3.1.3. DAB+

#### 3.1.3.1. Sendesignal

Das DAB+ Sendesignal nach Tabelle 3.2 beinhaltet eine Audiospur. Es wird ein Subchannel übertragen.

Tabelle 3.2.: DAB+ Signaldaten

Protection level	3-A
Code rate	1/2
Subchannel bitrate	64 kbit/s (48 CU)
Audiocodec	MPEG 4 HE-AAC v2
Audiobitrate	57,6 kbit/s
Multiplexbitrate	1088 kbit/s

#### 3.1.3.2. Contentserver und Modulator

Das DAB+ Signal wird vom DAB+ Contentserver mit der Software „Fraunhofer DAB ContentServer“ [35] in der Version *5.1.0.11278.2009-11-05* erzeugt. Als OFDM-Modulator dient der *R&S SDB601 DAB-Testsender*. Die anschließende HF-Modulation könnte auch mit Hilfe des DAB-Testsenders erfolgen, da für die Messungen jedoch Fadingprofile verwendet werden sollen, wird zur HF-Modulation der Vektorsignalgenerator *R&S SMU 200A* (wie bei DRM+) verwendet, denn der DAB-Testsender unterstützt diese Funktion nicht.

## 3.2. Messungen auf der Empfängerseite

Der prinzipielle Messaufbau ist in Abb. 3.1 zu sehen. Die im Einzelnen verwendeten Komponenten werden Kapitel 4 genauer beschrieben.

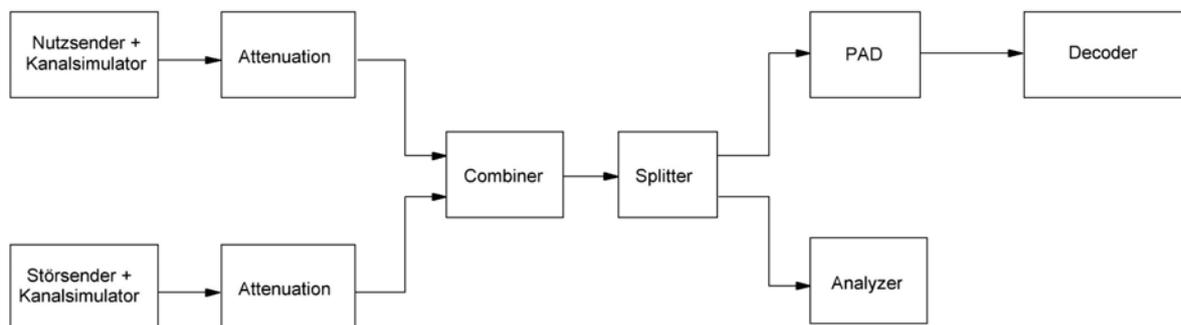


Abbildung 3.1.: Prinzipieller Messaufbau

#### 3.2.1. DRM+

Zunächst wird die Dynamik (Mindestempfindlichkeit und Übersteuerungspegel) sowie die Rauschzahl bzw. das Rauschmaß der Tuner gemessen.

Die Messung erfolgt mit Hilfe eines der beiden in Abschnitt 3.1.2.1 beschriebenen DRM+ Signale in den VHF-Bändern I (65 MHz), II (100 MHz) und III (200 MHz). Die *AGC* der Tuner ist dabei ausgeschaltet.

Da zwei Revisionen an Noxon USB-Sticks zur Verfügung stehen, wird diese Messung für beide Versionen durchgeführt.

Mit Hilfe des *R&S SMU 200A* wird als Übertragungskanal ein Additive White Gaussian Noise (AWGN) Kanal simuliert. Um den Empfang von DRM+ in verschiedenen Umgebungsgebieten zu simulieren, werden im VHF-Band III zusätzlich zum AWGN noch zwei Fadingprofile (laut Standard [6]) verwendet:

- Urban (Vehicle)
- Rural

Es werden jeweils die Bitfehlerraten gemessen und mit Literaturwerten verglichen.

#### 3.2.2. DAB+

Die Statusanzeige des Fraunhofer Multimedia Players beim Empfang von DAB+ im VHF-Band III kann drei verschiedene Zustände bzw. Farben annehmen: Grün für guten Empfang, Gelb für mittleren Empfang und Rot für keinen Empfang. Hierfür sind jedoch noch keine Eingangssignalwerte in *dBm* bzw. SNR-Werte in *dB* bekannt, ab welcher Grenze die Anzeige den Zustand wechselt. Diese sollen durch eine Empfindlichkeitsmessung beim Empfang von DAB+ ermittelt werden.

Bei den darauffolgenden Messungen wird mit der Empfängersoftware ein DAB+ Signal für zwei bestimmte Profile empfangen und die Blockfehlerraten und je nach Verfügbarkeit die Bitfehlerraten nach dem Reed-Solomon-Decoder ausgegeben. Dadurch ist der Rückschluss auf die Bitfehlerrate des empfangenen Signals möglich. Die Ergebnisse werden mit Literaturwerten verglichen, um die Abweichungen von einem idealen Empfänger festzustellen. Die zwei verwendeten Kanalprofile sind:

- AWGN
- Rural (DRM+ Kanalprofil laut Standard [6] zwecks Vergleichbarkeit)

Da das Hauptziel des Multinormempfängers im Empfang von DRM+ liegt, werden für DAB+ keine weiteren Messungen mit anderen Profilen durchgeführt. Die beiden durchzuführenden Messungen stehen exemplarisch für die Qualität des Empfangs von DAB+.

### 3.2.3. Schutzabstände

In Abhängigkeit des zeitlichen Verlaufes der Labormessungen sollen, wenn möglich, auch Schutzabstandsmessungen beim Empfang von DRM+ und DAB+ durchgeführt werden. Die Ergebnisse einer Schutzabstandsmessung liefern Aussagen über die Qualität des Empfangs eines Nutzsymbols welches durch ein Störsymbol gestört wird. Die Sendefrequenz und die Sendeleistung des Störsymbols werden dabei so lange verändert, bis die Decodierung des Nutzsymbols aussetzt. Die Differenz zwischen Nutz- und Störleistung ergibt den Schutzabstand für eine Frequenz.



## 4. Laboraufbau

Der Laboraufbau unterteilt sich in Sender- und Empfängerseite. Nachfolgend werden die einzelnen Komponenten näher beschrieben und die Konfigurationen erläutert. Der Laboraufbau ist in Abb. 4.1 zu sehen.

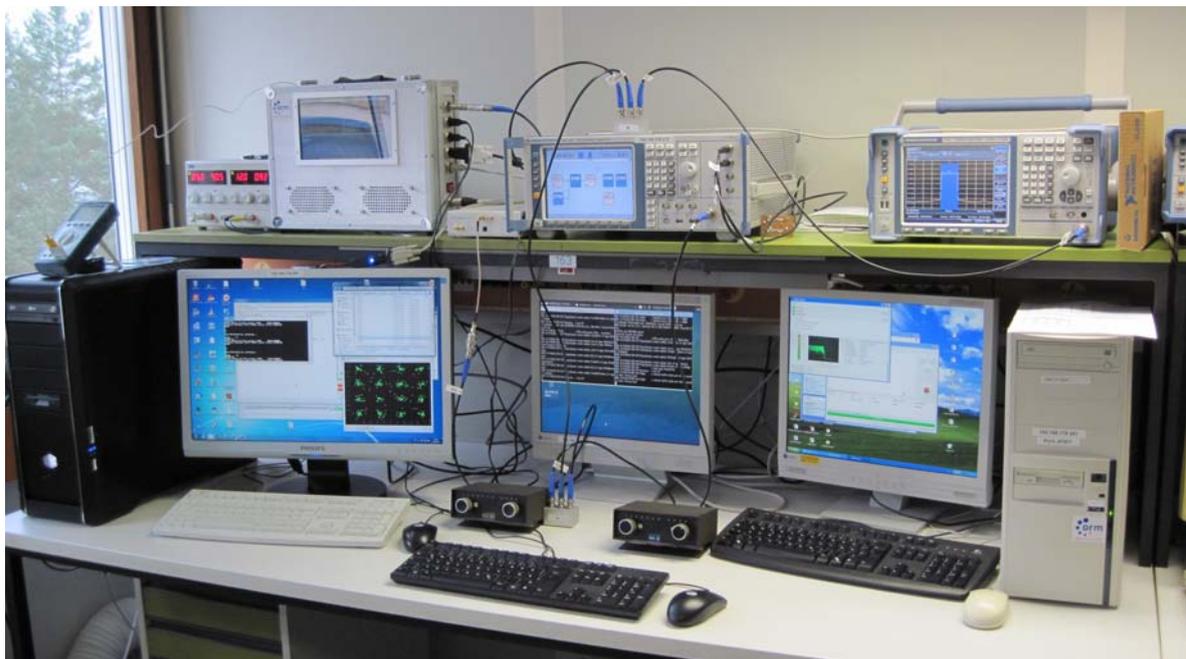


Abbildung 4.1.: Laboraufbau

Oben links sieht man das Kofferradio inkl. Netzgerät, in der Mitte den Vektorsignalgenerator *R&S SMU 200A* und rechts den Signalanalysator *R&S FSV 7*. Unten links steht der Auswerterechner, auf welchem die empfangenden Sendesignale bezüglich der Bitfehlerraten ausgelesen, aufgezeichnet und anschließend ausgewertet werden. Der Bildschirm in der Mitte ist mit dem Kofferradio verbunden und gibt die Anzeige des integrierten LC-Displays wieder. Auf dem PC rechts mit der *NiDAQmx*-Karte läuft die Software „Spark“. Er ist mit dem *R&S SMU 200A* verbunden. Vor dem mittleren Bildschirm auf dem Labortisch stehen die zwei Dämpfungsglieder, welche sich im Messaufbau nach Abb. 3.1 befinden.

## 4.1. Sender

### 4.1.1. DRM+

Im Folgenden werden die verschiedenen Softwareversionen von Contentserver und Basisbandmodulator kurz vorgestellt.

#### 4.1.1.1. Contentserver

##### 4.1.1.1.1. Fraunhofer DRM ContentServer

Der Fraunhofer DRM Contentserver in der Version *5.4.4.18050.2012-03-09* ist ein vorkonfigurierter Linux-PC. Grundlegende Kommandos wie Neustart oder Abschalten können direkt am Rechner selbst vorgenommen werden. Die Einstellung der Sendesignale und Multiplexdaten erfolgt über eine Weboberfläche. In Abb. 4.2 sieht man die Statusanzeige des Contentservers, welche über einen angeschlossenen Monitor ausgegeben wird. Abb. 4.3 zeigt die Weboberfläche zur Steuerung und Konfiguration der Sendedaten. In den Multiplexdatenstrom können alle standardisierten Datendienste geladen werden.

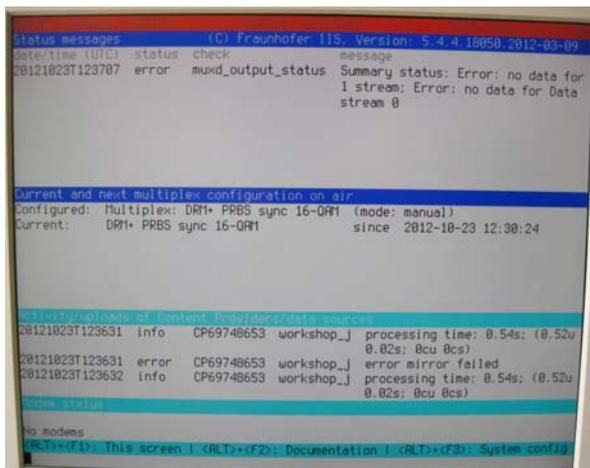


Abbildung 4.2.: Fraunhofer DRM Content-server Statusmonitor



Abbildung 4.3.: Fraunhofer DRM Content-server Weboberfläche

Es wurden zwei verschiedene Multiplexströme mit den Daten der Sendesignale gemäß Abschnitt 3.1.2.1 erstellt. Über die Weboberfläche können diese nun aktiviert werden und der Contentserver schickt die Multiplexdaten als MDI-Datenstrom an den Basisbandmodulator, welcher ebenfalls über die Multiplexkonfiguration im Contentserver adressiert wird.

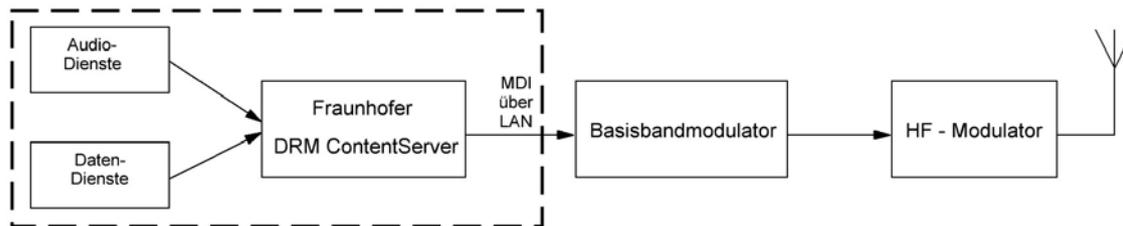


Abbildung 4.4.: Fraunhofer Contentserver in der Sendekette

#### 4.1.1.1.2. Spark Contentserver

Die Software „Spark“ beinhaltet in der Version *1.72* nicht nur einen DRM Contentserver, sondern auch einen Basisbandmodulator. Vorerst soll nur der Contentserver der Software betrachtet werden.

„Spark“ kann flexibel in allen denkbaren Systemen und Hardwarekombinationen eingesetzt werden. Über die Auswahlbuttons der graphischen Benutzeroberfläche (siehe Abb. 4.5) kann man sich die gewünschten, im Standard definierten, Multiplexdaten ins Hauptfenster laden und spezifische Einstellungen vornehmen. Über den „Save“-Button kann man die erstellte Konfiguration in einer Datei speichern, um sie anschließend in einem neuen Durchlauf per „Open“-Button wieder ins Programm zu laden. Die Einstellungen des Basisbandmodulators (siehe Abschnitt 4.1.1.2.2) werden dabei ebenfalls mit gesichert.

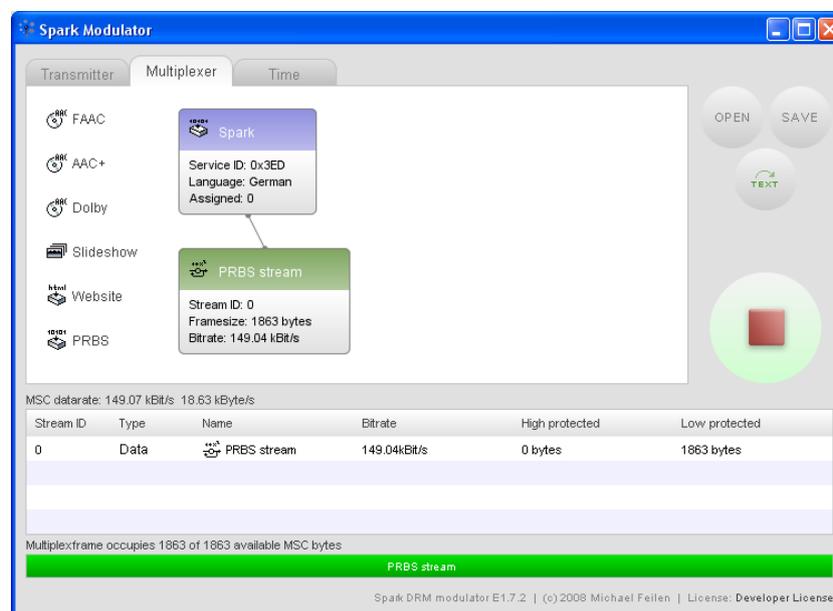


Abbildung 4.5.: Spark Contentserver Graphische Oberfläche

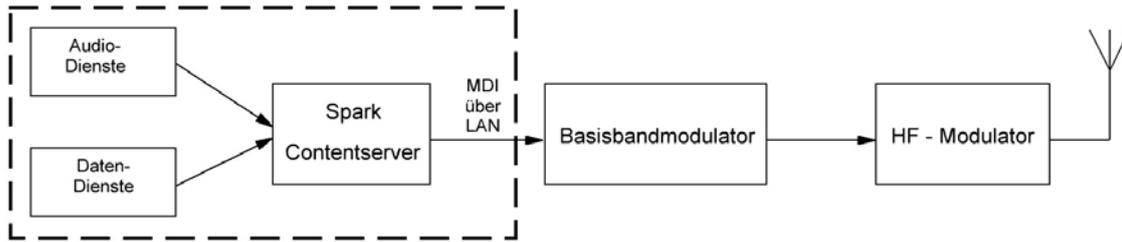


Abbildung 4.6.: Spark Contentserver in der Sendekette

#### 4.1.1.2. Basisbandmodulator

##### 4.1.1.2.1. Fraunhofer IIS Basisbandmodulator

Der Fraunhofer IIS Basisbandmodulator V0.91 ist auf einem Linuxbetriebssystem lauffähig. Die Entgegennahme des DRM-Multiplexstroms per Datei und UDP sowie die automatische Erzeugung eines PRBS-Datenstroms ist integriert. Als Ausgabemöglichkeit für das Basisbandsignal stehen neben UDP, der Soundkarte oder der Ausgabe in eine Datei unter anderem auch der USRP zur Verfügung. Die graphische Bedienoberfläche ist in Abb. 4.7 zu sehen.

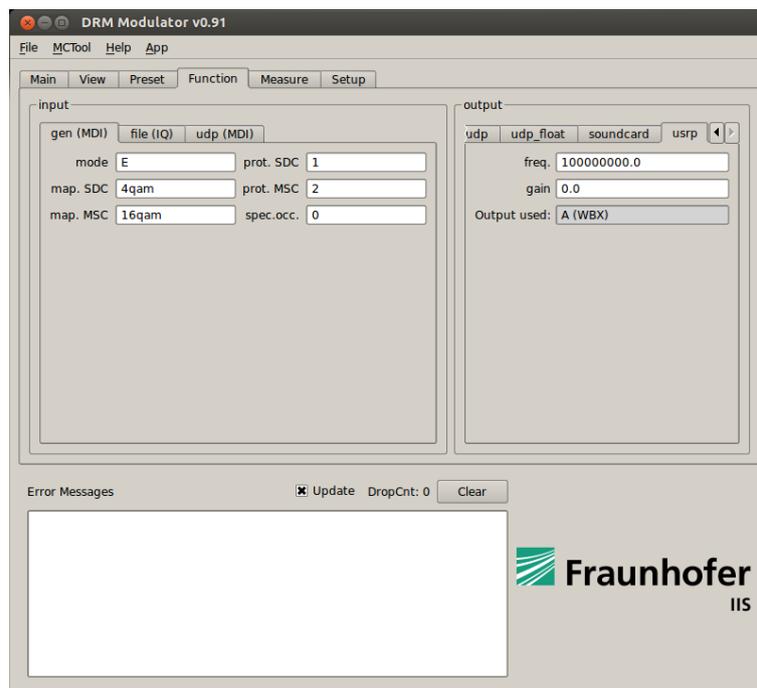


Abbildung 4.7.: Fraunhofer IIS Basisbandmodulator 0.91

#### 4.1.1.2.2. Spark Basisbandmodulator

Die Einstellungen des Basisbandmodulators der „Spark“-Software kann man im Register „Transmitter“ (siehe Abb. 4.8) vornehmen. Hier können die Signaldaten und Coderaten eingestellt werden. Zur Ausgabe des Basisbandsignals steht die Soundkarte, ein Wave-File, UDP oder die *NiDAQmx*-Karte zur Auswahl. Nach Betätigen des „Play“-Buttons wird die Ausgabe mit den vorgenommenen Einstellungen gestartet (Abb. 4.9).

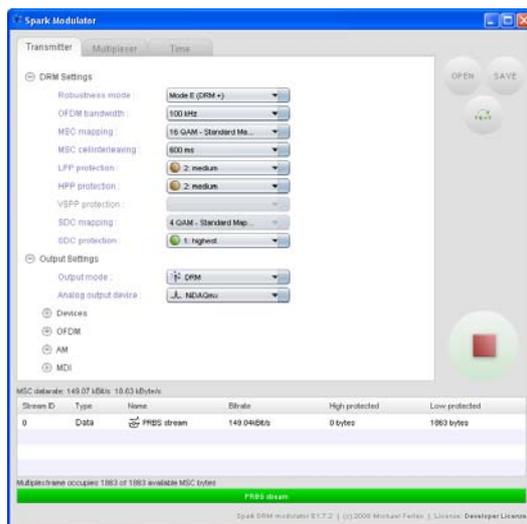


Abbildung 4.8.: Spark Einstellungen für das Sendesignal



Abbildung 4.9.: Spark Anzeige Ausgangssignal

#### 4.1.1.3. HF-Modulator

##### 4.1.1.3.1. Rohde & Schwarz SMU 200A

Der Vektorsignalgenerator *R&S SMU 200A* (Abb. 4.10) dient zum einen als HF-Modulator, aber auch gleichzeitig zur Simulation von Fadingprofilen. Das Gerät wird über die *NiDAQmx*-Karte mit den I/Q-Daten des Basisbandmodulators versorgt und führt anschließend die Modulation in das gewünschte VHF-Band durch.



Abbildung 4.10.: Rohde & Schwarz SMU 200A

Manuell kann nun über das Bedienfeld die Sendefrequenz, die Ausgangsleistung und weitere Kanaleinstellungen wie AWGN oder Fading eingestellt werden. Das Gerät ist über ein Patch-Kabel mit dem lokalen Netzwerk verbunden, und es ist somit möglich, die Einstellungen über ein Python-Skript vorzunehmen, wodurch der Messablauf automatisiert werden kann. Der SMU 200A ist im Laboraufbau, wie in Abb. 4.11 gezeigt, integriert.

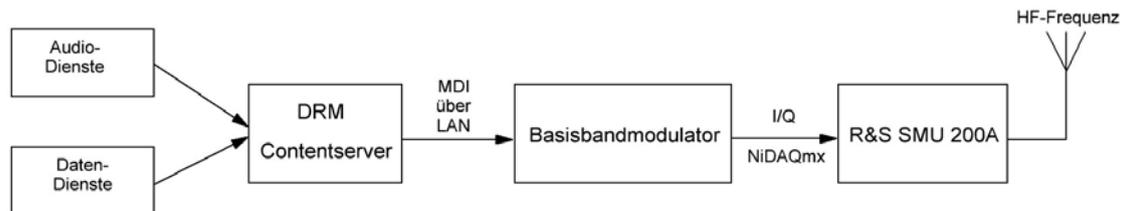


Abbildung 4.11.: R&S SMU 200A in der Sendekette

##### 4.1.1.3.2. Ettus Research USRP B100

Der *USRP B100* (Abb. 4.12) der Firma Ettus Research ist ein General Purpose HF-Modulator, welcher über die USB-Schnittstelle angesprochen wird und hauptsächlich im SDR-Bereich (Software Defined Radio) eingesetzt wird. Er ermöglicht die Ausgabe des Sendesignals in Frequenzbereichen bis 6 GHz.



Abbildung 4.12.: Ettus Research USRP B100

Angesprochen wird er direkt vom Basisbandmodulator, welcher die Signaldaten über die USB-Schnittstelle liefert. Zusätzlich benötigt der USRP auch die Information der gewünschten Sendefrequenz und Sendeleistung. Mit diesen Daten wird dann das eingespeiste Basisbandsignal ausgestrahlt, siehe Abb. 4.13.

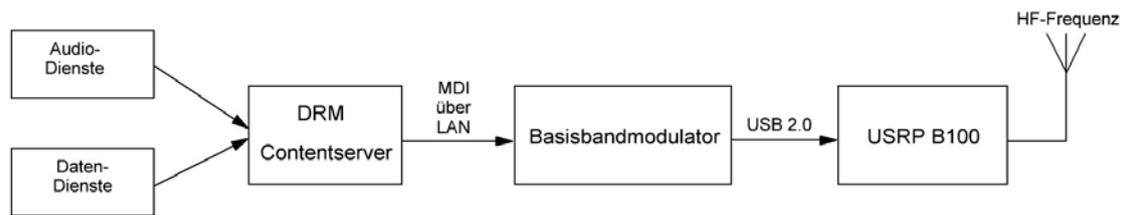


Abbildung 4.13.: USRP B100 in der Sendekette

#### 4.1.1.4. Mögliche DRM+ Senderkombinationen

Zur Auswahl stehen drei verschiedene Zusammenstellungen der in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Hard- und Softwarekomponenten. Durch Messungen der Sendesignale sollen die Kombinationen verifiziert und eine geeignete Zusammenstellung für die späteren Empfänger-messungen ausgewählt werden. Wie in Kapitel 3 ausgeführt, kann die Empfängersoftware einen PRBS-Stream auswerten, daher besteht der Inhalt der verwendeten Sendesignale auch nur aus einem synchronen PRBS-Stream. Zur Identifikation der verwendeten Komponenten für Contentserver, Basisbandmodulator und HF-Modulator werden die Buchstaben **F** für *Fraunhofer*, **R** für *R&S SMU 200A*, **S** für *Spark* und **U** für *USRP* zur Bezeichnung der Senderkombinationen eingeführt.

##### 4.1.1.4.1. Kombination 1 (S-S-R)

Senderkombination 1 besteht aus den folgenden Komponenten und ist in Abb. 4.14 dargestellt.

Contentserver:	Spark	(4.1.1.1.2)
Basisbandmodulator:	Spark	(4.1.1.2.2)
HF-Modulator:	R&S SMU 200A	(4.1.1.3.1)

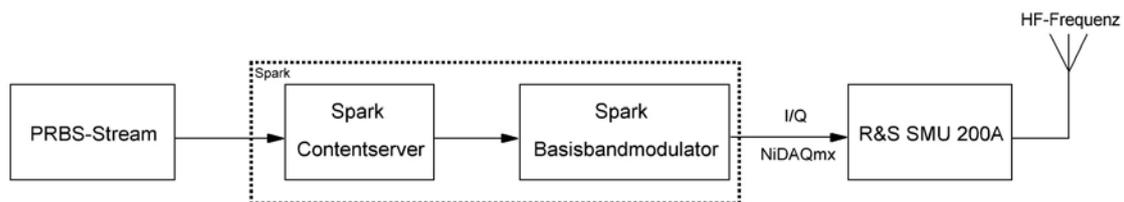


Abbildung 4.14.: Senderkombination 1

#### 4.1.1.4.2. Kombination 2 (F-S-R)

Senderkombination 2 besteht aus den folgenden Komponenten und ist in Abb. 4.15 dargestellt.

Contentserver:	Fraunhofer DRM ContentServer	(4.1.1.1.1)
Basisbandmodulator:	Spark	(4.1.1.2.2)
HF-Modulator:	R&S SMU 200A	(4.1.1.3.1)

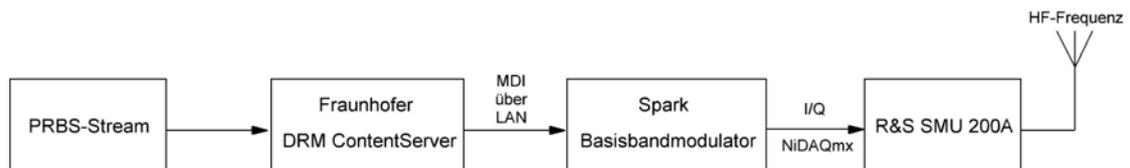


Abbildung 4.15.: Senderkombination 2

#### 4.1.1.4.3. Kombination 3 (F-F-U)

Senderkombination 3 besteht aus den folgenden Komponenten und ist in Abb. 4.16 dargestellt.

Contentserver:	PRBS-Stream Erzeugung im Fraunhofer Basisbandmodulator	(4.1.1.2.1)
Basisbandmodulator:	Fraunhofer Basisbandmodulator	(4.1.1.2.1)
HF-Modulator:	USRP B100	(4.1.1.3.2)

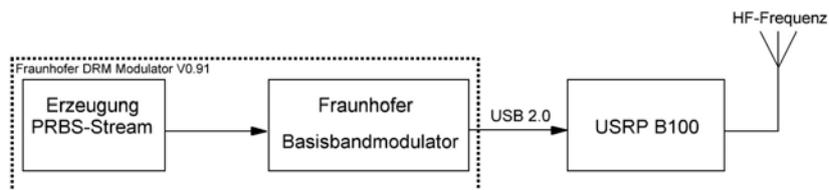


Abbildung 4.16.: Senderkombination 3

## 4.1.2. DAB+

### 4.1.2.1. Contentserver

Der DAB+ Contentserver wird ebenfalls vom Fraunhofer IIS bereitgestellt. Es handelt sich wie beim DRM Contentserver (siehe Kapitel 4.1.1.1) um einen vorkonfigurierten Linux-PC mit Ausgabe eines Statusbildschirms über ein angeschlossenes Anzeigergerät (Abb. 4.17) und einer Webschnittstelle (Abb. 4.18) zur Konfiguration und Steuerung der Multiplexdaten.

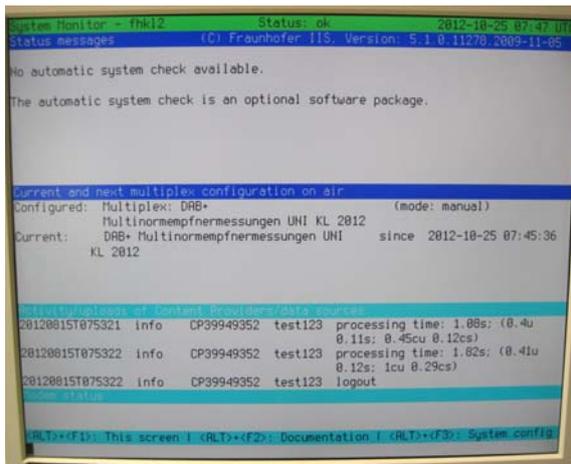


Abbildung 4.17.: Fraunhofer DAB Content-server Statusmonitor



Abbildung 4.18.: Fraunhofer DAB Content-server Weboberfläche

Die Verbindung mit dem Basisbandmodulator wird über die ETI-Schnittstelle hergestellt. Über diese wird der DAB-Multiplexstrom an den Basisbandmodulator übertragen.

### 4.1.2.2. Basisbandmodulator

Als DAB-Basisbandmodulator wird der *R&S SDB601 DAB-Testsender* verwendet (Abb. 4.19). Dieser empfängt die Signaldaten über die ETI-Schnittstelle vom Contentserver und führt die Basisbandverarbeitung durch. Gesteuert wird das Gerät über die RS232-Schnittstelle und dem dazugehörigen Tool von Rohde & Schwarz.



Abbildung 4.19.: R&S DAB Testsender

Der DAB Testsender stellt am Ausgang das Signal im komplexen Basisband zur Verfügung. Zusätzlich ist auch eine HF-Modulation möglich. Da jedoch Kanalprofile für die Simulation verwendet werden und der DAB Testsender diese nicht unterstützt, werden die I/Q-Daten an einen kompatiblen HF-Modulator weitergeleitet.

### 4.1.2.3. HF-Modulator

Für die HF-Modulation wird wie bei DRM+ der *R&S SMU 200A* (Kapitel 4.1.1.3.1) verwendet. Da die Signaldaten im komplexen Basisband ankommen, kann der SMU diese problemlos verarbeiten, die Kanalsimulation durchführen und das Signal auf der gewünschten VHF-Frequenz aussenden.

### 4.1.2.4. DAB+ Sendekette

Die Kombination der einzelnen Komponenten zur DAB+ Sendekette ist in Abb. 4.20 zu sehen.

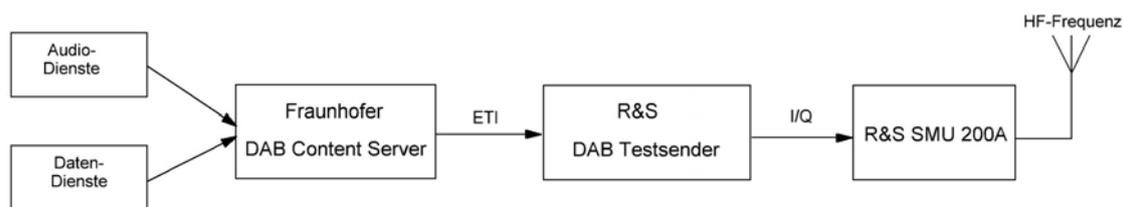


Abbildung 4.20.: DAB+ Sendekette

## 4.2. Empfänger

### 4.2.1. DRM+

#### 4.2.1.1. Kofferradio mit Fraunhofer DRM+ Decoder

Beim Empfang von DRM+ wird das Kofferradio, Abb. 4.21 gemäß Kapitel 2, mit Linux Betriebssystem und einer Empfängersoftwarekombination des Fraunhofer IIS genutzt.

Um den Empfang zu ermöglichen, wird im ersten Schritt der Treiber des Noxon USB-Sticks auf der gewünschten Empfangsfrequenz gestartet, siehe Listing 4.1.

Zum einfachen Umschalten zwischen den drei Empfangsbändern wurde für jede Frequenz eine eigene Startdatei angelegt, bezeichnet mit *NoxonDemo\_XXX.lua*, wobei das *XXX* für die gewünschte Frequenz in *MHz* steht.



Abbildung 4.21.: Das Kofferradio

Listing 4.1: Noxon USB Treiber für 100 MHz starten

```

1 cd noxon/
2 sudo LD_PRELOAD=./librtlsdr.so.0 ./NoxonDemo -lscript
   NoxonDemo_100.lua

```

Im nächsten Schritt wird der eigentliche DRM+ Decoder gestartet, Listing 4.2.

Listing 4.2: Fraunhofer DRM+ Decoder starten

```

1 cd drmplusdec/
2 sudo ./DrmPlusDec -lscript DrmPlusDec_kl.lua

```

Den Status der Decodersoftware kann man dann auf einem Windows-PC über das *RtIo-Tool* des Fraunhofer IIS auslesen. Des Weiteren ist über das Tool das Ändern von verschiedenen Einstellungen möglich. So lässt sich z.B. die Empfangsfrequenz des Noxon USB-Sticks über das Tool verändern. Zur Kontrolle der Qualität des Empfangs gibt das Tool auch das Konstellationsdiagramm der aktuellen Empfangssituation wieder, siehe Abb. 4.22.

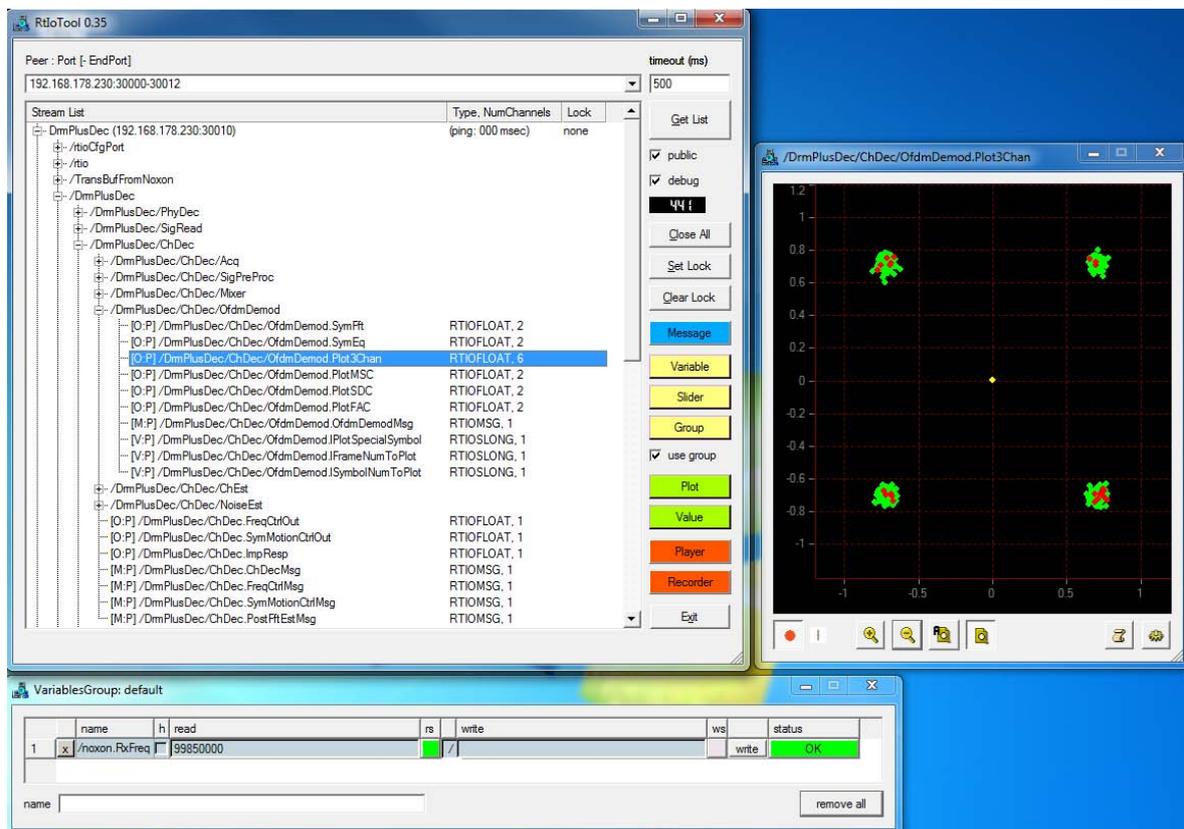


Abbildung 4.22.: RtIo-Tool zum Anzeigen des Empfängerstatus

Der DRM+ Decoder liefert über den RSCI-Datenstrom laut ETSI Standard *ETSI TS 102349* [36] die aktuelle Bitfehlerrate des MSC Streams per UDP auf einem bestimmten Port (Abb. 4.23). Am Auswerterechner können diese Daten über ein Python-Skript ausgelesen und protokolliert werden.

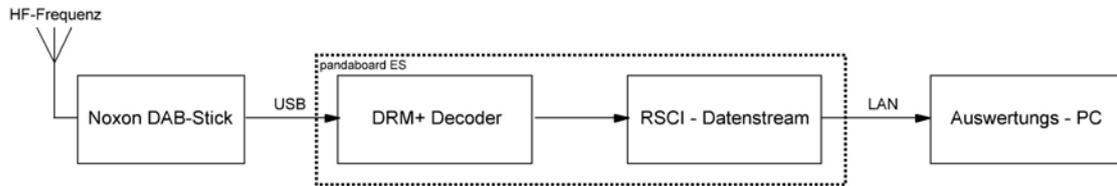


Abbildung 4.23.: DRM+ Empfang mit dem Kofferradio

#### 4.2.1.2. DRM+ Decoder WaveSink

Als zweite DRM+ Decodersoftware steht das Programm „WaveSink“ (Abb. 4.24) in der Beta-version 0.2 von Michael Feilen zur Verfügung. Das Programm ist auf einem Linux-PC mit x86-Prozessor-Architektur lauffähig.



Abbildung 4.24.: DRM+ Decoder WaveSink 0.2

Nach dem Start über die Konsole mit dem Befehl 4.3

```
1 sudo ./wavesink/bin/wavesink 200000 on
```

Listing 4.3: WaveSink DRM+ Decoder starten

wird die Decodersoftware auf der Empfangsfrequenz von 200 MHz gestartet, der Parameter „on“ bewirkt die Ausgabe der Bit-Error-Rate auch bei fehlgeschlagener SDC Decodierung. Empfängt der Decoder ein DRM+ Signal mit PRBS-Inhalt wird die Bit-Fehler-Rate beim Empfang in einer CSV-Datei im aktuellen Verzeichnis abgelegt.

### 4.2.2. DAB+

Der DAB+ Empfang wird durch die Software „Noxon DAB MediaPlayer“ (Abb. 4.25) vom Fraunhofer IIS in Verbindung mit einem Noxon USB-Stick Rev.1 auf einem Windows-Rechner ermöglicht. Da jedoch keine Bitfehlerraten ausgegeben werden, kann mit dieser Software nur die „Ampel“-Empfangsanzeige ausgewertet und der Audioausfall festgestellt werden.

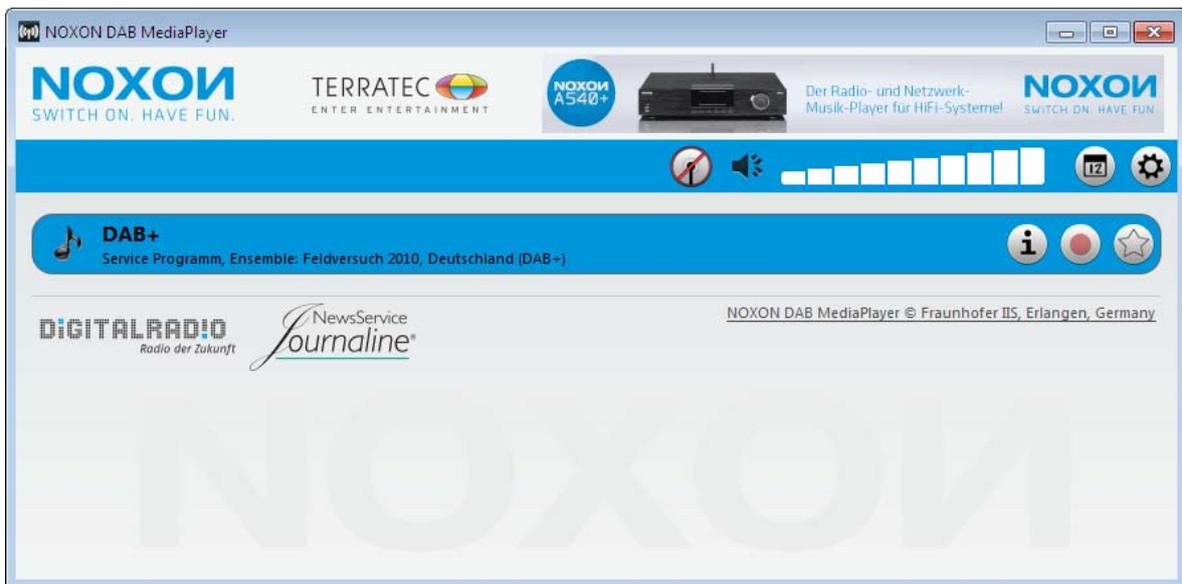


Abbildung 4.25.: Noxon DAB MediaPlayer

## 4.3. Messaufbau

Der Messaufbau nach Kapitel 3.2, Abb. 3.1 benötigt zusätzlich zum Sende- und Empfänger-aufbau weitere Hardwarekomponenten. Hierbei handelt es sich um die Dämpfungsglieder, die Splitter/Combiner, die Impedanzanpassung am Noxon Antenneneingang (PAD) und die verwendeten BNC-Kabel.

Die beiden verwendeten Dämpfungsglieder stammen von der Firma *Texscan Corp* (Abb. 4.26). Es können Dämpfungen von 0 dB bis 79 dB wahlweise in einer Schrittweite von 1 dB oder 10 dB eingestellt werden. Der zusätzliche Dämpfungsverlust durch die Dämpfungsglieder wurde mit dem Frequenzanalysator zu den Werten in Tabelle 4.1 bestimmt.

Tabelle 4.1.: Dämpfungsverlust Dämpfungsglieder

Dämpfungsglied	Dämpfungsverlust [dB]
N 4.2	0,15
N 4.33	0,17



Abbildung 4.26.: Dämpfungsglieder

Für das Zusammenführen der beiden Signale von Nutz- und Störsender, sowie zum Auftrennen des übertragenen Signals an Decoder und Frequenzanalysator werden zwei Splitter/Combiner (Abb. 4.27) verwendet, die zur Identifikation mit *Splitter A* und *Splitter B* bezeichnet werden. Die Splitter der Firma *Mini-Circuits* sind für einen Frequenzbereich von 1 - 650 MHz geeignet. In Tabelle 4.2 sind die Einfügedämpfungen aufgeführt.



Abbildung 4.27.: Splitter/Combiner

Tabelle 4.2.: Einfügedämpfung Splitter

Splitter	Einfügedämpfung [dB]
A	2,82
B	2,86

Am Antenneneingang des Kofferradios wird zur Impedanzanpassung ein 50  $\Omega$  auf 75  $\Omega$  PAD-Glied (Abb. 4.28) mit der Bezeichnung *BMP-5075* verwendet. Die genauen Dämpfungsverluste des PAD-Gliedes sind im Anhang aufgeführt (Anhang A.1.1), da diese von der Frequenz abhängig sind. Im vorliegenden Versuchsaufbau kann aber von einem Dämpfungsverlust von 5,73 dB ausgegangen werden.



Abbildung 4.28.: PAD BMP-5075

Alle verwendeten BNC-Kabel im Laboraufbau wurden vermessen und nummeriert, die Angaben zu Dämpfungsverlust und Kabellänge sind im Anhang A.1.2 zu finden.

## 4.3.1. DRM+

Für die Messungen von DRM+ erfolgt der Aufbau des Signalübertragungsweges mit den Hardwarekomponenten wie in den Abbildungen 4.29 und 4.30 dargestellt. Die Auswertung der empfangenen Bitfehlerrate erfolgt dann, wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, über das Netzwerk an einem Auswerterechner.

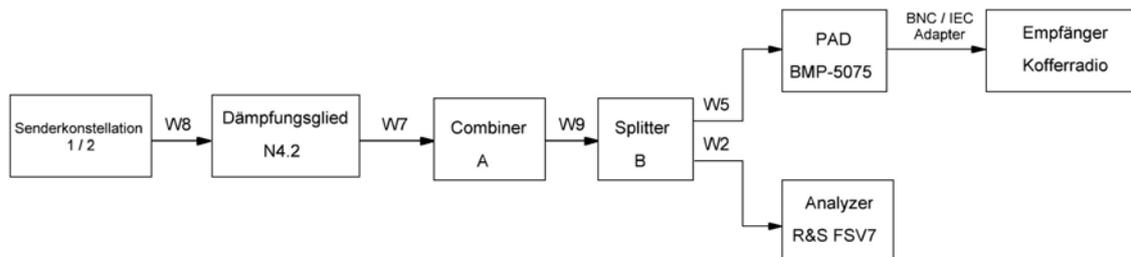


Abbildung 4.29.: Messaufbau DRM+ für Senderkombination 1 &amp; 2

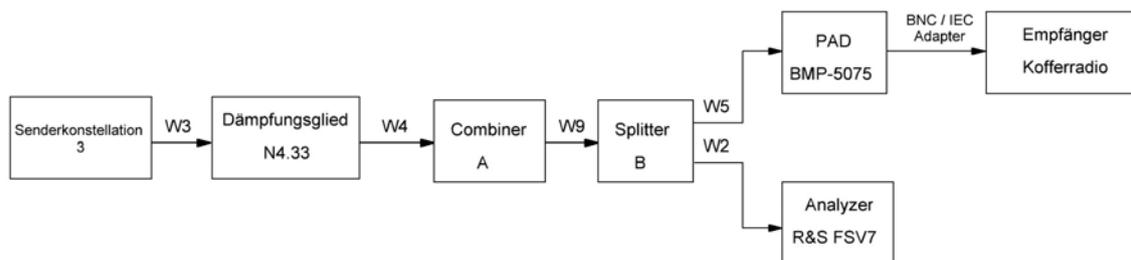


Abbildung 4.30.: Messaufbau DRM+ für Senderkombination 3

Auf dem Übertragungsweg ergibt sich durch die verwendeten Komponenten zwischen Sender und Empfänger eine Gesamtsignaldämpfung von 12 dB.

### 4.3.2. DAB+

Als DAB-Sender wird die Sendekette nach Abb. 4.20 verwendet. Die weiteren Komponenten für den Messaufbau entsprechen der Abb. 4.31.

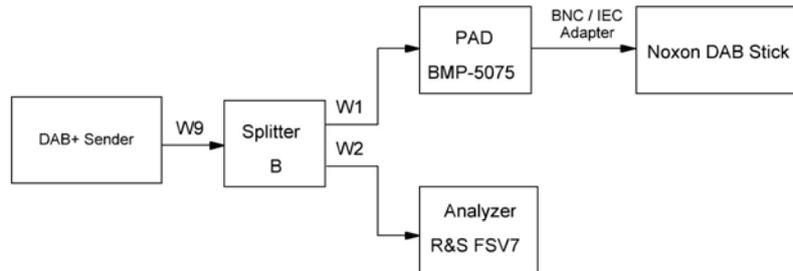


Abbildung 4.31.: Messaufbau DAB+

Es ergibt sich eine Gesamtsignaldämpfung von 10 dB.

### 4.3.3. Automatisierung

Der Messablauf konnte durch die Möglichkeit der Softwaresteuerung sehr komfortabel automatisiert werden. Wie in Kapitel 4.1.1.3.1 bereits erwähnt, kann man den HF-Modulator *R&S SMU 200A* über die Netzwerkverbindung mit Hilfe eines Python-Skriptes automatisiert steuern. Die Befehle zum Ändern der Messparameter wurden vom Auswerte-PC direkt an den HF-Modulator gesendet, zugleich wurden per UDP die Daten der Bitfehlerraten vom DRM+ Decoder ebenfalls in diesem Skript entgegengenommen und in einer Textdatei protokolliert. Dadurch wurde sichergestellt, dass jede Parameteränderung zum richtigen Zeitpunkt erfolgte und auch die Messdauer genau eingehalten wurde.

Änderungen, die nicht am HF-Modulator vorgenommen werden konnten (z.B. Änderung des Sendesignals, Umstellen der Empfangsfrequenz des DRM+ Decoders), mussten weiterhin manuell oder per Remote-Zugriff vorgenommen werden. Diese Einstellungen waren jedoch meist nur einleitend für eine Messreihe notwendig und der Großteil der Messungen konnte so mit Hilfe des Skriptes automatisch ablaufen.

# 5. Messungen

## 5.1. Sendesignale

### 5.1.1. DRM+

Bei den DRM+ Sendesignalen handelt es sich um das 4-QAM- und um das 16-QAM-modulierte Signal, gemäß Kapitel 3.1.2.1. Die Signale wurden mit den drei möglichen Senderkombinationen (Kapitel 4.1.1.4) erzeugt und mit dem Frequenzanalysator *R&S FSV7* untersucht. In den folgenden drei Unterkapiteln sind die Diagramme des Frequenzanalysators zu den beiden Sendesignale aufgeführt, eine Erläuterung findet anschließend in Kapitel 5.1.1.4 statt. Die Diagramme zeigen die Spektrogramme bei einer Grundeinstellung der Sendeleistung von -25 dBm. Zur Verifikation wurde den Spektren anschließend die DRM+ Spektrumsmaske [37] überlagert, um die Einhaltung der geforderten Sendesignalvorgaben zu prüfen.

#### 5.1.1.1. Senderkombination 1

In der Kombination „Spark - Spark - R&S SMU 200A“ (S-S-R) ergeben sich folgende Spektren:

#### 4-QAM

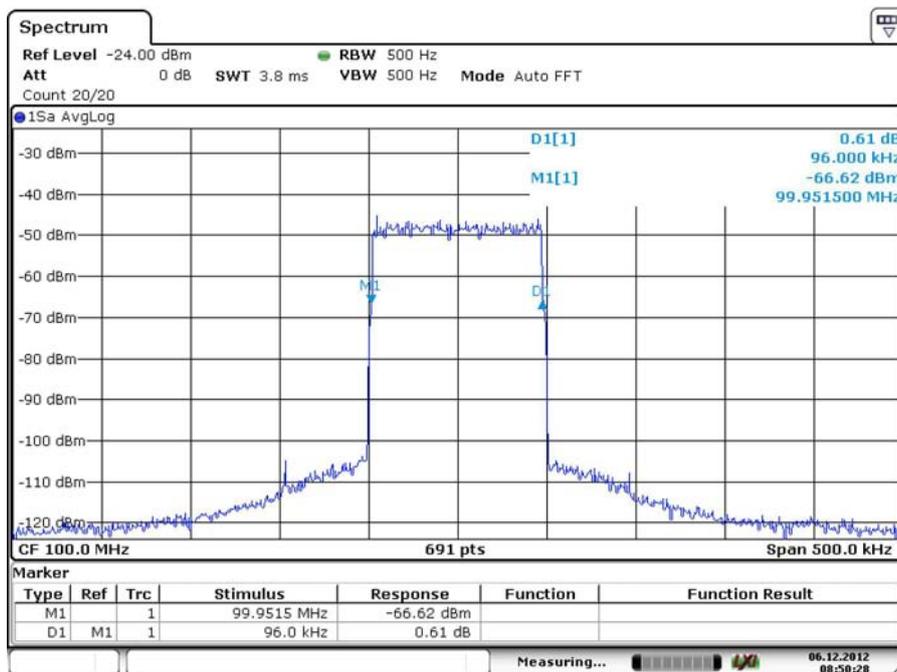


Abbildung 5.1.: 4-QAM Sendesignal S-S-R, bei eingestellter Sendeleistung von -25 dBm



Abbildung 5.2.: 4-QAM Sendesignal S-S-R, Crest-Faktor

Abbildung 5.2 zeigt die Messung der CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function). Hierbei handelt es sich um die Wahrscheinlichkeitsverteilung, die angibt, mit welcher zeitlichen Häufigkeit ein bestimmter Pegel eines Signals erreicht oder überschritten wird. Daraus lässt sich der Crest-Faktor  $\frac{\hat{u}}{u_{eff}}$  bestimmen.

Da ein OFDM-Signal näherungsweise einer Gauß-Verteilung entspricht, lässt sich aus der CCDF-Abweichung auf den Crest-Faktor schließen. Denn während bei einem Gauß-Rauschen beliebig große Amplituden auftreten können, zeigt sich bei einem spitzenwertbegrenztem OFDM-Signal ein typischer Abfall der CCDF-Kurve an der Stelle des Spitzenwertes. Aus der mittleren Signalleistung und damit dem Effektivwert  $u_{eff}$  und dem Spitzenwert ergibt sich so der Crest-Faktor.

Die rote Kurve zeigt den Verlauf der Wahrscheinlichkeitsverteilung bei Gauß-Rauschen, die blaue Kurve gibt den Verlauf des Sendesignals an. Es ergibt sich ein Crest-Faktor von 6,73 dB.

Bei der Überlagerung des Sendespektrums mit der DRM+ Spektrumsmaske, Abb. 5.3, zeigt sich die Einhaltung der geforderten Signalvorgaben.

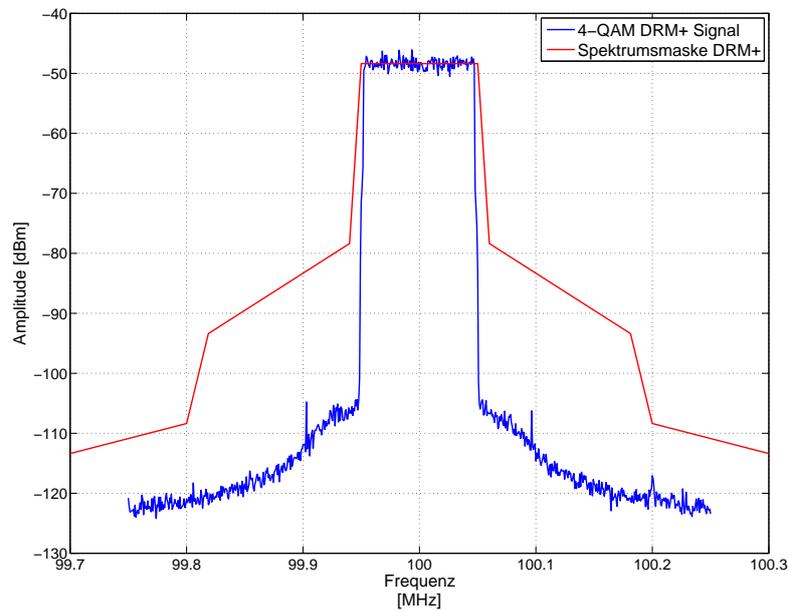


Abbildung 5.3.: 4-QAM Sendesignal S-S-R mit überlagelter Spektrumsmaske

## 16-QAM

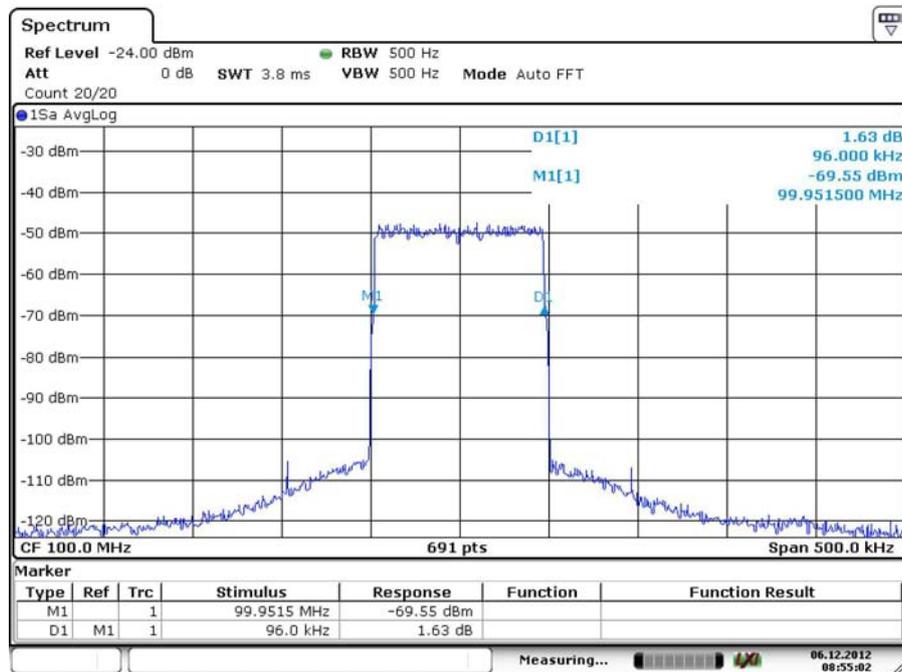


Abbildung 5.4.: 16-QAM Sendesignal S-S-R, bei eingestellter Sendeleistung von -25 dBm

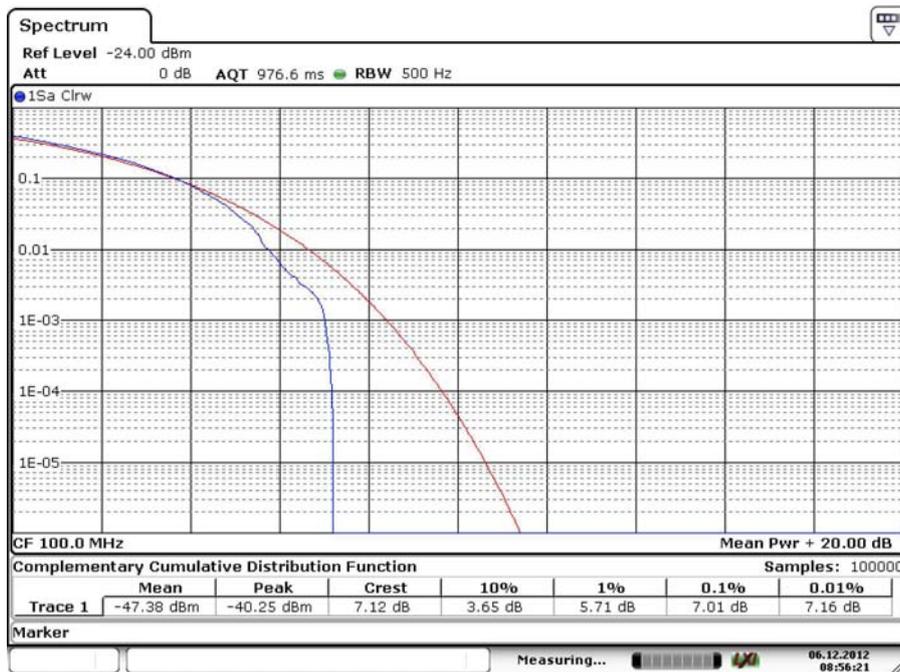


Abbildung 5.5.: 16-QAM Sendesignal S-S-R, Crest-Faktor

Die Spektrumsmaske bestätigt die Signaldaten, Abb. 5.6.

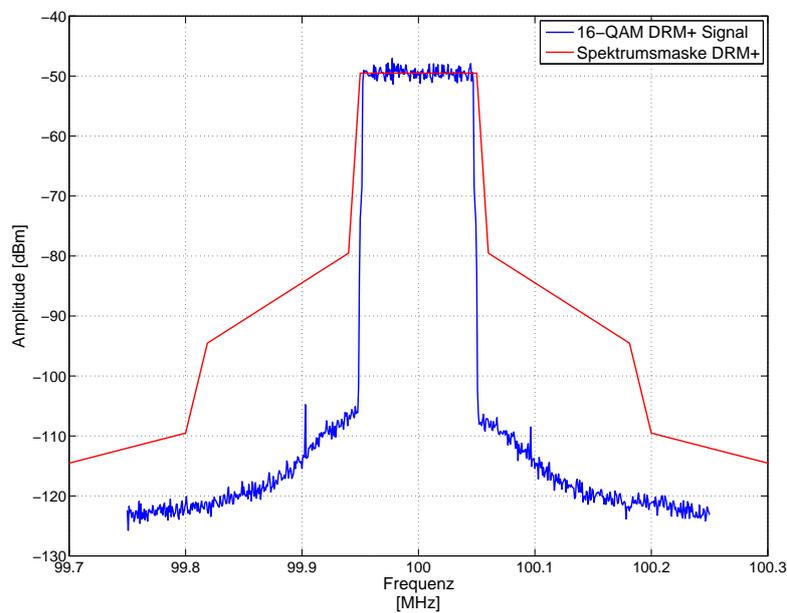


Abbildung 5.6.: 16-QAM Sendesignal S-S-R mit überlagerter Spektrumsmaske

## 5.1.1.2. Senderkombination 2

In der Kombination „Fraunhofer - Spark - R&S SMU 200A“ (F-S-R) ergeben sich folgende Spektren:

## 4-QAM

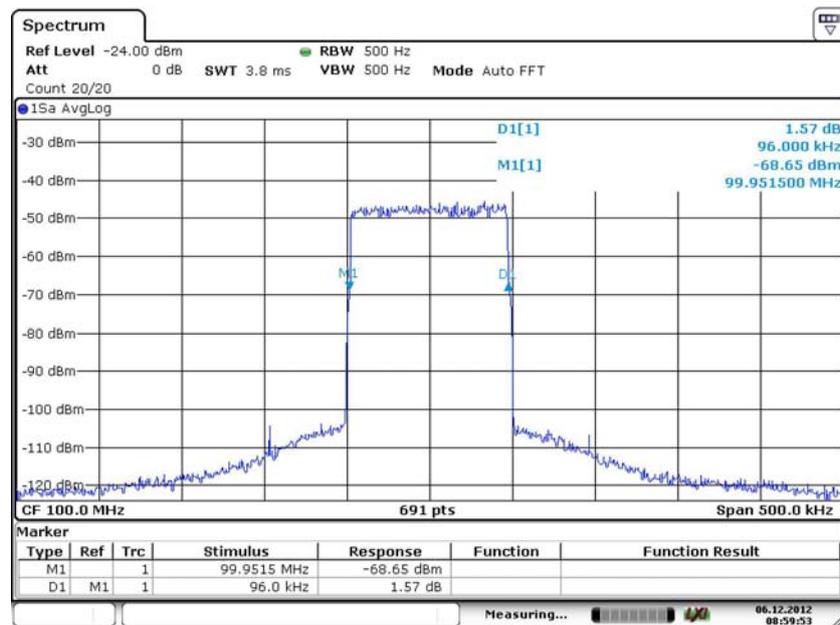


Abbildung 5.7.: 4-QAM Sendesignal F-S-R, bei eingestellter Sendeleistung von -25 dBm

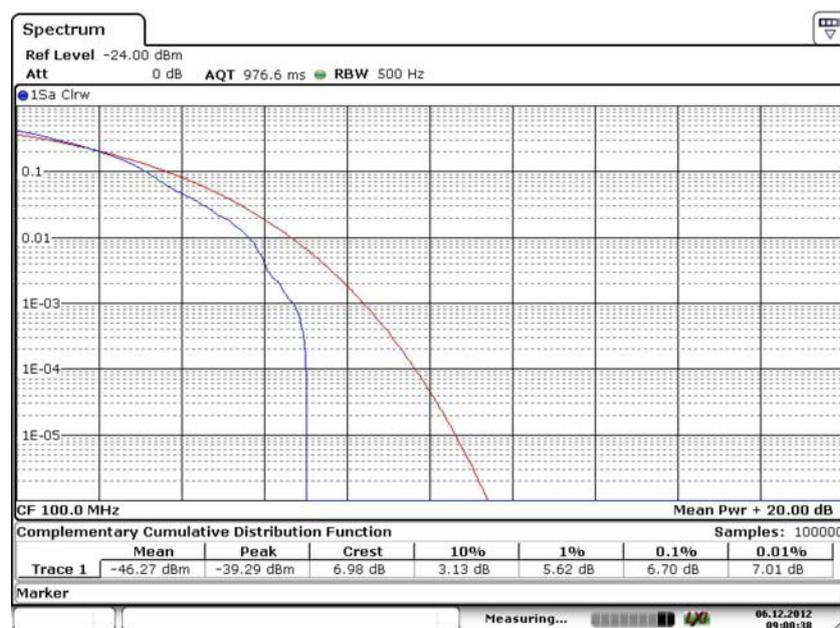


Abbildung 5.8.: 4-QAM Sendesignal F-S-R, Crest-Faktor

Zur Verifikation die Überlagerung mit der Spektrumsmaske, Abb. 5.9.

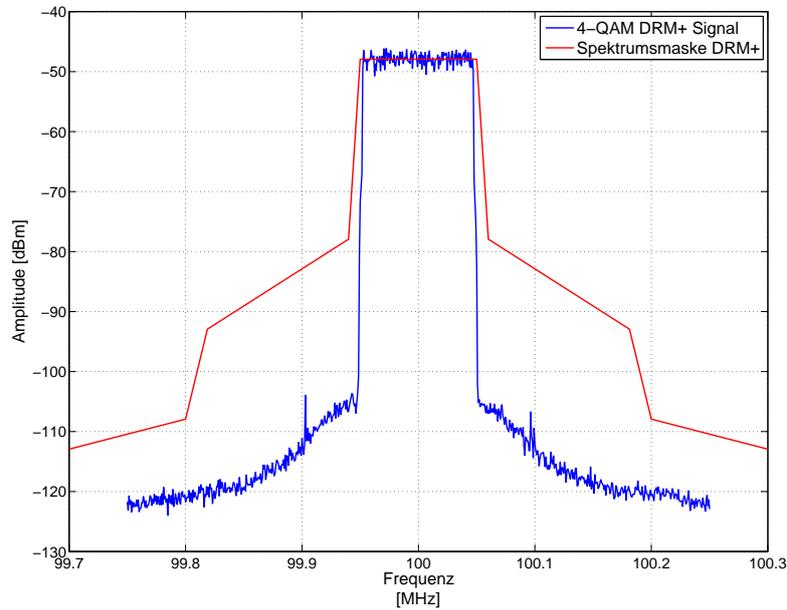


Abbildung 5.9.: 4-QAM Sendesignal F-S-R mit überlagertter Spektrumsmaske

### 16-QAM

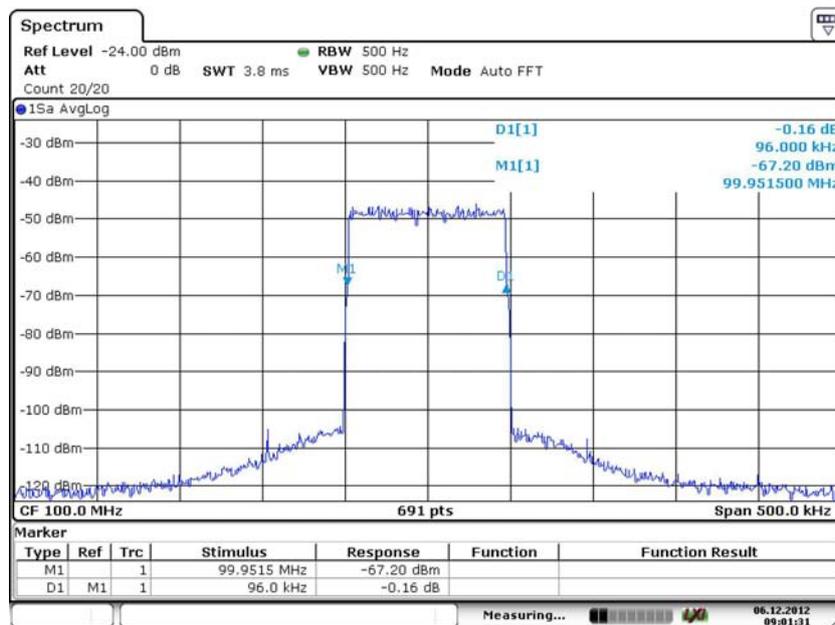


Abbildung 5.10.: 16-QAM Sendesignal F-S-R, bei eingestellter Sendeleistung von -25 dBm



Abbildung 5.11.: 16-QAM Sendesignal F-S-R, Crest-Faktor

Auch hier verifiziert die Spektrumsmaske wieder das Sendesignal, Abb. 5.12.

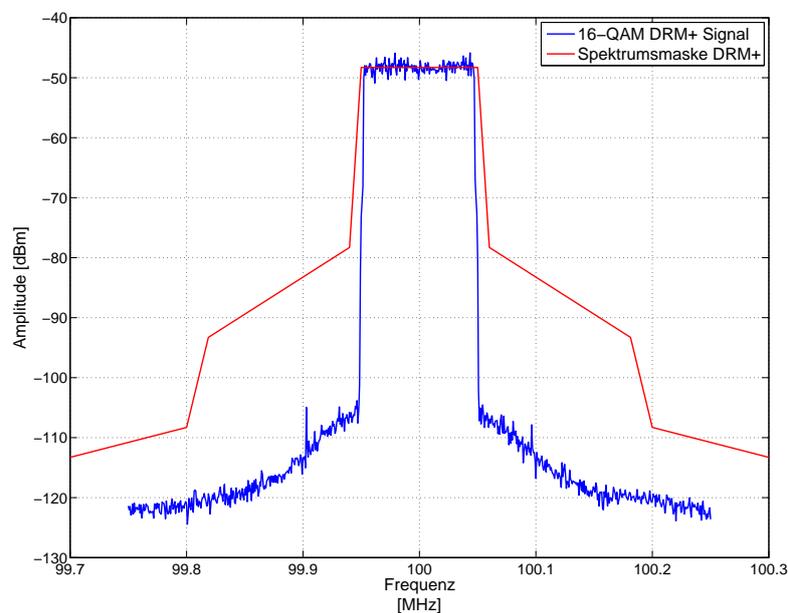


Abbildung 5.12.: 16-QAM Sendesignal F-S-R mit überlagerter Spektrumsmaske

### 5.1.1.3. Senderkombination 3

In der Kombination „Fraunhofer - Fraunhofer - USRP B100“ (F-F-U) ergeben sich folgende Spektren:

#### 4-QAM

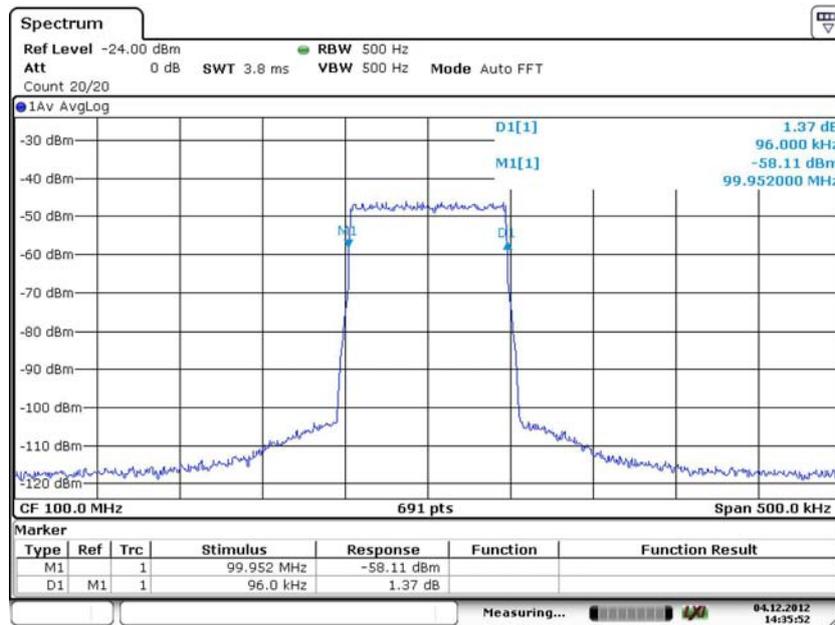


Abbildung 5.13.: 4-QAM Sendesignal F-F-U, bei eingestellter Sendeleistung von -25 dBm

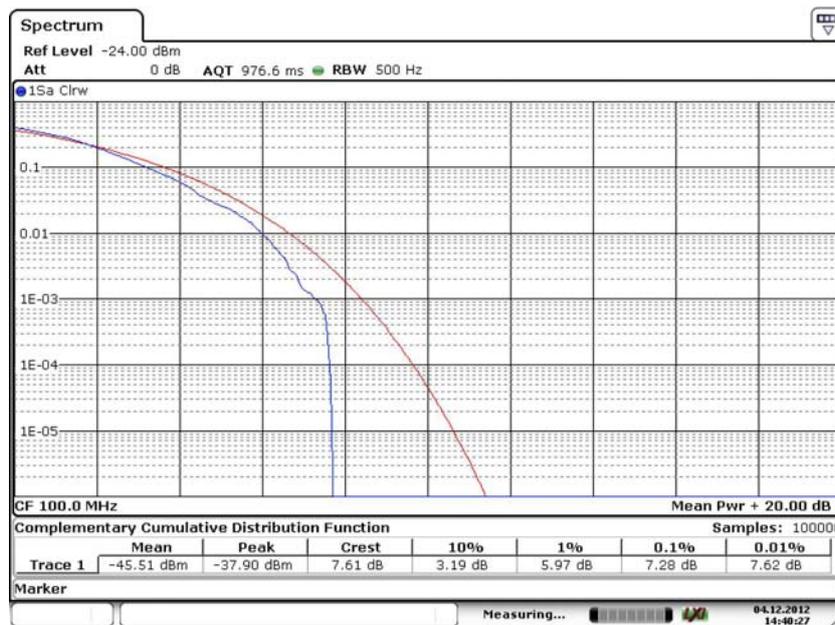


Abbildung 5.14.: 4-QAM Sendesignal F-F-U, Crest-Faktor

Die Signalanforderung werden auch in dieser Senderkombination erfüllt, siehe Abb. 5.15.

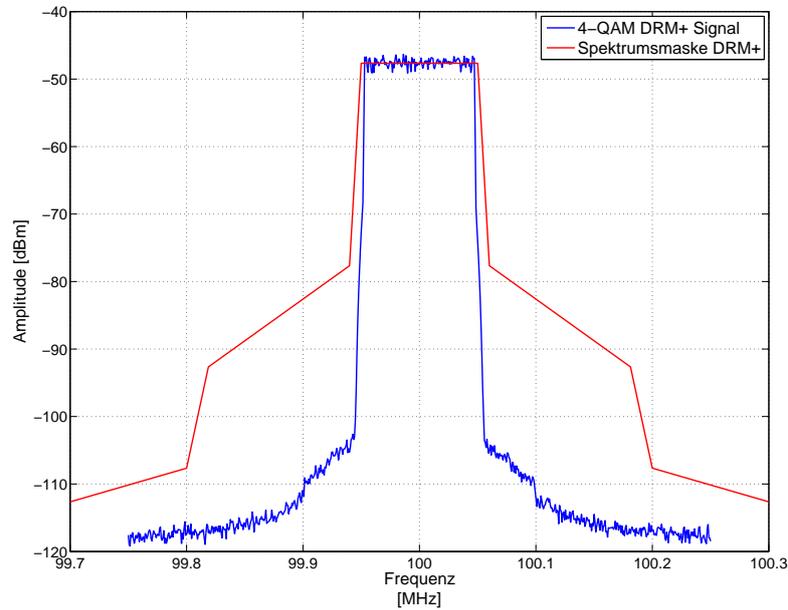


Abbildung 5.15.: 4-QAM Sendesignal F-F-U mit überlagerter Spektrumsmaske

## 16-QAM

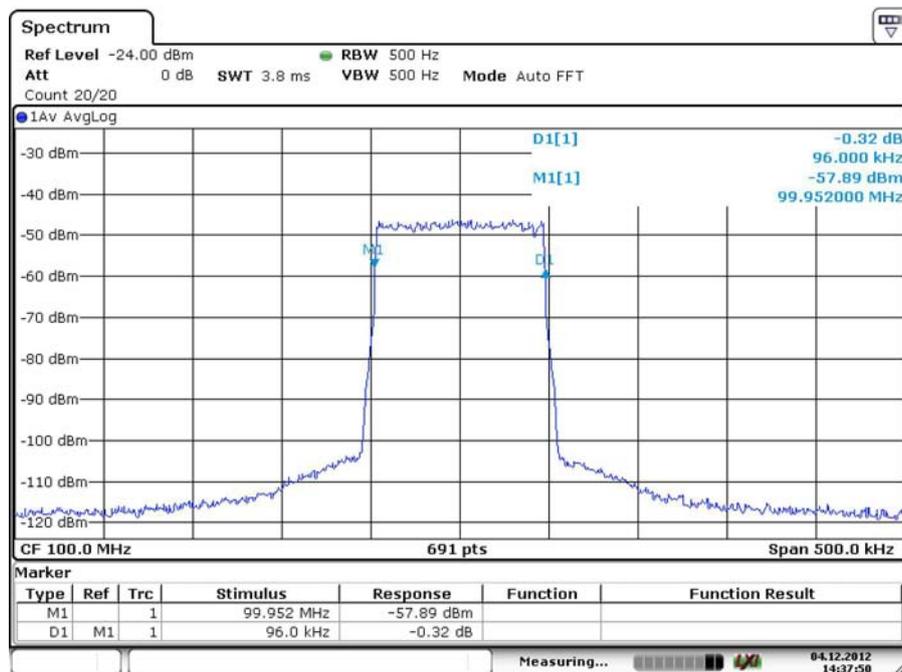


Abbildung 5.16.: 16-QAM Sendesignal F-F-U, bei eingestellter Sendeleistung von -25 dBm



Abbildung 5.17.: 16-QAM Sendesignal F-F-U, Crest-Faktor

Das 16-QAM Signal erfüllt ebenfalls die Signalanforderungen, Abb. 5.18.

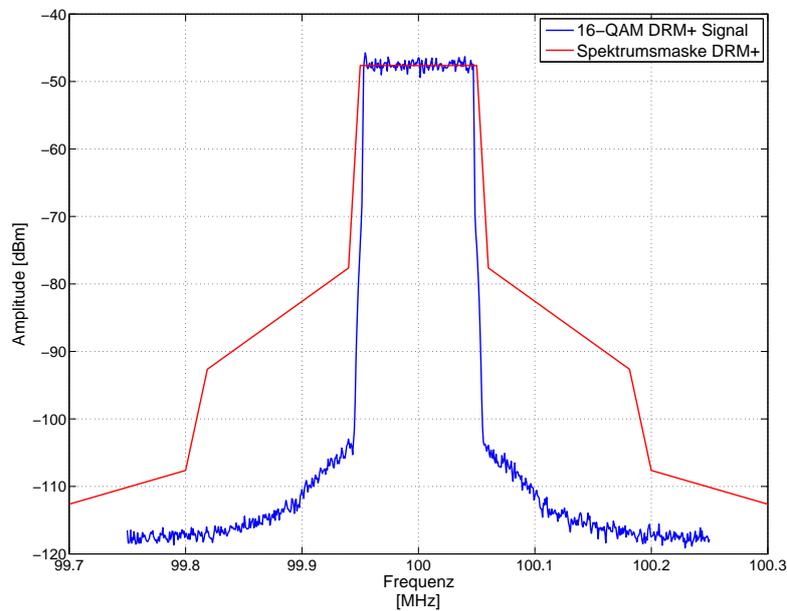


Abbildung 5.18.: 16-QAM Sendesignal F-F-U mit überlagertem Spektrumsmaske

#### 5.1.1.4. Bewertung

Die Analyse der Sendesignale hat ergeben, dass auf Grund der hohen Qualität des Sendesignals die Messergebnisse auf allen drei Bändern äquivalent sind. Darum wurden die Sendermessungen exemplarisch im VHF-Band II durchgeführt. Die Sendesignale der Kombination 1 und 2 unterscheiden sich kaum. Dies war zu erwarten, da die I/Q Basisbandmodulation bei beiden Kombination von der *Spark*-Software und die HF-Modulation vom *R&S SMU 200A* übernommen wird. Die beiden Signale unterscheiden sich nur in den Quelldaten des Contentserver.

Die Crest-Faktoren der einzelnen Sendesignale sind in Tabelle 5.1 gegenübergestellt.

Tabelle 5.1.: Crest-Faktoren der Sendesignale

Sender	4-QAM	16-QAM
<b>S-S-R</b>	6,73 dB	7,12 dB
<b>F-S-R</b>	6,98 dB	6,66 dB
<b>F-F-U</b>	7,61 dB	6,84 dB

Bei den Senderkombinationen 1 und 2 hätte man identische Crest-Faktoren erwartet, da beide Signale mit dem gleichen Basisband- und HF-Modulator erzeugt wurden. Die Abweichungen lassen sich nur auf Messungenauigkeiten bei Berechnung der CCDF im Frequenzanalysator zurückführen. Da die Bildung der Sendesignale im Modulator erfolgt ist der Vorgang nicht einsehbar. Eine Veränderung des Crest-Faktors ist nicht möglich, die Abweichungen liegen im 1 dB Bereich.

Einen Unterschied der Sendespektren stellt man erst bei der Signalanalyse der Senderkombination 3 mit dem Fraunhofer Basisbandmodulator und *USRP B100* als HF-Modulator fest. Hier zeigt sich ein nicht ganz so steiler Abfall des Spektrums wie bei den ersten beiden Senderkombinationen.

Alle Signale der drei Kombinationen erfüllen bei Überprüfung mit der DRM+ Spektrumsmaske die Anforderungen und sind daher problemlos zum Aussenden von DRM+ Signalen zu verwenden. Für den Großteil der Empfängermessungen wird deshalb die Senderkombination 1 gewählt, da der *SMU 200A* per Python-Skript fernsteuerbar (siehe Kap. 4.3.3) und der DRM+ Contentserver in der *Spark*-Software ebenfalls integriert ist. Eine Messreihe wird zusätzlich mit der Senderkombination 3 durchgeführt, um den Empfang der Signale der zwei unterschiedlichen Senderanordnungen am Empfänger vergleichen zu können.

#### 5.1.2. DAB+

Das DAB+ Sendesignal entspricht den Vorgaben aus Kap. 3.1.3.1. Das Signal (Abb. 5.19) wurde im DAB Block 5A (174,928 MHz) gesendet. Die Betrachtung am Frequenzanalysator zeigt die erwartete Signalbandbreite von 1,536 MHz und einen Crest-Faktor von 5,58 dB (Abb. 5.20).

## 5. Messungen

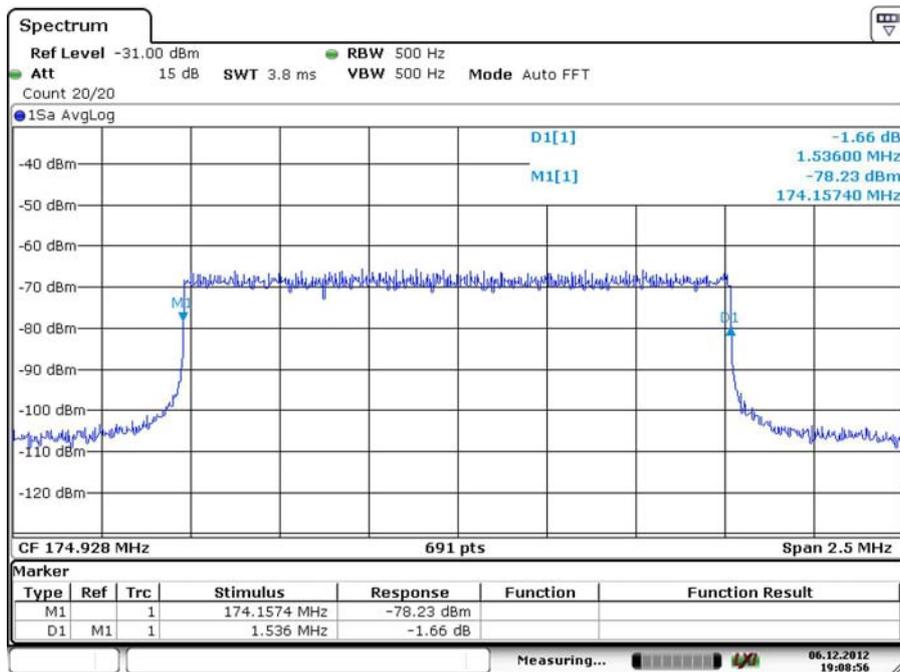


Abbildung 5.19.: DAB+ Signal im Kanal 5A - 174,928 MHz

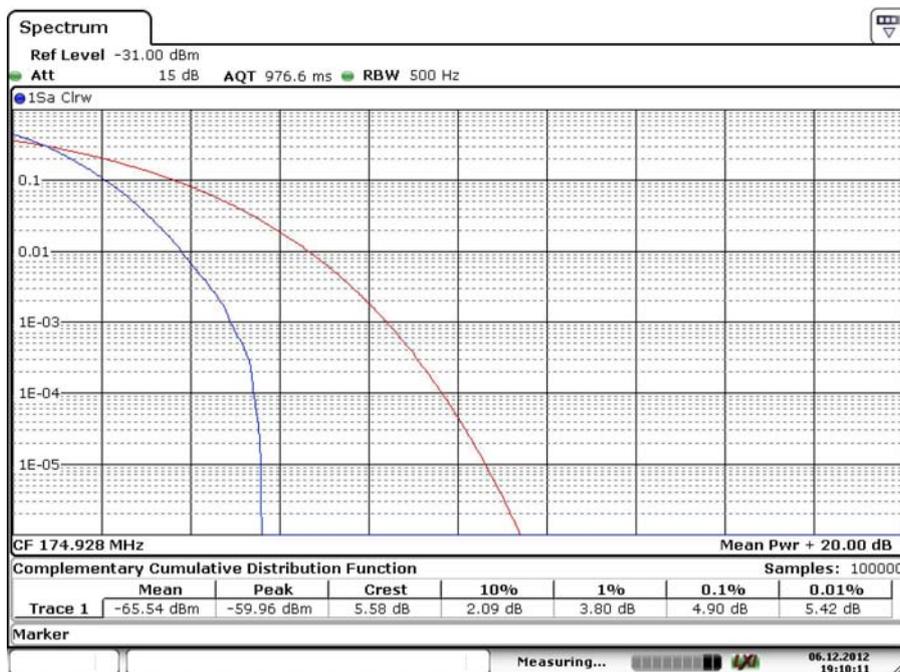


Abbildung 5.20.: Crest-Faktor DAB+ Signal

## 5.2. Rauschzahl Noxon DAB Stick

Zu Beginn der Empfängermessungen soll der Noxon DAB Stick in seinen Empfangseigenschaften klassifiziert werden. Dazu soll die Rauschzahl des Empfängerfrontends bestimmt werden. Diese beschreibt die Veränderung des Signal-Stör-Abstands am Ausgang gegenüber dem Eingang des Empfängers. Es wird der Messaufbau nach Abb. 5.21 verwendet. Nach dem Einspeisen eines Signals über den Signalgenerator *R&S SMBV 100A* in den Noxon Stick werden die I/Q-Samples über einen Linuxrechner und das Tool *rtl\_sdr* [38] in einer Datei aufgezeichnet und im binären Format gespeichert.



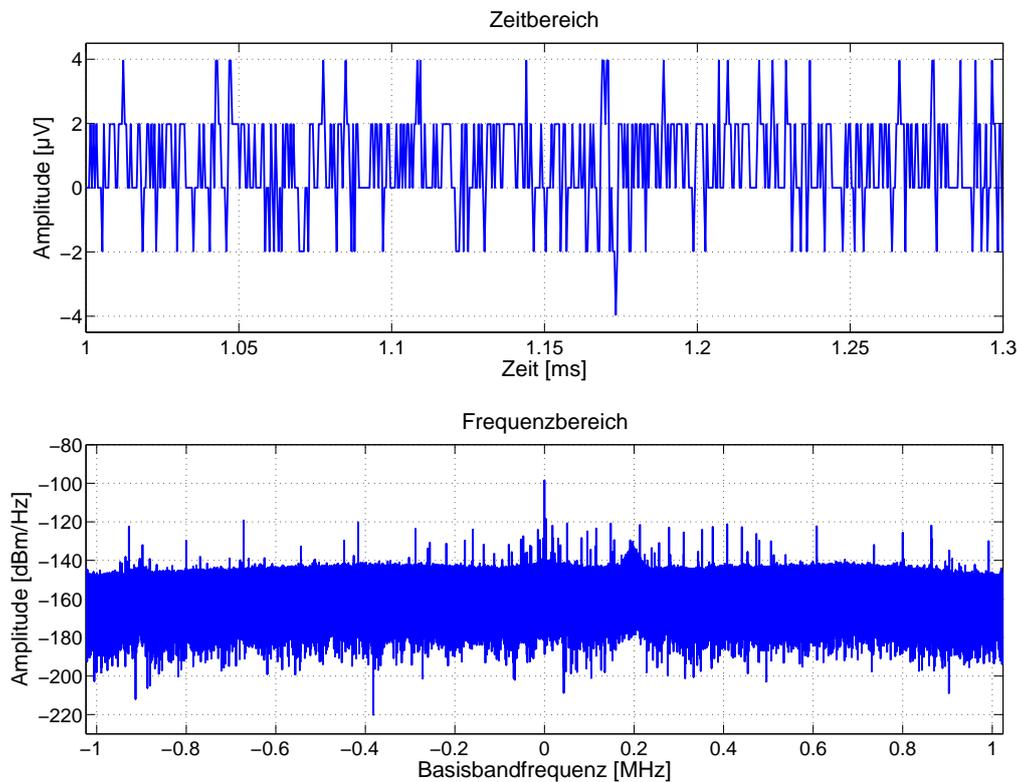
Abbildung 5.21.: Messaufbau Rauschzahlbestimmung

Zur Verarbeitung der Daten muss die Binärdatei zuerst mit Matlab in ein lesbare Format umgewandelt werden, d.h. in eine Liste von komplexwertigen Zahlen. Diese Liste entspricht den I- und Q-Abtastwerten des empfangenen analog-digital-gewandelten Signals. Wird der Realteil der Daten über die Zeit geplottet erhält man ein abgetastete Zeitsignals. Nach Anwenden der FFT auf die komplexen Daten erkennt man das Spektrum des Basisbandsignals.

Für die Berechnung der Rauschzahl ist jedoch die 8 Bit Auflösung des A/D-Wandlers zu gering. Es ist keine klare Abgrenzung zwischen schwach empfangenen Signalen und dem Rauschepich möglich. Doch genau diese Information benötigt man zur Bestimmung der Rauschzahl. Eine klassische Rauschzahl kann für den Stick nicht bestimmt werden.<sup>1</sup> Dazu müsste er einen A/D-Wandler mit größerer Auflösung besitzen.

In Abb. 5.22 ist beispielhaft die Ausgabe der I/Q-Samples bei Beschaltung mit einem 50  $\Omega$  Widerstand am Empfängereingang zu sehen. Das Rauschen im Zeitbereich ist nicht mittelwertfrei, was auf einen kleinen DC-Offset schließen lässt. Im Spektrum ist sehr gut der DC-Träger des Tuners in der Mitte des Frequenzbandes zu erkennen. Auf Grund dieses Trägers wurde in die DRM+ Decodersoftware ein Frequenzversatz eingebaut. Die Decodersoftware übernimmt die eingestellte Tuningfrequenz immer um 150 kHz versetzt, um nicht von den Störeinflüssen dieses Trägers beeinflusst zu werden.

<sup>1</sup>Versuche mit stärkeren Signalen, die sich eindeutig vom Rauschen unterschieden haben, führten zu Rauschzahlen in der Größenordnung von 34 dB. Dieser Wert ist aber für eine Rauschzahl viel zu groß und kann aus diesem Grund nicht mit der tatsächlichen Rauschzahl des Noxon Sticks überein stimmen.

Abbildung 5.22.: Ausgabe Noxon Stick bei Abschluss mit  $50 \Omega$  Widerstand

### 5.3. DRM+ Empfang

Die DRM+ Empfängermessungen werden alle mit dem Kofferradio und dem Fraunhofer DRM+ Decoder durchgeführt. Die Messungen werden mit den Ergebnissen der Diplomarbeit „Messtechnische Bewertung der Nutzbarkeit von DRM+ im VHF-Band III“ von Martin Köhler an der Fachhochschule Kaiserslautern [39] verglichen. In dieser Arbeit wurden für die Messungen verschiedene Empfängerprototypen verwendet, die sich im Aufbau von dem Kofferradio unterscheiden. Es wurden z.B. A/D-Wandler mit einer Auflösung von 16 Bit anstatt den 8 Bit des Noxon Sticks verwendet. Aus diesem Grund sind gewisse Abweichungen zwischen den Messergebnissen zu erwarten. Außerdem wurde das VHF-Band I nicht untersucht, daher liegen für diesen Bereich keine Vergleichswerte vor. Weitere Messreihen werden mit der Beta-Empfängersoftware *WaveSink* durchgeführt und den Ergebnissen der Fraunhofer Decodersoftware gegenüber gestellt.

#### 5.3.1. Dynamikbereich

Der Dynamikbereich des Noxon Frontends beim Empfang von DRM+ soll gemessen werden. Es wird die Senderkombination 1 (Kap. 4.1.1.4.1) mit 4-QAM und 16-QAM OFDM-Signal verwendet. Die Übertragung der Signale erfolgt über einen AWGN-Kanal, welcher im R&S SMU 200A simuliert werden kann.

Am HF-Modulator *R&S SMU 200A* wird die Sendeleistung in 1 dBm - Schritten solange verringert, bis die Empfängerdecodierung aussetzt. Durch Vergleichsmessungen konnte gezeigt werden (siehe Anhang A.2.1), dass diese Messmethode mit automatisierten Pegelveränderungen keine Verfälschungen der Messergebnisse bewirkt und so für die Messungen genügt. Mit dem Kofferradio werden die jeweiligen Bitfehlerraten gemessen. Die Messwerte werden über eine Messdauer von 30 Sekunden pro dBm Eingangsleistung gemittelt. Die Signaldämpfung von 12 dB im Messaufbau (Abb. 4.29) wird in den Ergebnissen berücksichtigt.

Die Messung wird mit dem Noxon Stick in der Revision 1 (Kap. 5.3.1.1 und in der Revision 2 (Kap. 5.3.1.2 durchgeführt. Die Ergebniskurven sind logarithmisch aufgetragen. Bei einer Bitfehlerrate von 0 verschwinden die Kurven aus diesem Grund im negativen Unendlichen und werden deshalb nicht eingezeichnet. Das Messkriterium, die definierte Ausfallgrenze bei einer Bitfehlerrate von  $10^{-4}$  nach der Reed-Solomon (RS) Decodierung, ist in allen Abbildungen gekennzeichnet.

### 5.3.1.1. Noxon DAB-Stick Rev. 1

In Abb. 5.23 und Abb. 5.24 sind die Ergebniskurven der Messungen mit dem Noxon USB-Sticks in der Revision 1 aufgeführt. Die Messmethode entspricht der, im vorherigen Kapitel beschriebenen.

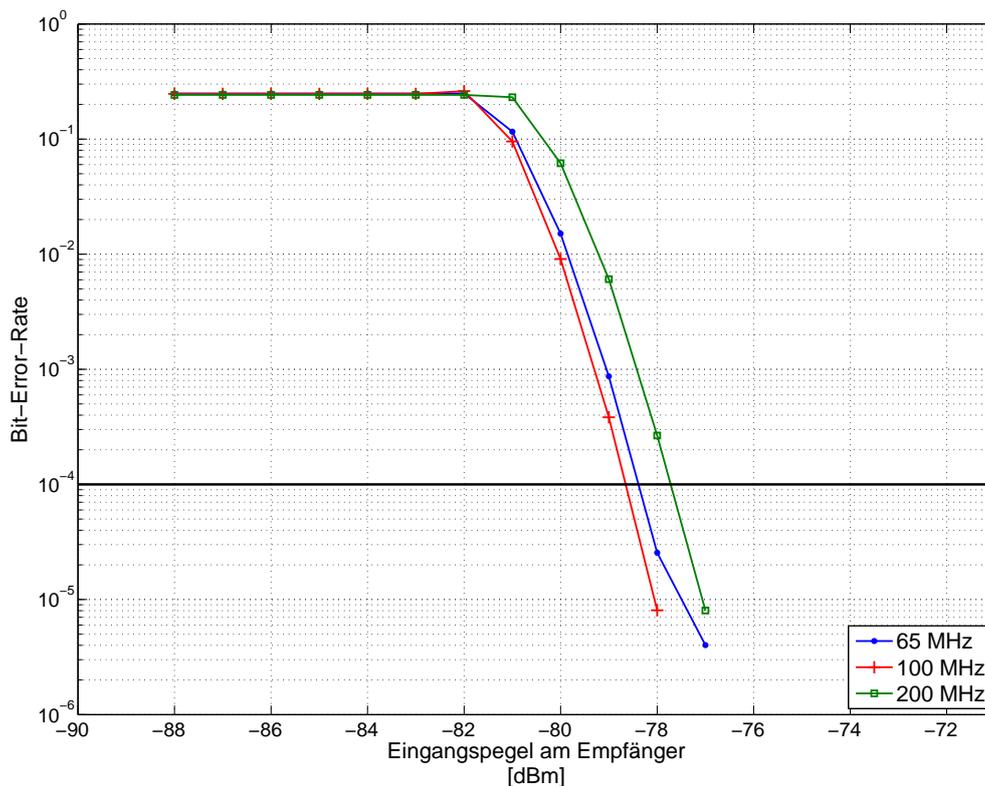


Abbildung 5.23.: 4-QAM Signal, Eingangskennlinie Noxon V1 im VHF-Band I, II und III

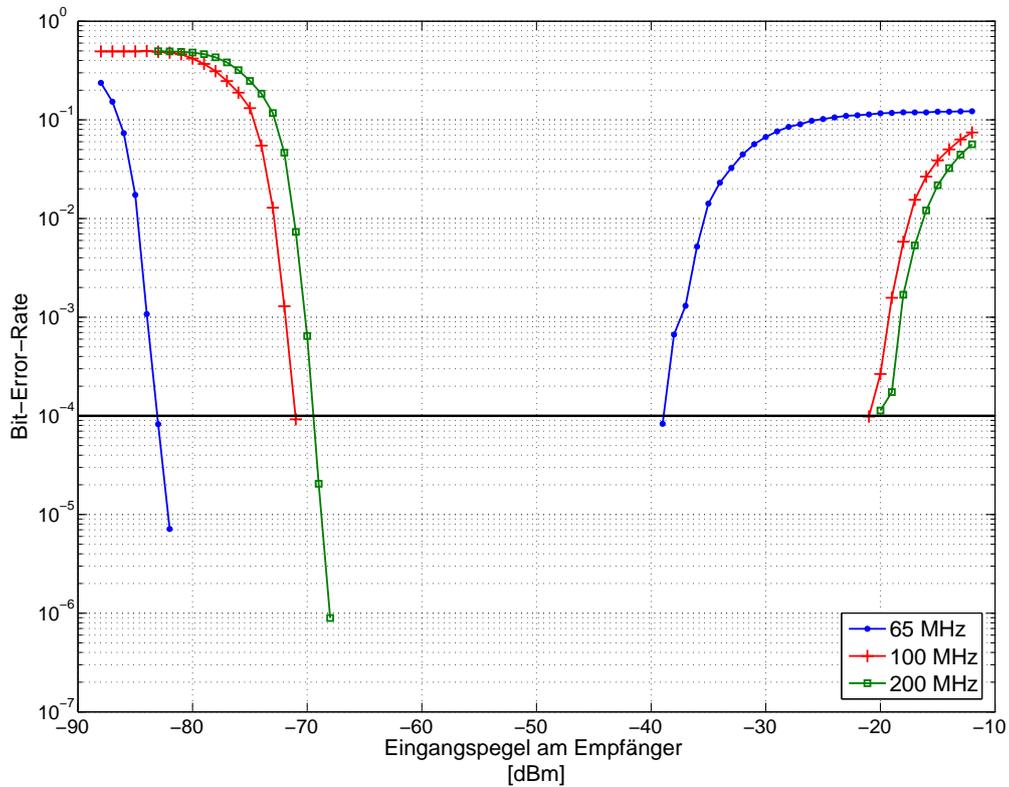


Abbildung 5.24.: 16-QAM Signal, Eingangskennlinie Noxon V1 im VHF-Band I, II und III

Tabelle 5.2.: Eingangskurven Noxon V1

	VHF-Band I	VHF-Band II	VHF-Band III
<b>4-QAM</b>			
min. Eingangspegel	-78,39 dBm	-78,65 dBm	-77,72 dBm
max. Eingangspegel	-	-	-
Dynamikbereich	75,39 dB	75,65 dB	74,72 dB
<b>16-QAM</b>			
min. Eingangspegel	-83,09 dBm	-71,04 dBm	-69,44 dBm
max. Eingangspegel	-38,92 dBm	-20,98 dBm	-20,00 dBm
Dynamikbereich	44,17 dB	50,06 dB	49,44 dB

Die Messungen mit dem 4-QAM Sendesignal ergaben, dass ein Übersteuerungspegel, bei welchem der Decoder aussetzt, nicht feststellbar war, denn bei einem maximal eingestellten Eingangspegel von -3 dBm am Empfängereingang traten keinerlei Bitfehler auf. Der Dynamikbereich erstreckt sich somit beim Empfang eines 4-QAM modulierten Sendesignals auf mindestens 74 dB in allen drei VHF-Bändern.

Wird die Modulation des OFDM-Signals auf 16-QAM erhöht, ergeben sich auch Unterschiede im Dynamikbereich. Eine Übersteuerung ist nun eindeutig erkennbar und der mögliche Empfangsbereich in allen drei VHF-Bändern liegt bei ca. 44-50 dB. Die 50 dB Dynamik des 16-QAM OFDM-Signals ergeben sich aus folgendem Zusammenhang:

Das empfangene OFDM-Signal wird im Bandpassbereich abgetastet. Damit es nicht zur Verletzung des Abtasttheorems kommt, wird das Bandpasssignal der Breite  $B$  mit der Abtastfrequenz  $B$  abgetastet. Hierbei handelt es sich um eine „komplexwertige“ Abtastung und somit stehen  $2B$  Abtastwerte zur Verfügung, die sogenannten I-/Q-Komponenten.

Da der Noxon USB-Stick ein Frontend zum Empfang von DAB/DAB+ und DVB-T ist (Signalbandbreiten über 1,5 MHz), beträgt die kleinste einstellbare Empfangsbandbreite 1 MHz. DAB Signale werden jeweils mit einer fest eingestellten Frequenz von 2,048 MHz für die I- und Q-Komponente abgetastet.

Ein DRM bzw. DRM+ Signal besitzt jedoch nur eine Bandbreite von 96 kHz. Deshalb wird durch den Noxon USB Treiber für den Empfang von DRM+ eine Abtastrate von 1,536 MHz eingestellt, um die Mindesteingangsbandbreite von 1 MHz abdecken zu können. Die Abtastung des empfangenen Signals muss nun durch einen Resampler auf 192 kHz verkleinert werden.

Der Noxon Stick empfängt aber durch die große Bandbreite am Empfängereingang nicht nur das spektral kleinere DRM+ Signal, sondern auch alle weiteren Störsignale innerhalb der Bandbreite von 1 MHz. Darum muss im Resampler eine weitere Bandbegrenzung durchgeführt werden, sonst kommt es zu einer Verschlechterung des Signal-Stör-Abstands durch Aliasing: Störanteile, die außerhalb der Nutzbandbreite liegen und nun in diese verschoben werden.

Der DRM+ Decoder des Fraunhofer IIS verwirklicht das Resampling in zwei Stufen. Die erste Stufe verkleinert die Abtastrate um den Faktor 4, die zweite Stufe um den Faktor 2. Bei einem Resampling mit dem Faktor 4 bekommt man ein Gewinn von umgerechnet einem Bit bei der Quantisierung, entsprechend führt ein Resampling mit Faktor 2 zu einem halben Bit Gewinn.

Dies bedeutet für die Samplerate von 1,536 MHz:

$$1,536 \text{ MHz} : 4 = 384 \text{ kHz} \quad (5.1)$$

$$384 \text{ kHz} : 2 = 192 \text{ kHz} \quad (5.2)$$

Nach dem Resampling hat man also eine Samplerate von 192 kHz und einen Signal-Stör-Abstandsgewinn von 1,5 Bit.

Da es sich bei dem DRM+ Signal um ein OFDM-Signal handelt, entspricht die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Amplituden somit näherungsweise einer Gaußverteilung <sup>2</sup>:

$$p(x) = \left( \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \right) e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (5.3)$$

<sup>2</sup>nachfolgende Berechnungen beziehen sich auf [40]

Weiter lässt sich das Aussteuerungssignal (clipped signal) des A/D-Wandlers definieren zu

$$\tilde{x}(t) = \begin{cases} x(t) & |x(t)| < C \\ C & |x(t)| \geq C \end{cases} \quad (5.4)$$

mit der Austeuerungsgrenze  $C > 0$ . Die mittlere Leistung des „clipping“ Rauschen  $x(t) - \tilde{x}(t)$  kann wie folgt bestimmt werden:

$$N_{clip} = 2 \int_C^\infty (x - C)^2 p(x) dx \quad (5.5)$$

Setzt man Formel (5.3) in (5.5) ein und löst das Integral, erhält man nach [40]

$$N_{clip} = 2(\sigma^2 + C^2)Q\left(\frac{C}{\sigma}\right) - 2C \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{C^2}{2\sigma^2}}, \quad (5.6)$$

mit der Q-Funktion

$$Q(z) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right) \int_z^\infty e^{-\frac{u^2}{2}} du . \quad (5.7)$$

Bei gleichförmiger Quantisierung, einer Auflösung von  $M$  Bit und einer Aussteuerungsgrenze  $C$  wird das Signal mit  $2^M$  äquidistanten, diskreten Werten quantisiert. Damit ergibt sich für das Quantisierungsintervall  $q$ :

$$q = \frac{2C}{2^M} \quad (5.8)$$

Daraus folgt für die mittlere Leistung des Quantisierungsrauschens:

$$N_q = \frac{q^2}{12} = \frac{C^2}{3 \cdot 2^{2M}} \quad (5.9)$$

Das Quantisierungsrauschen und das „clipping“ Rauschen sind statistisch unabhängig, darum gilt für den Signal-Stör-Abstand  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{\sigma^2}{N_{clip} + N_q} \quad (5.10)$$

$$= \left[ 2(1 + \varsigma)Q(\sqrt{\varsigma}) - \sqrt{\frac{2\varsigma}{\pi}} e^{-\frac{1}{2}\varsigma} + \frac{\varsigma}{3 \cdot 2^{2M}} \right]^{-1}, \quad (5.11)$$

mit

$$\varsigma = \frac{C^2}{\sigma^2} . \quad (5.12)$$

Formel (5.11) beschreibt den Signal-Stör-Abstand  $\gamma$  in Abhängigkeit des Aussteuerungsverhältnisses  $\varsigma$  („clipping ratio“). Das Aussteuerungsverhältnis ist durch (5.12) definiert. Aus den Messergebnissen (Tabelle 5.2) ist bekannt, dass im VHF-Band II bei 16-QAM der Mindest-Signal-Stör-Abstand am Empfängereingang 11,65 dB beträgt.

Mit Hilfe des Graphen des Quantisierungs-SNR über dem Aussteuerverhältnis in [40] (Figure 2) kann das Aussteuerungsverhältnis am ersten Schnittpunkt mit dem Mindest-SNR von 11,65 dB zu  $\varsigma_1 = 1,875$  dB bestimmt werden. Der zweite Schnittpunkt gibt das Aussteuerungsverhältnis bei Überssteuerung wieder. Bei einem Aussteuerungsverhältnis größer 20 dB konvergieren die beiden ersten Terme der Gleichung (5.11) gegen Null und es bleibt

$$\gamma = \left[ \frac{\varsigma}{3 \cdot 2^{2M}} \right]^{-1}. \quad (5.13)$$

Umstellen von (5.13) und Angabe des Ergebnis in dB ergibt:

$$\varsigma_{dB} = 4,77 \text{ dB} + 6M - \gamma_{dB} \quad (5.14)$$

Nimmt man jetzt die 8 Bit des A/D-Wandlers im Noxon DAB+ Stick und die durch das Resampling zusätzlich gewonnenen 1,5 Bit, hat man  $M = 9,5$  Bit gegeben und  $\gamma$  beträgt 11,65 dB. Setzt man die gegebenen Werten ein, ergibt

$$\varsigma_2 = 50,12 \text{ dB} \quad (5.15)$$

den zweiten Schnittpunkt.

Die Differenz der beiden Schnittpunkte liefert den theoretischen Wert des Dynamikbereichs.

$$\Delta\varsigma = \varsigma_2 - \varsigma_1 = 48,245 \text{ dB} \quad (5.16)$$

Laut (5.16) ist also zur Decodierung eines 16-QAM OFDM-Signals eine Dynamik von mindestens 48,245 dB erreichbar. In den Messungen wurde ein Dynamikbereich von 50,06 dB (VHF-Band II) ermittelt, was mit der theoretischen Betrachtung in 5.16 recht gut übereinstimmt.

Wird als Sendesignal ein 4-QAM OFDM-Signal verwendet, liegt der Mindest-SNR bei 2,05 dB (Tabelle 5.2). Versucht man nun den ersten Schnittpunkt mit der Funktion des Aussteuerverhältnisses zu bestimmen, stellt man fest, dass dieser unter 0 dB liegt. Der zweite Schnittpunkt liegt bei

$$\varsigma_{2-4-QAM} = 59,72 \text{ dB}. \quad (5.17)$$

Es ergibt sich ein theoretischer Dynamikbereich von mindestens 59,72 dB, welcher durch die Messungen bestätigt und zu 75 dB bestimmt wurde.

Mit einer aktiven AGC könnte dieser Dynamikbereich effektiv noch vergrößert werden. Das 48 dB Fenster des A/D Umsetzers würde so nach links und rechts verschoben werden. Da die AGC Unterstützung in der Decodersoftware noch nicht implementiert ist, konnte dies nicht angewandt werden. Bei ausgeschalteter AGC ergibt sich nur der maximal mögliche Dynamikbereich in der Größenordnung des A/D Umsetzers.

### 5.3.1.2. Noxon DAB-Stick Rev. 2

Mit der gleichen Messmethode (Kap. 5.3.1) werden die Eingangskennlinien bei Verwendung eines Noxon USB-Sticks der Revision 2 aufgezeichnet (Abb. 5.25 und 5.26).

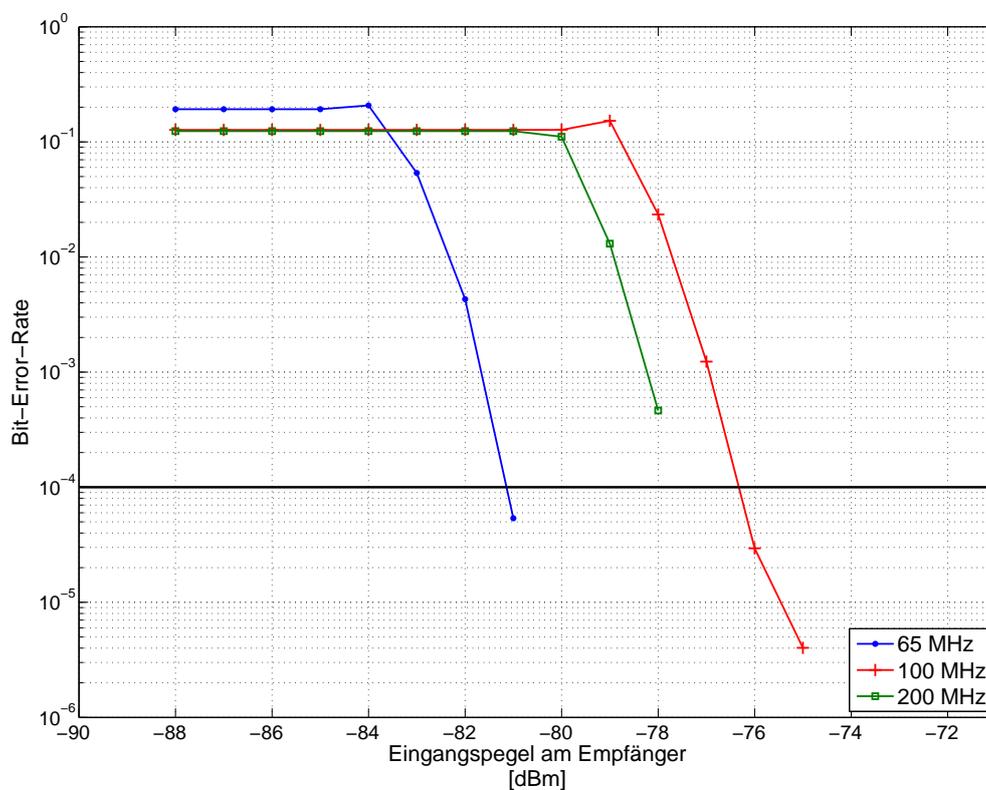


Abbildung 5.25.: 4-QAM Signal, Eingangskennlinie Noxon V2 im VHF-Band I, II und III

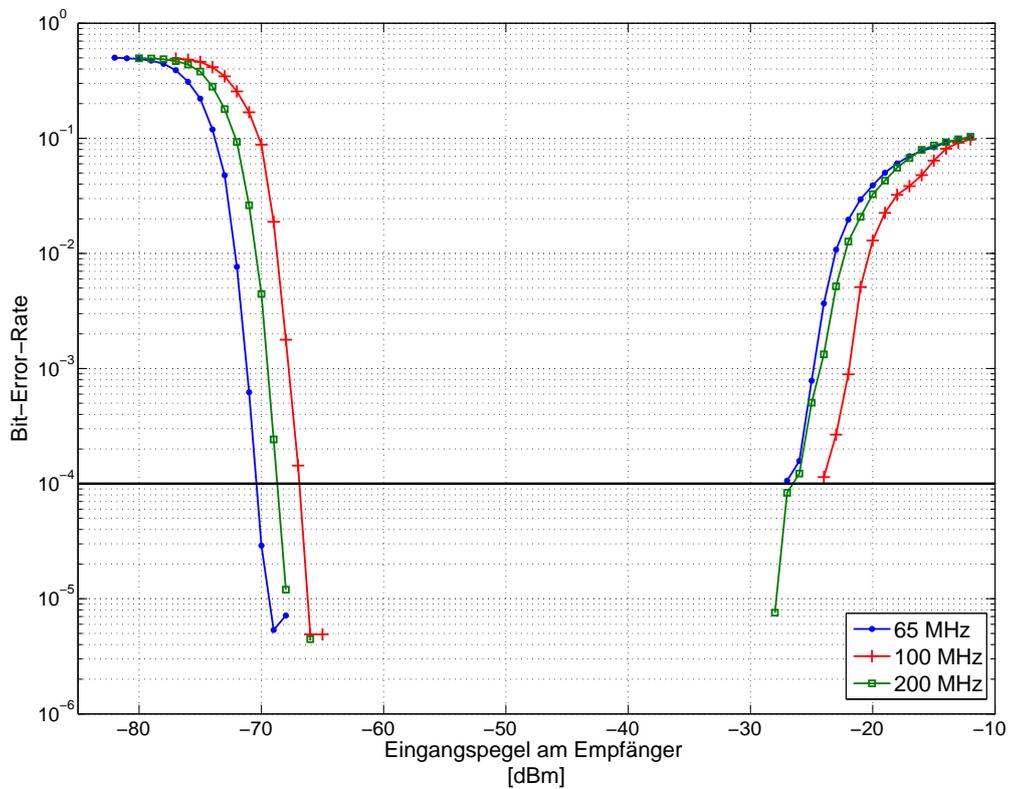


Abbildung 5.26.: 16-QAM Signal, Eingangskennlinie Noxon V2 im VHF-Band I, II und III

Tabelle 5.3.: Eingangskurven Noxon V2

	VHF-Band I	VHF-Band II	VHF-Band III
<b>4-QAM</b>			
min. Eingangspegel	-81,15 dBm	-76,34 dBm	-78,50 dBm
max. Eingangspegel	-	-	-
Dynamikbereich	78,15 dB	73,34 dB	75,50 dB
<b>16-QAM</b>			
min. Eingangspegel	-70,41 dBm	-66,89 dBm	-68,70 dBm
max. Eingangspegel	-27,00 dBm	-24,00 dBm	-26,52 dBm
Dynamikbereich	43,41 dB	42,89 dB	42,18 dB

Ein Übersteuerungspegel konnte beim Empfang des 4-QAM Signals wieder nicht festgestellt werden. Der Minimalpegel zum Empfang liegt hier im VHF-Band I bei -81,15 dBm, wodurch sich ein Dynamikbereich von mindestens 78 dB ergibt. Der Empfang mit dem Noxon Stick der Rev. 2 ist in allen drei Bändern bei nahezu den gleichen Eingangspegeln möglich. Im Falle des Empfangs eines 16-QAM Signals liegt der nutzbare Dynamikbereich bei 42-44 dB.

Aus diesen Ergebnissen ergibt sich für die späteren Messungen eine optimale Eingangsleistung

am Empfänger von -37 dBm. Man befindet sich im oberen Drittel des empfangbaren Dynamikbereiches. Der HF-Modulator sendet dabei das Signal mit einer Sendeleistung von -25 dBm aus. Durch den Laboraufbau ergibt sich ein Dämpfungsverlust von 12 dB, wodurch die effektive Eingangsleistung von -37 dBm am Empfänger zustande kommt.

Die Eingangskennlinien im VHF-Band III sind für den DRM+ Empfang interessant. Mit einem Eingangsspegel zwischen -20 dBm und -68 dBm lässt sich sowohl ein 4-QAM, als auch ein 16-QAM modulierte Signal fehlerfrei empfangen (Abb. 5.27).

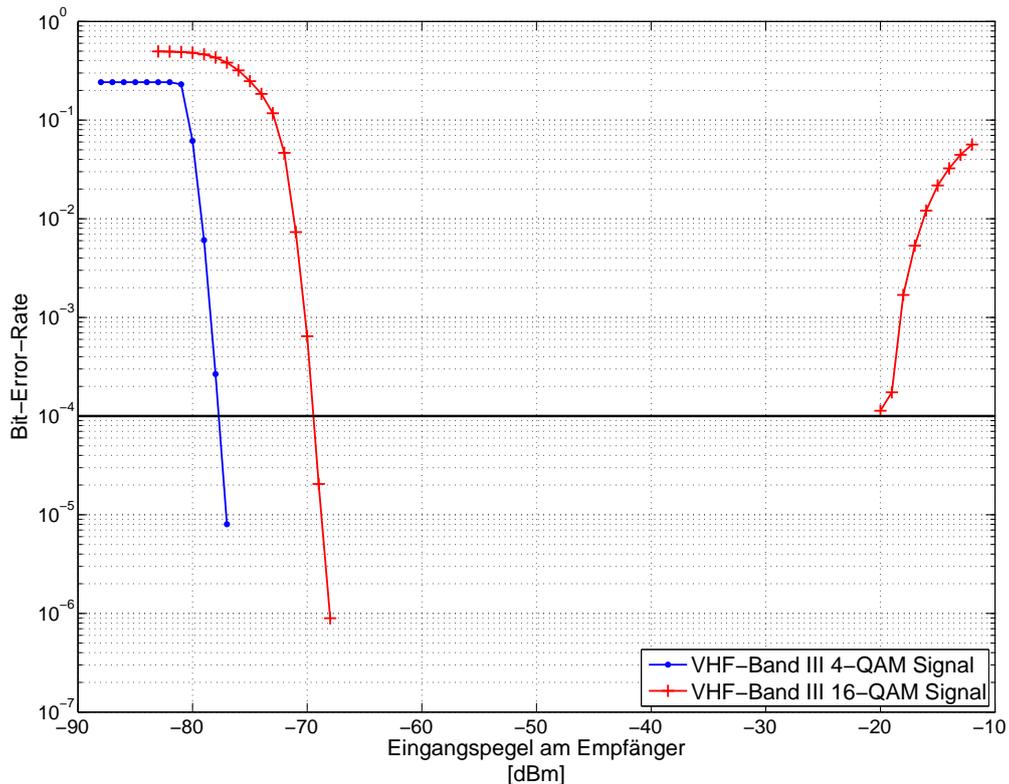


Abbildung 5.27.: Vergleich 4-QAM & 16-QAM Sendesignal im VHF-Band III, Noxon V1

Zum Abschluss der Dynamikmessungen wird, wie in Kapitel 5.1.1.4 bereits erwähnt, ein Vergleich zwischen der Senderkombination 1 (Spark Contenserver & Modulator mit R&S SMU 200A) und Senderkombination 3 (Fraunhofer Contentserver & Modulator mit USRP B100) durchgeführt. Die Messmethoden der beiden Messreihen unterscheiden sich in sofern, dass beim SMU 200A die Sendeleistung automatisiert in 1 dB Schritten verändert werden kann und beim USRP die Eingangsleistung am Empfänger über eine manuelle Veränderung der übertragenen Signalleistung mit einem Dämpfungsglied erreicht wird. Des Weiteren ist ein Abgleich der ursprünglichen Signalausgangsleistung der beiden HF-Modulatoren notwendig. So wurde die Gain-Einstellung im Fraunhofer-Modulator ungefähr auf das 0 dBm Niveau des SMU 200A angepasst. Das Messergebnis ist in Abb. 5.28 dargestellt.

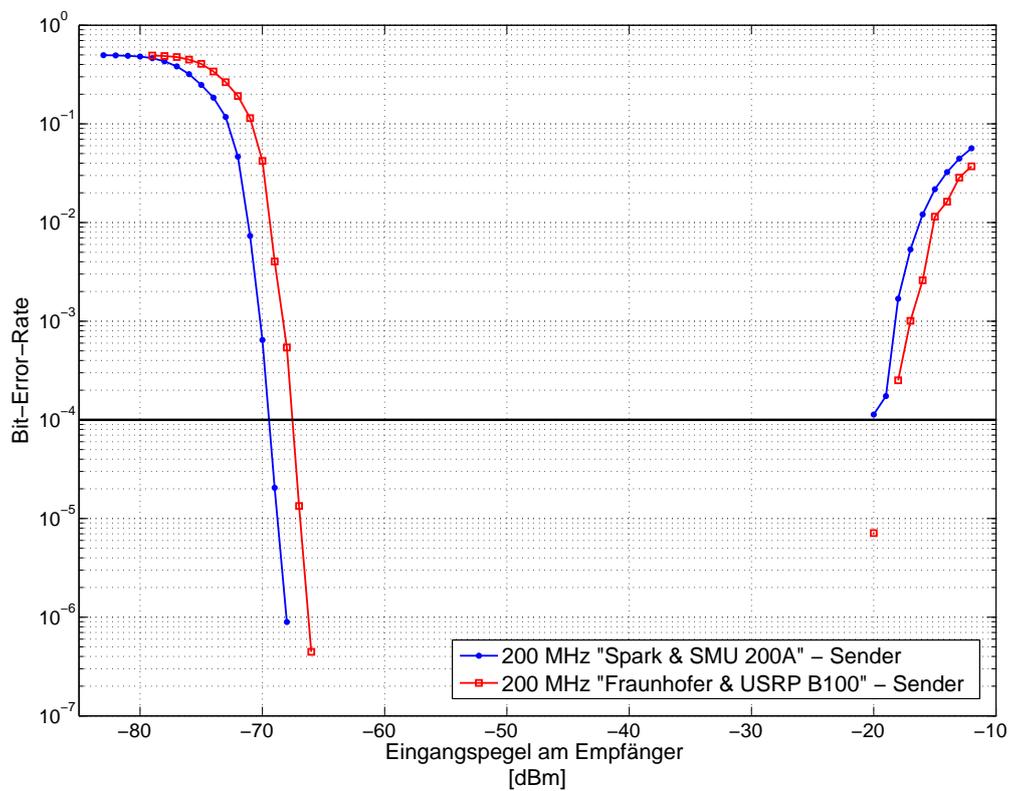


Abbildung 5.28.: 16-QAM Signal, Vergleich Sender Spark und Sender Fraunhofer

Tabelle 5.4.: Eingangsspegel bei Spark Sender und Fraunhofer Sender, 16-QAM Signal

	Spark & SMU200A	Fraunhofer & USRP B100
<b>min. Eingangsspegel</b>	-69,44 dBm	-67,55 dBm
<b>max. Eingangsspegel</b>	-20,00 dBm	-18,00 dBm
<b>Dynamikbereich</b>	49,44 dB	49,55 dB

Es zeigt sich eine leichte Verschiebung der Eingangskennlinie, welche jedoch auf die anfangs erwähnten Ungenauigkeiten der Messeinstellungen (Gain-Einstellung und Messmethodik) zurückzuführen ist. Könnte man diese beiden Ungenauigkeiten perfekt bereinigen, würden die Kurven identisch aufeinander abgebildet werden. Es zeigt sich also kein Unterschied beim Empfang unterschiedlicher Senderkombinationen.

### 5.3.2. Signal-Stör-Abstand

Um eine weitere Aussage über die Mindestanforderung zum Empfang von DRM+ mit dem Kofferradio treffen zu können, wird in der nächsten Messreihe der notwendige Signal-Stör-Abstand untersucht.

Die Signalübertragung findet weiterhin über einen AWGN-Kanal statt, welcher alle 30 Sekunden den Signalstörabstand um 1 dB vergrößert. Die am Empfänger gemessenen Bitfehlerraten nach der RS-Fehlerkorrektur werden wieder über den Zeitraum von 30 Sekunden gemittelt. Die Eingangsleistung am Empfänger beträgt -37 dBm. Die Ergebniskurven sind in Abb. 5.29 und Abb. 5.30 zu sehen.

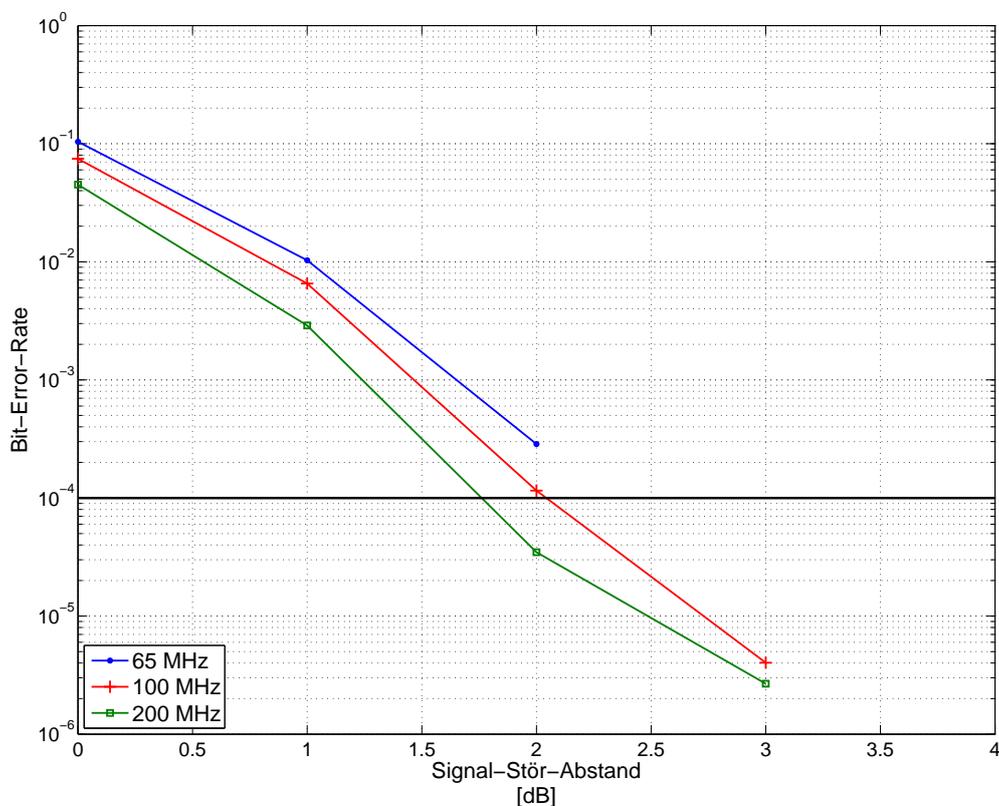


Abbildung 5.29.: 4-QAM Signal, Verlauf Signal-Stör-Abstand im VHF-Band I, II und III

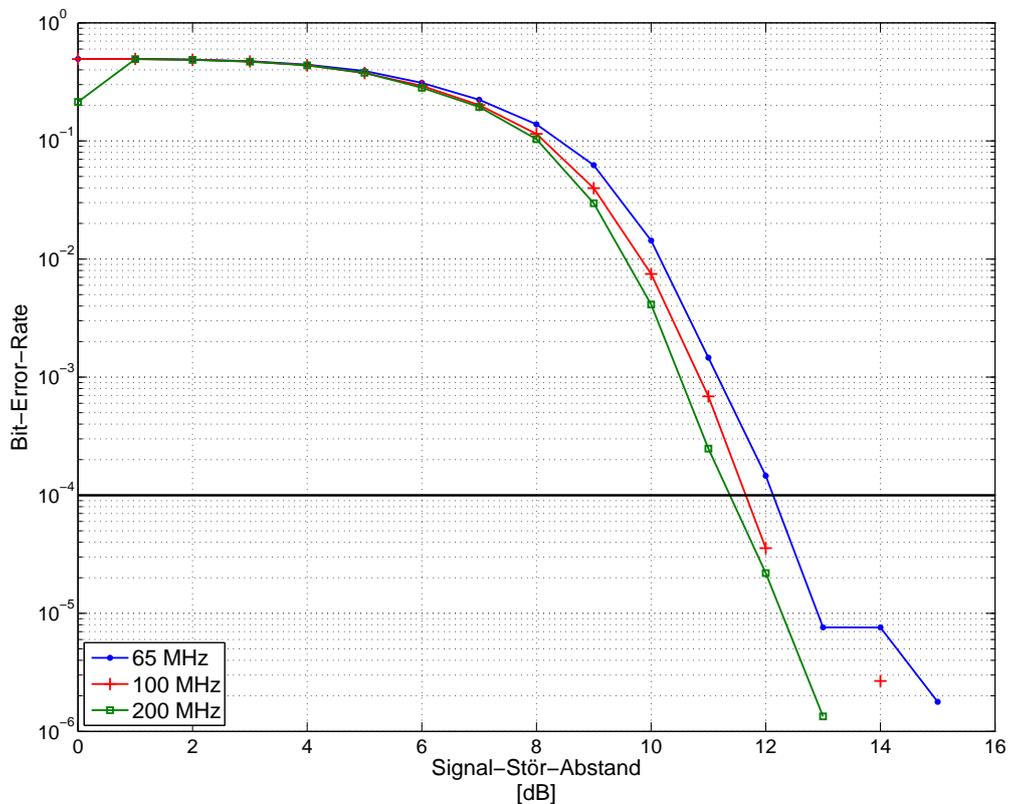


Abbildung 5.30.: 16-QAM Signal, Verlauf Signal-Stör-Abstand im VHF-Band I, II und III

Tabelle 5.5.: Signal-Stör-Abstände 4-QAM &amp; 16-QAM Signal

	VHF-Band I	VHF-Band II	VHF-Band III
<b>4-QAM</b>	2,25 dB	2,05 dB	1,76 dB
<b>16-QAM</b>	12,12 dB	11,65 dB	11,38 dB
<b>Vergleichswerte [39]</b>			
<b>4-QAM</b>	-	2,95 dB	3,29 dB
<b>16-QAM</b>	-	8,49 dB	8,75 dB

Aus den Messungen geht hervor, dass ein fehlerfreier Empfang ( $\text{BER} < 10^{-4}$ ) bei Verwendung eines AWGN Übertragungskanals und eines 4-QAM OFDM-Signals ab einem Signal-Stör-Abstand in allen drei Empfangsbändern von ca. 2 dB und bei einem 16-QAM OFDM-Signal von mindestens 12 dB möglich ist. Es gibt nur leichte Abweichungen von den Vergleichswerten [39], zum erfolgreichen Decodieren des 16-QAM Signals benötigt die Decodersoftware einen etwas größeren Signal-Stör-Abstand als in [39] angegeben.

### 5.3.3. Fadingmessungen

Mit dem R&S SMU 200A können festgelegte Fadingprofile laut DRM Standard [6] des Übertragungswegs simuliert werden. Dadurch ist es möglich, das Verhalten des Empfängers bei verschiedenen Geschwindigkeiten bzw. Umgebungssituationen zu beurteilen. Die Eingangsleistung am Empfänger wurde bewusst bei allen Messungen zu -37 dBm gewählt. Da bei den Fadingmessungen die Sendeleistung immer wieder sehr stark absinken kann, hat man so noch genug Spielraum bis zum Erreichen des minimalen Eingangspegels. Die Bitfehlerrate, des sich durch das Fading ändernde Sendesignals muss am Empfänger über einen längeren Zeitraum gemittelt werden, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Um stärkere Schwankungen bei der Wiederholung einer Messung zu vermeiden, wurde eine Mittelungszeit von 30 Minuten pro Messpunkt gewählt.

#### 5.3.3.1. Geschwindigkeitsmessungen

Zur Ermittlung der Maximalgeschwindigkeit, bei der der Empfang von DRM+ mit dem Kofferradio noch möglich ist, wurden Messungen in allen drei Empfangsbändern mit beiden DRM+ Sendesignalen durchgeführt. Die Geschwindigkeit der Fadingprofile wurde pro Messpunkt im VHF-Band I und II um 50 km/h, im VHF-Band III um 20 km/h erhöht. Das VHF-Band III wurde genauer untersucht, da dieser Bereich für einen Simulcastbetrieb von DRM+ neben DAB+ in Deutschland möglich wäre. Abb. 5.31 und Abb. 5.32 zeigen die Messergebnisse für die zwei Sendesignale mit dem Fadingprofil *Urban Vehicle*.

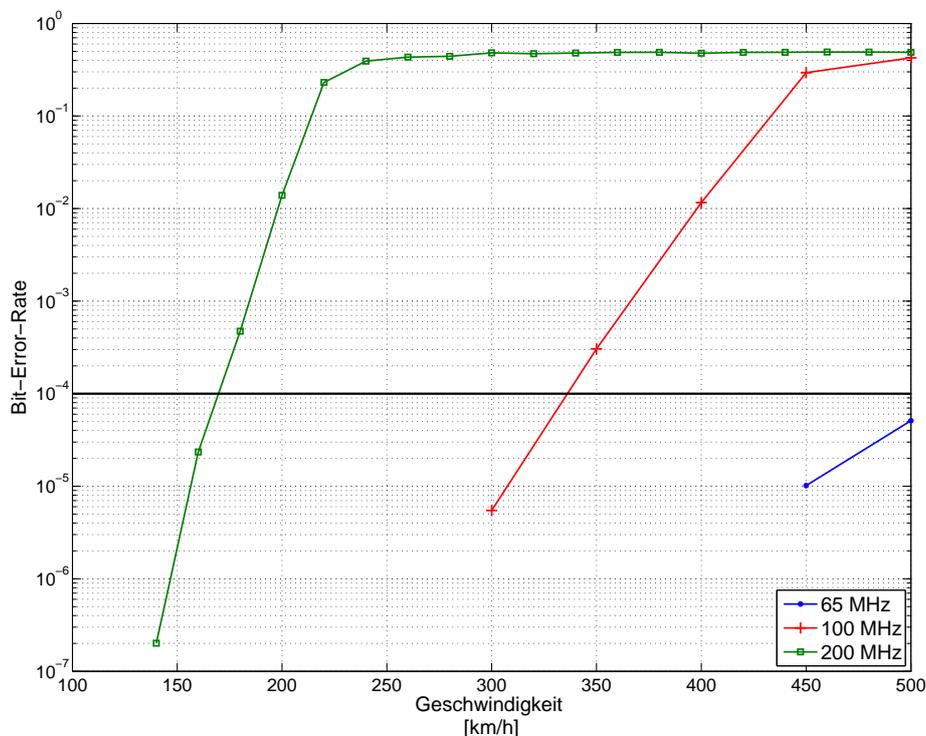


Abbildung 5.31.: Geschwindigkeitsmessung 4-QAM Signal, Fading „Urban Vehicle“ im VHF-Band I, II und III

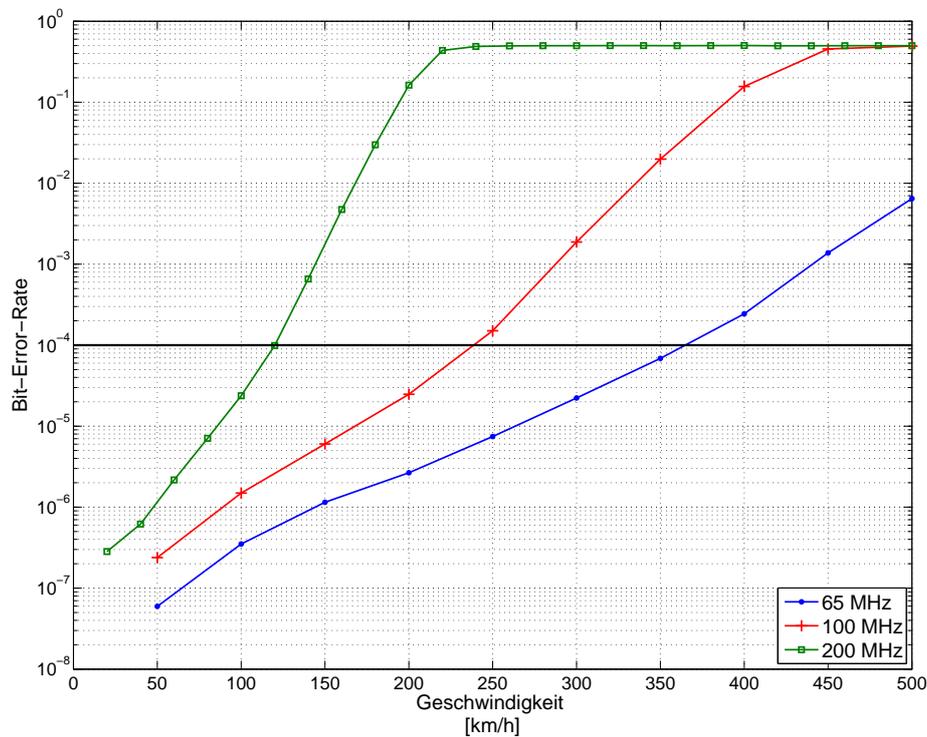


Abbildung 5.32.: Geschwindigkeitsmessung 16-QAM Signal, Fading „Urban Vehicle“ im VHF-Band I, II und III

Tabelle 5.6.: Maximale Geschwindigkeiten mit Fadingprofil „Urban Vehicle“

Urban Vehicle	VHF-Band I	VHF-Band II	VHF-Band III
<b>4-QAM</b>	> 500 km/h	336 km/h	170 km/h
<b>16-QAM</b>	365 km/h	239 km/h	120 km/h
	<b>Vergleichswerte [39]</b>		
<b>4-QAM</b>	-	367 km/h	169 km/h
<b>16-QAM</b>	-	344 km/h	115 km/h

In Tabelle 5.6 sind die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen mit dem Fadingprofil „Urban Vehicle“ aufgeführt. Die Messwerte liegen im Bereich der Vergleichswerte [39], nur beim 16-QAM Signal im VHF-Band II trat eine großen Differenz von 105 km/h zu [39] auf.

Abb. 5.33 und Abb. 5.34 zeigen die Ergebniskurven der Messungen mit dem Fadingprofil „Rural“.

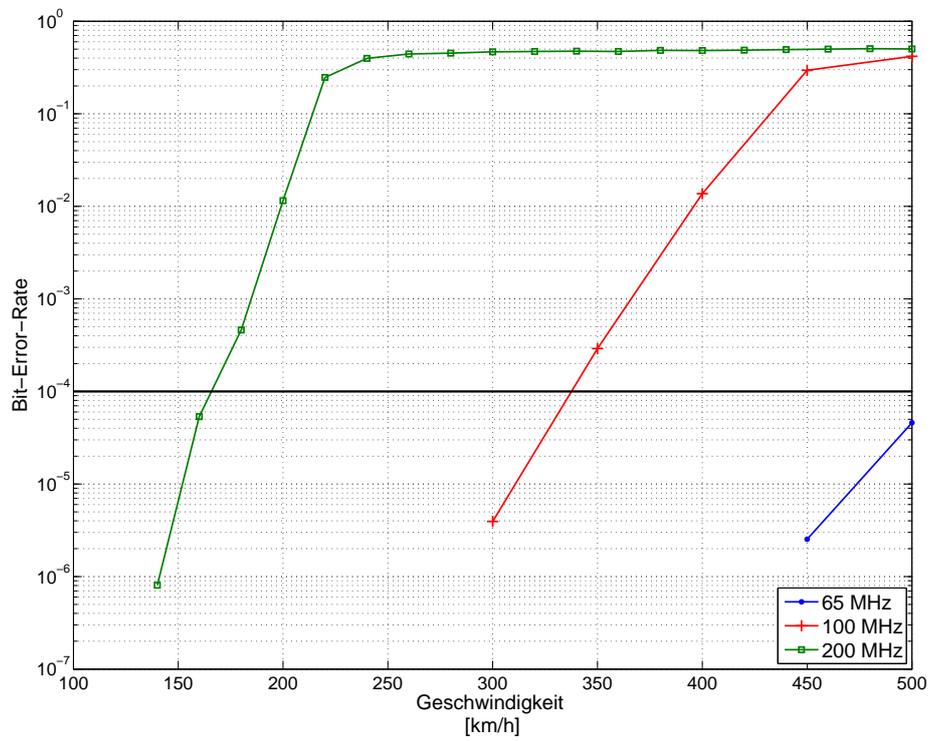


Abbildung 5.33.: Geschwindigkeitsmessung 4-QAM Signal, Fading „Rural“ im VHF-Band I, II und III

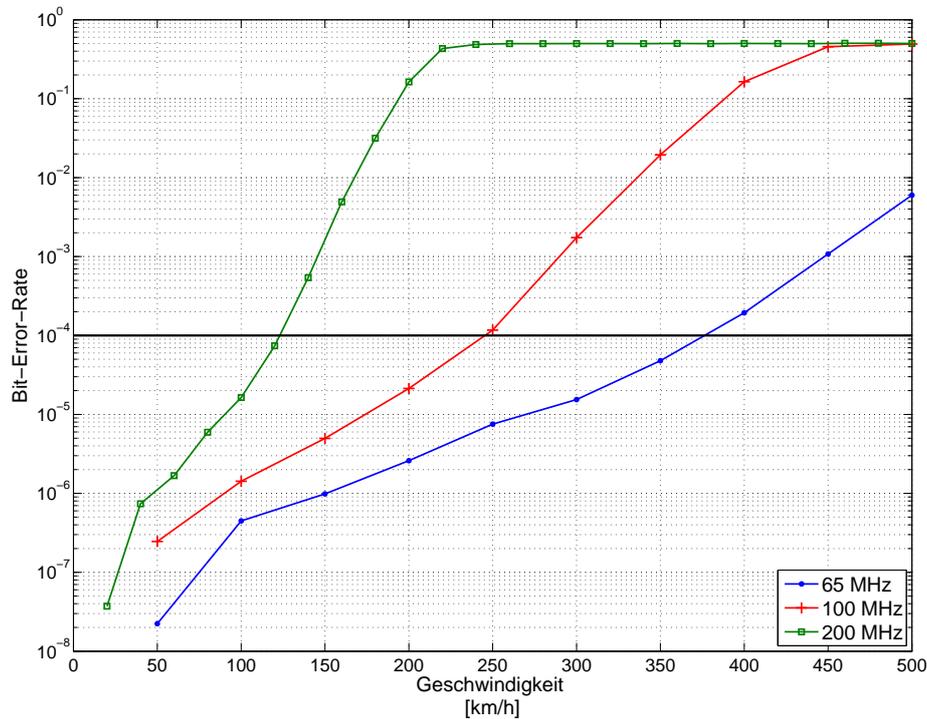


Abbildung 5.34.: Geschwindigkeitsmessung 16-QAM Signal, Fading „Rural“ im VHF-Band I, II und III

Tabelle 5.7.: Maximale Geschwindigkeiten mit Fadingprofil „Rural“

Rural	VHF-Band I	VHF-Band II	VHF-Band III
<b>4-QAM</b>	> 500 km/h	338 km/h	166 km/h
<b>16-QAM</b>	376 km/h	245 km/h	123 km/h
	<b>Vergleichswerte [39]</b>		
<b>4-QAM</b>	-	328 km/h	168 km/h
<b>16-QAM</b>	-	305 km/h	107 km/h

Tabelle 5.7 mit den Messergebnissen des *Rural* Fadingprofils zeigt leichte Unterschiede im Vergleich zu den Ergebnissen des Fadingprofils *Urban Vehicle*. Die Messwerte entsprechen mit geringen Abweichungen den Vergleichswerten [39], die Geschwindigkeitsdifferenz im VHF-Band II beim 16-QAM hat sich auf 50 km/h verkleinert. Die Ergebnisse stimmen mit der Feststellung überein, dass die Systemanforderung bei Empfang eines 16-QAM Signals im VHF-Band III nicht erfüllt ist. Statt der geforderten 150 km/h wird nur eine Geschwindigkeit von maximal 123 km/h erreicht.

### 5.3.3.2. Signal-Stör-Abstand Messungen

Nachdem die maximal möglichen Geschwindigkeiten bekannt sind, sollen nun die notwendigen Signal-Stör-Abstände für die beiden Fadingprofile bestimmt werden. Die Messmethodik der Signal-Stör-Abstand Messungen entspricht weitgehend der Messung aus Kapitel 5.3.2. Gegenüber dieser Messung wird auch hier, wie bei den Geschwindigkeitsmessungen, der Mittelungszeitraum von 30 Sekunden auf 30 Minuten erhöht. Die eingestellte Fadinggeschwindigkeit ändert sich nicht und entspricht den im DRM-Standard festgelegten Profilgeschwindigkeiten: *Urban Vehicle* mit **60 km/h** und *Rural* mit **150 km/h**.

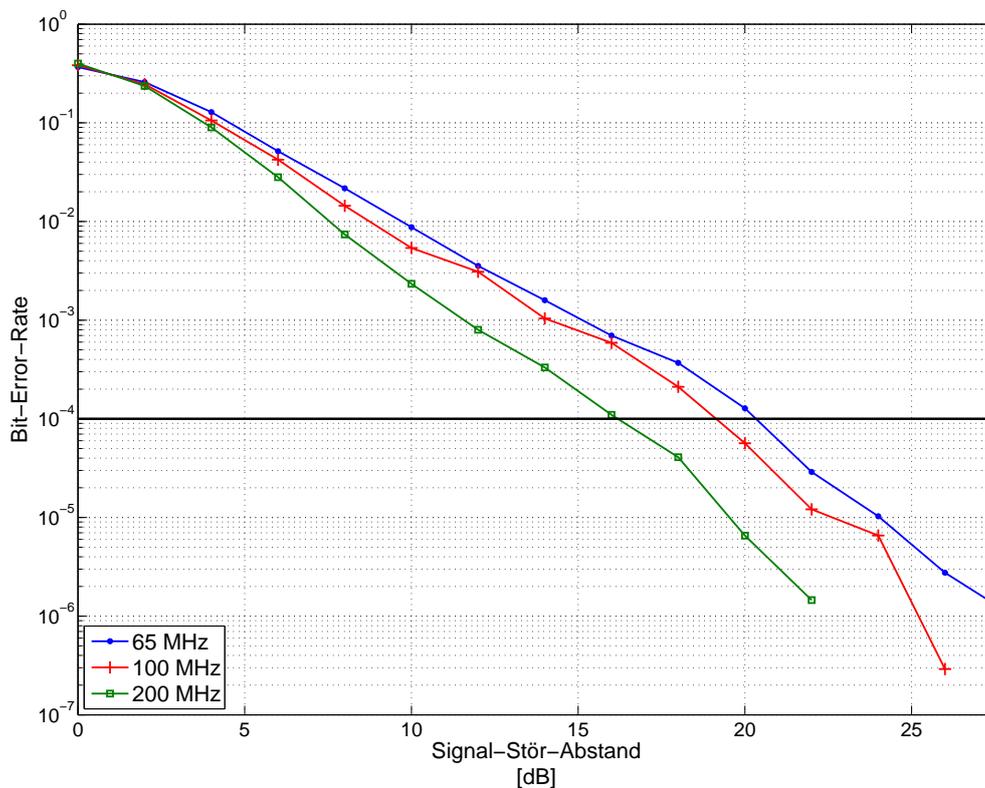


Abbildung 5.35.: 4-QAM Signal, SNR, Fading „Urban Vehicle“ im VHF-Band I, II und III

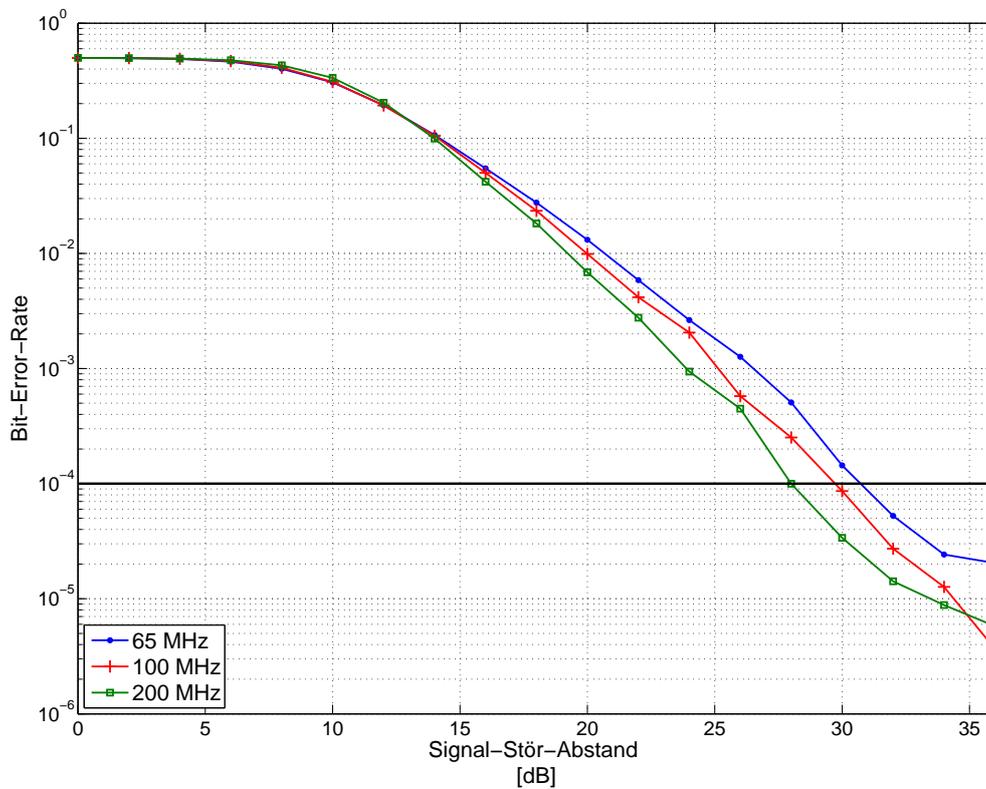


Abbildung 5.36.: 16-QAM Signal, SNR, Fading „Urban Vehicle“ im VHF-Band I, II und III

Tabelle 5.8.: Notwendige Signal-Stör-Abstände mit Fadingprofil „Urban Vehicle“

Urban Vehicle	VHF-Band I	VHF-Band II	VHF-Band III
<b>4-QAM</b>	20,33 dB	19,16 dB	16,19 dB
<b>16-QAM</b>	30,72 dB	29,71 dB	28,01 dB
<b>Vergleichswerte [39]</b>			
<b>4-QAM</b>	-	12,97 dB	12,50 dB
<b>16-QAM</b>	-	18,69 dB	18,84 dB

Die Messergebnisse zeigen eine deutliche Erhöhung des notwendigen Signal-Stör-Abstandes zum Erreichen des Messkriteriums im Vergleich zu den AWGN Messungen (Kap. 5.3.2). Dies ist durch das Fadingprofil bedingt und war zu erwarten. Es ergibt sich einen Mindestsignalstörabstand bei Verwendung des *Urban Vehicle*-Fadingprofils für ein 4-QAM Signal von mindestens 20 dB, für ein 16-QAM Signal ist sogar ein Signalstörabstand von 30 dB notwendig. Im Gegensatz zu den Vergleichswerten [39] zeigt sich, dass die Decodersoftware des Prototypen einen höheren SNR zum erfolgreichen Decodierung benötigt.

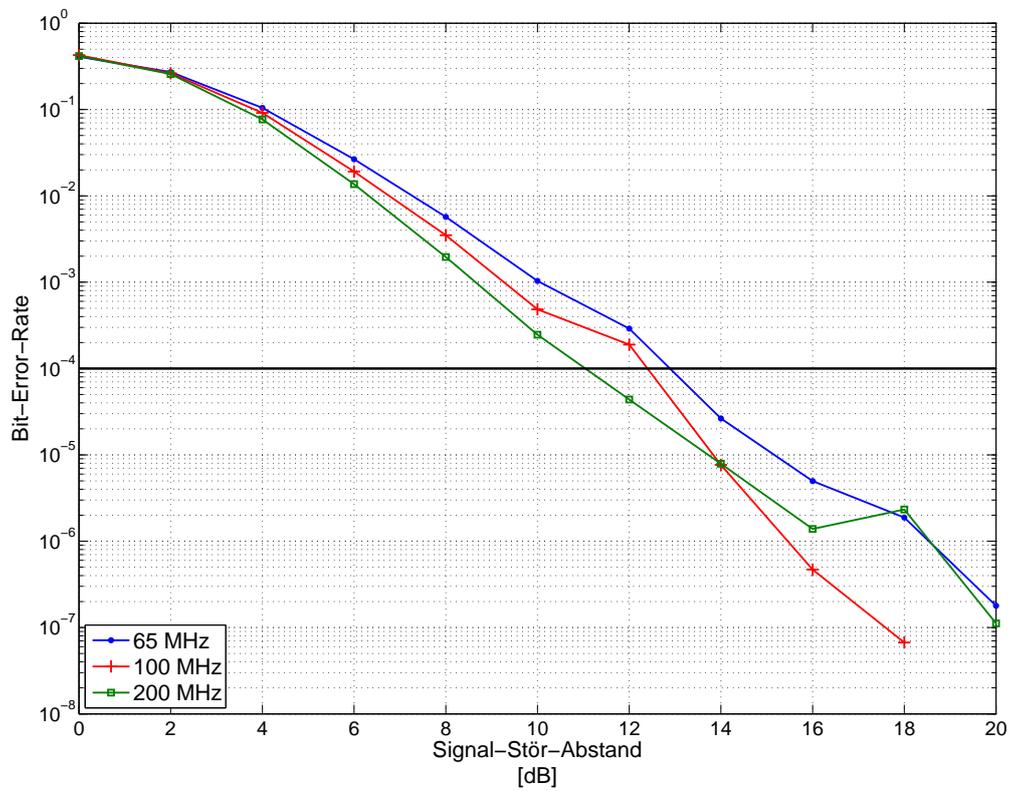


Abbildung 5.37.: 4-QAM Signal, SNR, Fading „Rural“ im VHF-Band I, II und III

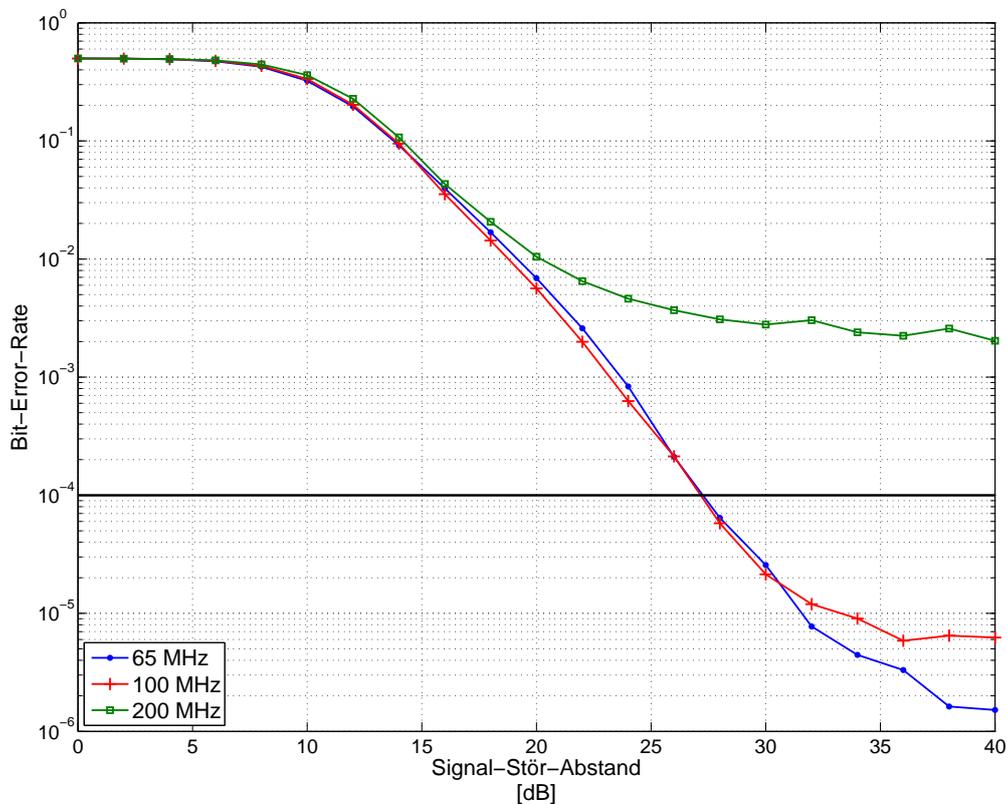


Abbildung 5.38.: 16-QAM Signal, SNR, Fading „Rural“ im VHF-Band I, II und III

Tabelle 5.9.: Notwendige Signal-Stör-Abstände mit Fadingprofil „Rural“

Rural	VHF-Band I	VHF-Band II	VHF-Band III
<b>4-QAM</b>	12,88 dB	12,40 dB	11,05 dB
<b>16-QAM</b>	27,26 dB	27,15 dB	> 40 dB
	<b>Vergleichswerte [39]</b>		
<b>4-QAM</b>	-	11,65 dB	14,86 dB
<b>16-QAM</b>	-	17,72 dB	> 40 dB

Die Tabelle 5.9 zeigt bei Verwendung des *Rural*-Fadingprofils und einem 4-QAM Signal einen Mindestsignalstörabstand von 12 dB. Das 16-QAM Signal konnte nur im VHF-Band I und II mit einem SNR von mindestens 27 dB decodiert werden, in Band III wurde auch bei Verwendung des größtmöglichen Messparameters von 40 dB SNR keine Bit-Fehler-Rate unter  $10^{-4}$  erreicht. Dieses Ergebnis stimmt mit den Vergleichswerten [39] überein. Die restlichen Messergebnisse weisen hier gewisse Differenzen auf, was jedoch auf die Qualität der Decodersoftware zurückzuführen ist.

### 5.3.4. Schutzabstand

Die Schutzabstandsmessung wird mit zwei 16-QAM DRM+ Signalen durchgeführt. Das Nutzsignal wird auf der Frequenz 200 MHz mit einer Sendeleistung von -39 dBm abgestrahlt, dies ergibt eine Empfängereingangsleistung von -51 dBm. Das Störsignal wird in 20 kHz-Schritten im Bereich von 2 MHz um das Nutzsignal überlagert. Die Leistung des Störsignals wird pro Frequenz in 1 dB Schritten so lange erhöht, bis der Decoder eine Bitfehlerrate (gemittelt je über 15 Sekunden) von  $10^{-4}$  erreicht. Die Differenz zwischen Nutz- und Störleistung ergibt so den Schutzabstand für diese bestimmte Frequenz. Abb. 5.39 zeigt die Messergebnisse bei Verwendung des Noxon USB-Treibers des Fraunhofer IIS. Messungen mit einem 4-QAM modulierten OFDM-Signal konnten auf Grund der fortgeschrittenen Dauer der Arbeit nicht mehr durchgeführt werden.

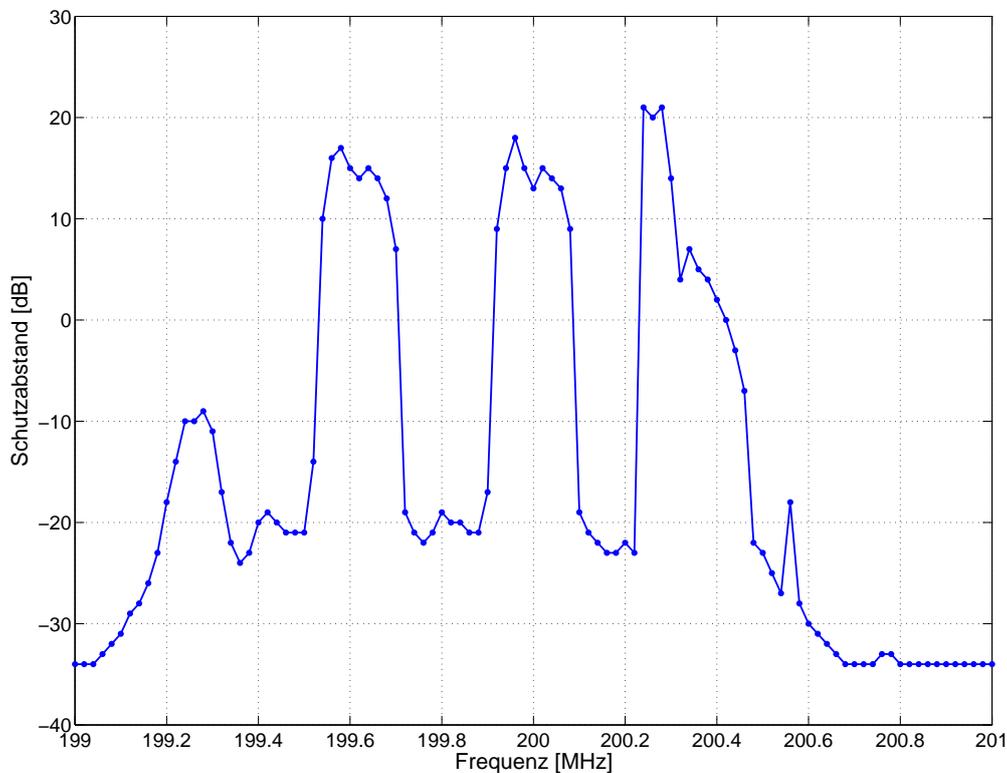


Abbildung 5.39.: Schutzabstandsbetrachtung 16-QAM Signal bei einem Noxon V1 im VHF-Band III mit den ursprünglichen Filterkoeffizienten

Tabelle 5.10.: Schutzabstände Noxon V1 bei originalen Filterkoeffizienten

Frequenz [MHz]	199,8	199,9	200,0	200,1	200,2
Schutzabstand [dB]	-19	-17	13	-19	-22

Man erkennt bei 200 MHz das eingestellte Empfangsband des Empfängers. Die Peaks im Bereich von 199,6 MHz und 200,3 MHz verdeutlichen jedoch, dass eine erfolgreiche Decodierung und somit auch ein Empfang nicht mehr möglich ist, sobald sich in diesem Bereich um die Nutzfrequenz ein Störsignal befindet. Das Problem liegt in der breiten Eingangsbandbreite des DAB-Sticks, siehe Kapitel 5.3.1.1. Durch Verschiebung des empfangenen Signals ins Basisband entstehen Spiegelfrequenzen, die durch das Eingangsfiler am Decodereingang geblockt werden müssen. Die voreingestellten Filterkoeffizienten scheinen nicht auf die DRM+ Empfangssituation abgestimmt zu sein, weshalb Veränderungen an den Filterkoeffizienten der Noxon Treiberdatei vorgenommen wurden. Die Länge des Eingangsfilters wurden von 9 auf 41 Koeffizienten erhöht (Anhang A.2.2). Abb. 5.40 zeigt die dazugehörigen Messergebnisse.

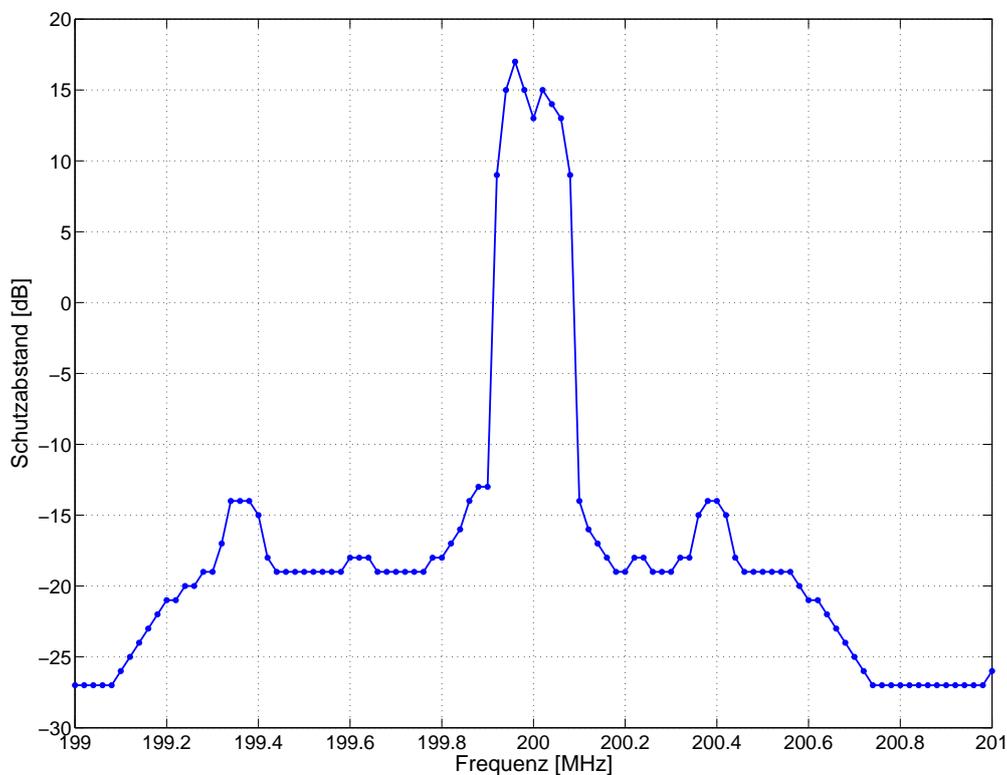


Abbildung 5.40.: Schutzabstandsbetrachtung 16-QAM Signal bei einem Noxon V1 im VHF-Band III mit geänderten Filterkoeffizienten

Tabelle 5.11.: Schutzabstände Noxon V1 bei geänderten Filterkoeffizienten

Frequenz [MHz]	199,8	199,9	200,0	200,1	200,2
Schutzabstand [dB]	-18	-13	13	-14	-19

Es zeigt sich, dass durch eine Anpassung der Filterkoeffizienten eine starke Verbesserung der Empfangssituation erreicht werden kann. Hier sind weitere Optimierungen möglich, da die verwendeten Koeffizienten aus Abb. 5.40 noch nicht perfekt an die Empfangssituation angepasst waren und nur zum Verdeutlichen der Auswirkungen einer Veränderung dienen sollen.

In einer weiteren Messreihe wurde der Messbereich auf insgesamt 8 MHz erweitert. Die Frequenzänderung des Störsignals erfolgt nun in 100 kHz Schritten. Die Messung wurde mit den Noxon USB Sticks in der Rev. 1 (Abb. 5.41) und 2 (Abb. 5.42) mit geänderten Filterkoeffizienten durchgeführt.

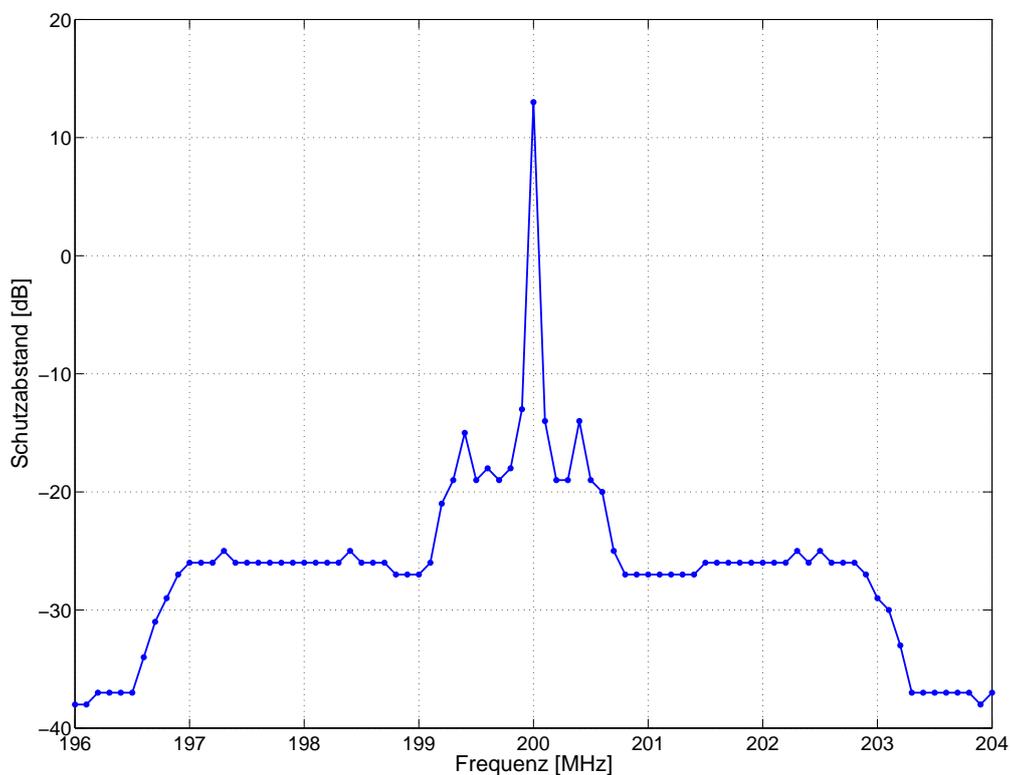


Abbildung 5.41.: Schutzabstandsbetrachtung 16-QAM Signal bei einem Noxon V1 im VHF-Band III im Bereich von 8 MHz mit geänderten Filterkoeffizienten

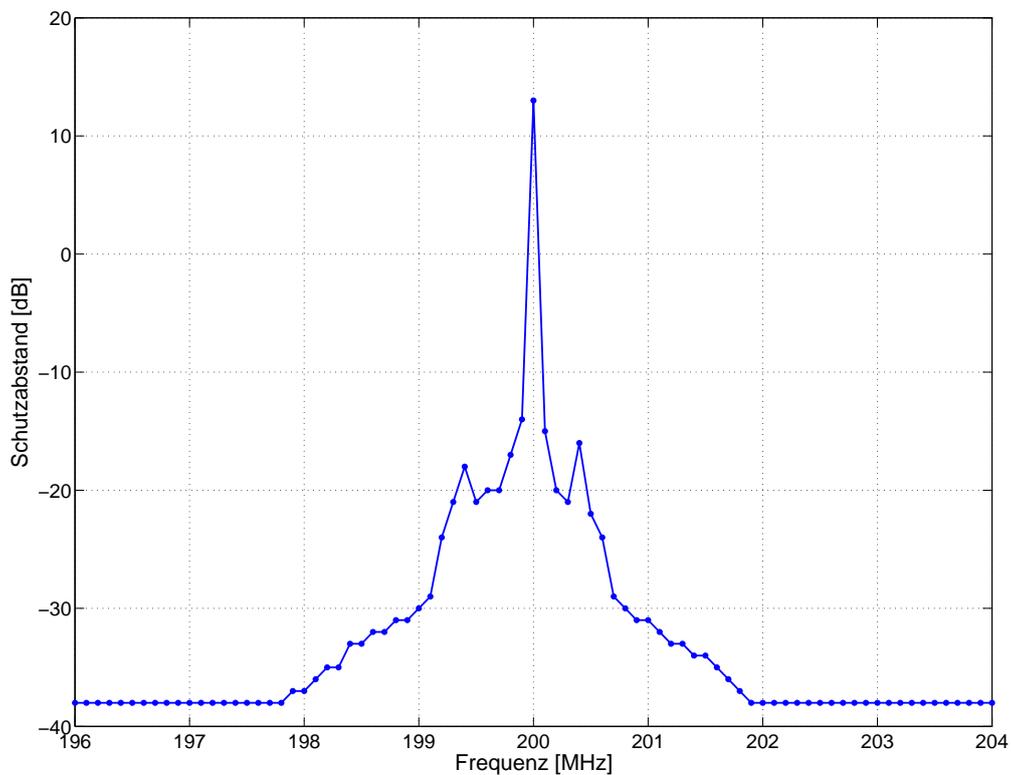


Abbildung 5.42.: Schutzabstandsbetrachtung 16-QAM Signal bei einem Noxon V2 im VHF-Band III im Bereich von 8 MHz mit geänderten Filterkoeffizienten

Tabelle 5.12.: Schutzabstände Noxon V1 und V2 bei geänderten Filterkoeffizienten

Frequenz [MHz]	199,8	199,9	200,0	200,1	200,2
Schutzabstand V1 [dB]	-18	-13	13	-14	-19
Schutzabstand V2 [dB]	-17	-14	13	-15	-20

Die Messungen zeigen, dass die Decodersoftware mit den geänderten Filterkoeffizienten nur im engen Bereich um den Nutzsender empfindlich für Störsignale ist. Der bessere Elonics Tuner im Noxon V2 zeigt nach der Filteroptimierung eine deutlich verbesserte Unempfindlichkeit außerhalb des Nutzsinalbereichs auf.

### 5.3.5. Vergleich der beiden DRM+ Decodervarianten

Um die Qualität der beiden DRM+ Decoder vergleichen zu können, wurden auch mit der Software *WaveSink* Messungen durchgeführt. Die Messmethodik entspricht den Messungen aus Kapitel 5.3.1 und 5.3.2. In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebniskurven der beiden Softwarevarianten bei gleichen Messbedingungen übereinander abgebildet. Aufgrund der fortgeschrittenen Dauer der Studienarbeit konnten die Messungen mit der *WaveSink*-

Decodersoftware jedoch nicht mehr mit derselben Messauflösung wie bei der Fraunhofer Decodersoftware durchgeführt werden. Daher sind gewissen Abweichungen zwischen den Messergebnissen zu erwarten.

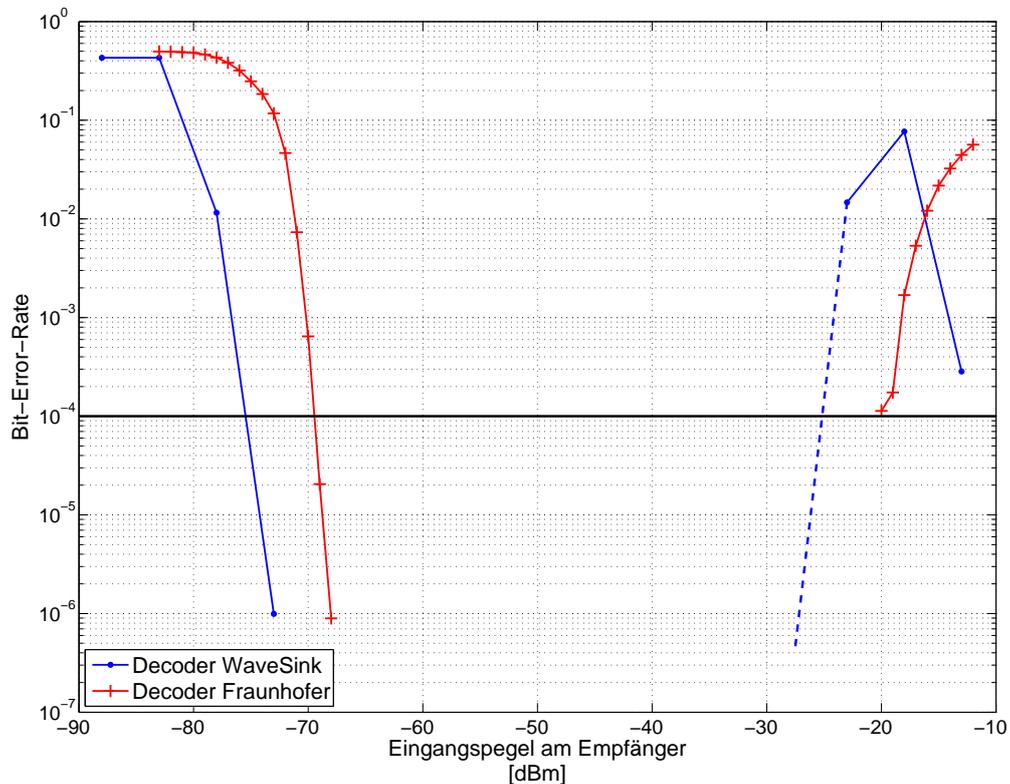


Abbildung 5.43.: Vergleich Eingangskennlinie DRM+ Decoder Fraunhofer & WaveSink, 16-QAM Signal

Die Empfindlichkeitskennlinie des WaveSink Decoders weist eine Linksverschiebung um 6 dB im Vergleich zur Decodersoftware des Fraunhofer IIS auf. Die Größe des Dynamikbereiches bleibt in etwa gleich. Nach dem Messpunkt bei -23 dBm gab der *WaveSink* Decoder eine Bit-Fehler-Rate von 0 aus, die Grafik konnte daher von Matlab nicht vollständig gezeichnet werden und der Verlauf wurde mit der gestrichelten Linie angedeutet.

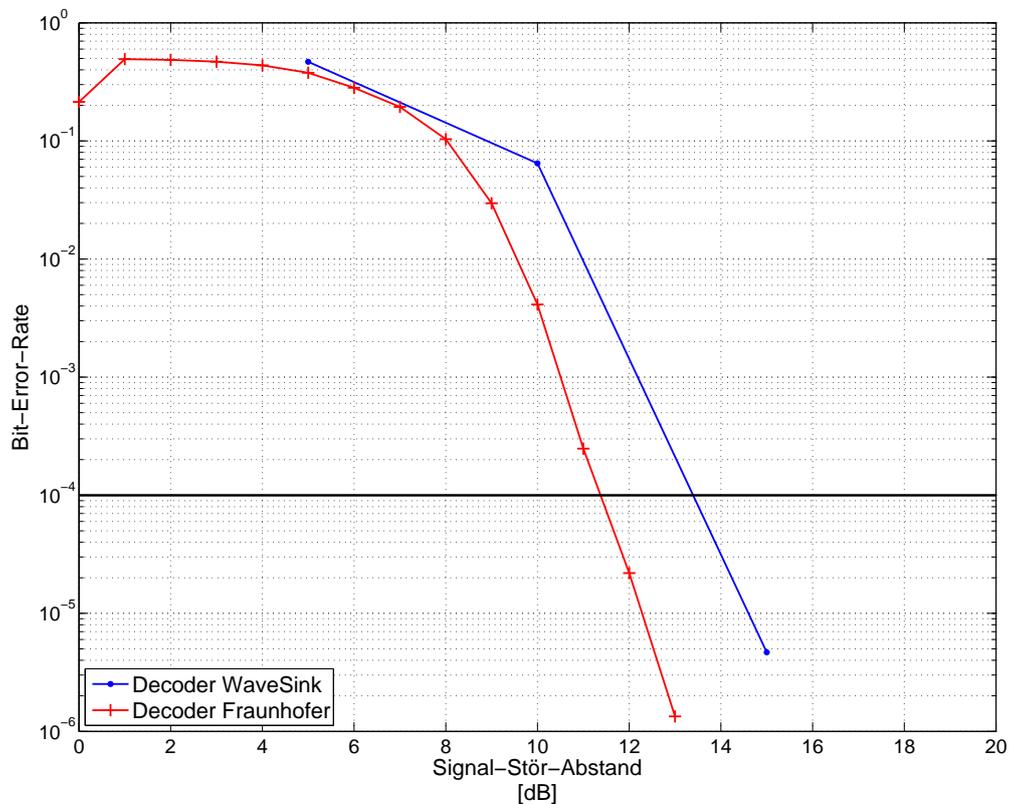


Abbildung 5.44.: Vergleich SNR DRM+ Decoder Fraunhofer & WaveSink, 16-QAM Signal

Der Vergleich der Signal-Stör-Abstands-Werte bei Übertragung eines 16-QAM Signals über einen AWGN Kanal zeigt, dass die Decodersoftware *WaveSink* mit 13,40 dB einen um 2 dB größeren Signal-Stör-Abstand zum erfolgreichen Decodieren benötigt als die Decodersoftware des Fraunhofer IIS mit 11,38 dB.

In einer weiteren Messung wurde das Verhalten der Decodersoftware bei einem Fadingprofil untersucht. Als Fadingprofil wurde „Rural“ gewählt, die Mittelungszeit pro Messpunkt lag bei 30 Minuten. Die Eingangsleistung am Empfängereingang betrug -38 dBm.

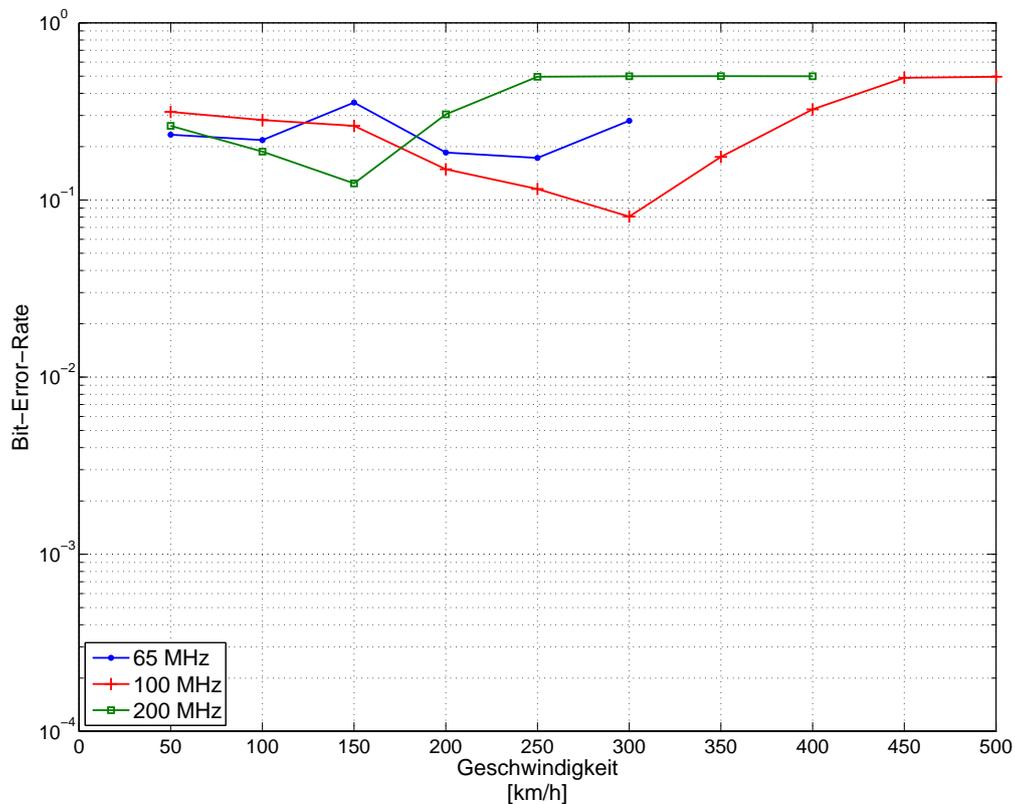


Abbildung 5.45.: 16-QAM Signal, Fading „Rural“ im VHF-Band I, II und III, WaveSink DRM+ Decoder

Die Fadingmessungen zeigten Probleme der Software in Bezug auf die Kanalschätzung auf. Diese war über lange Zeiten stabil, brach dann jedoch auf unbestimmte Dauer zusammen. Bis zur erneuten Stabilisierung wurden entsprechend viele hohe Bit-Fehler-Raten gemessen, so dass mit dieser Software im verfügbaren Entwicklungsstadium in keinem der drei Bänder der Empfang bei Geschwindigkeiten größer als ca. 25 km/h möglich war.

## 5.4. DAB+ Empfang

Die Status-Ampel-Anzeige des „Noxon DAB MediaPlayer“ beim Empfang von DAB+ wurde durch Veränderung der Eingangsleistung am Noxon USB-Stick und durch Veränderung des Signal-Stör-Abstands untersucht (Tabelle 5.13).

Tabelle 5.13.: Messergebnisse DAB+

	<b>Symbol grün</b>	<b>Symbol gelb</b>	<b>Symbol rot</b>	<b>Audioausfall</b>
<b>Leistung</b>	$\geq -99 \text{ dBm}$	$-99,1 \text{ dBm}$ bis $-103,6 \text{ dBm}$	$< -103,6 \text{ dBm}$	$< -104,5 \text{ dBm}$
<b>SNR</b>	$\geq 18,5 \text{ dB}$	$18,5 \text{ dB}$ bis $14,1 \text{ dB}$	$< 14,1 \text{ dB}$	$< 13,2 \text{ dB}$

Die Messung hat ergeben, dass selbst bei einer starken Übersteuerung des Sticks mit einem Eingangspegel von +10 dBm kein Audioausfall eingetreten ist. Dies lässt auf eine sehr robuste und effiziente Funktionsweise der AGC beim Empfang von DAB+ schließen. Bis zu einer Eingangsleistung von -99 dBm signalisierte die Status-Anzeige mit der Farbe grün einen guten Signalempfang, was einem Dynamikbereich von bis zu 109 dB entspricht. Die Farbe Gelb signalisierte einen Eingangspegel zwischen -99,1 dBm und -103,6 dBm. Selbst bei einem Eingangspegel kleiner als -103,6 dBm (Farbe rot) war noch kein Audioausfall zu vernehmen. Dieser setzt erst ab einem Pegel kleiner -104,5 dBm ein.

Die Signal-Stör-Abstand Messung wurde bei einer konstanten Eingangsleistung von -35 dBm durchgeführt. Hier zeigt sich, dass der Audioausfall erst bei einem Signal-Stör-Abstand kleiner als 13,2 dB eintritt. Dies entspricht annähernd dem theoretischen Wert von 10 dB beim Empfang mit AWGN-Kanal.



## 6. Präsentation des Empfängerprototypen

Im Rahmen des Treffen des deutschen DRM Forum [4] an der TU Kaiserslautern am 06.11.2012 wurde der Empfängerprototyp vorgestellt.

Der Sendeaufbau für die Präsentation wurde nach Kap. 5.1.1.2 realisiert. Zur Demonstration der verfügbaren Dienste wurde im DRM+ Contentserver ein 16-QAM modulierter Multiplexdatenstrom erzeugt, der zwei Programme enthält. Programm 1 wurde mit den Musikdaten einer MP3-Playlist versorgt, zusätzlich wurden über eine Slideshow einzelne Bilddateien übertragen. Die Bitrate des AAC codierten Audiosignals betrug 66,96 kbit/s. In Programm 2 wurde, über eine am Contentserver angeschlossene Soundkarte, das aktuelle Radioprogramm von *SWR 3* eingespeist und mit einer Bitrate von 26,88 kbit/s (AAC) in den Multiplex geladen. Als Datendienst wurden durch *Journaline* die aktuellen News von *heise online* bereit gestellt.

Für den Empfang wurde auf dem Empfänger eine Linuxversion des Fraunhofer Multimedia Players mit DRM+ Decoder installiert. Der Antenneneingang des Kofferradios wurde über ein BNC Kabel mit dem Ausgang des HF-Modulators verbunden und das DRM+ Signal auf einer Sendefrequenz von 200 MHz eingespeist. Die Präsentation hat gezeigt, dass der Empfang und die Wiedergabe aller in den Contentserver eingespeisten Daten mit dem Kofferradio fehlerfrei möglich ist.

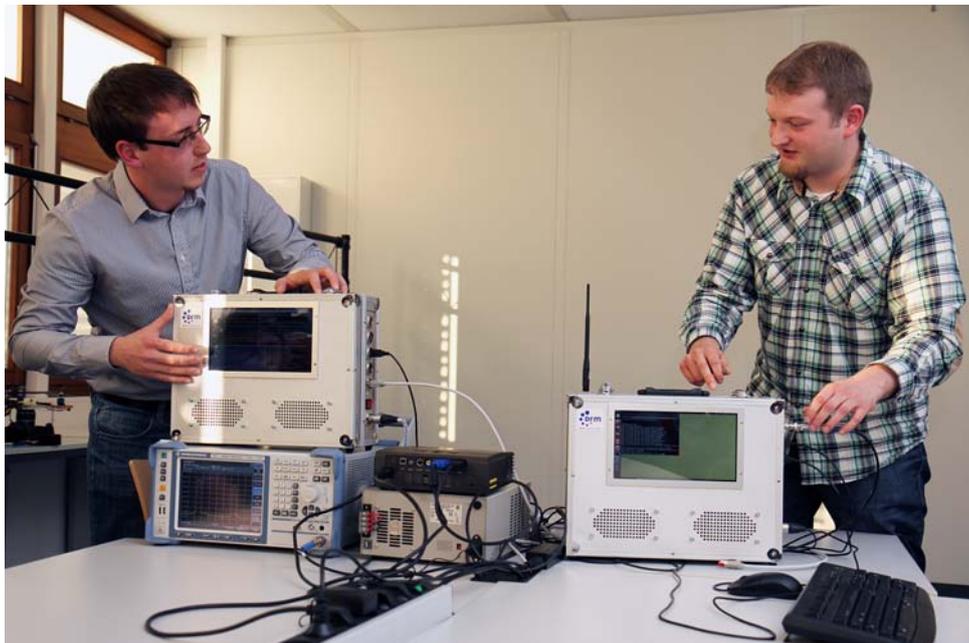


Abbildung 6.1.: Präsentation des Kofferradio-Prototyps



## 7. Fazit

Die Studienarbeit liefert folgende Ergebnisse:

Der Empfängerprototyp kann zum Empfang von DRM+ mit dem Noxon DAB USB-Stick als Frontend genutzt werden, jedoch mit Einschränkungen betreffend der Empfangssituation und den Störeinwirkungen. Dieses Frontend ist nicht speziell für DRM+, sondern für DAB konzipiert worden. Die Messungen wurden alle unter Laborbedingungen durchgeführt. Das System war gegen Fremdeinstrahlung abgeschirmt, so dass nur das Verhalten des Noxon USB-Sticks beim Empfang eines bestimmten gewünschten Signals untersucht werden konnte. Wie die Schutzabstandsmessung gezeigt hat, ist für die Verwendung des Empfängerprototypen als DRM+ Empfänger eine Optimierung der Filterfunktionen in der Decodersoftware sowie in der Treiberansteuerung des Frontends notwendig.

Die Integration der Hardware in den Koffer verlief problemlos, und auch das Handling der mobilen Computerplattform war einfach und intuitiv. Das Kofferradio stellt aber kein anwendertaugliches Produkt dar. Viel mehr ist es eine ideale Entwicklungsplattform für weitere Untersuchungen oder Projekte. Die Vorteile des Koffers sind unter anderem die Möglichkeit des schnellen Zugriffs auf die verbaute Hardware durch einfaches Öffnen der beiden Kofferschnallen. Auch auf der Softwareseite müssen keine großen Mühen unternommen werden um das Kofferradio mit einem anderen Betriebssystem zu booten. Durch das Austauschen der verbauten SD-Speicherkarte stehen beliebige Betriebssystemversionen zur Verfügung. Der Koffer eignet sich ideal für Präsentationen oder Vorführungen von ersten Software/Hardwareentwicklungen im Beta-Stadium.

Die verwendete DRM+ Decodersoftware des Fraunhofer IIS arbeitete während den kompletten Messungen sehr stabil und ohne Ausfälle. Das Kofferradio lief im Messbetrieb über 1000 Stunden ohne Ausfälle. Dies zeigt die Robustheit des Empfängers. Die getestete Decodersoftware von Michael Feilen wies noch Probleme mit der Kanalschätzung und somit der Synchronität auf. Die Software befindet sich jedoch noch im Entwicklungsstadium und an der Lösung des Problems wird gearbeitet.

Die Maximalzielsetzung eines funktionsfähigen Multinorm-Empfängers konnte nicht vollständig realisiert werden. Die Details der Implementierung, angefangen von der Decodersoftware bis hin zur verwendeten Antenne, erwies sich als so komplex, dass eine komplette Realisierung im vorgegebenen Zeitrahmen nicht möglich war. Erste Schritte sind mit diesem Projekt und dem Empfang von DRM+ getan. Weitere Entwürfe von Decodervarianten für die restlichen Hörfunksysteme sind in der Entwicklung, und mit der geschaffenen Plattform kann dieser Entwicklungsprozess beschleunigt werden.



# A. Anhang

## A.1. Dämpfungsverluste

### A.1.1. PAD-Glied

Tabelle A.1.: Dämpfungseigenschaften PAD BMP-5075

<b>PAD BMP-5075</b>	
<b>Frequenz [MHz]</b>	<b>Dämpfung [dB]</b>
10	5,71
20	5,72
60	5,72
100	5,72
110	5,73
555	5,75
1000	5,78
1010	5,77
1505	5,75
2000	5,7

### A.1.2. BNC-Kabel

Tabelle A.2.: Dämpfungseigenschaften BNC Kabel

<b>Kabeldämpfungen</b>		
<b>Bez.</b>	<b>Dämpfung [dB]</b>	<b>Länge [m]</b>
W1	0,91	4,50
W2	0,19	1,09
W3	0,19	1,00
W4	0,16	0,60
W5	0,17	0,72
W6	0,88	4,50
W7	0,10	0,56
W8	0,14	1,06
W9	0,16	1,04
W10	0,16	1,52
W11	0,41	2,30
W12	0,21	1,44
W13	0,38	1,88

## A.2. Empfängermessungen

### A.2.1. Vergleich zweier Messmethoden

Zum Erfassen der Eingangskennlinie stehen zwei Messmethoden zur Auswahl. Es kann entweder die Sendeleistung konstant bleiben und der Eingangspegel am Empfänger über Veränderung der Dämpfung auf dem Sendeweg verändert werden, oder die Dämpfung bleibt konstant und es wird die Sendeleistung verändert. Bei der HF Modulation können bei Veränderung der Sendeleistung nichtlineare Effekte auftreten. Aus diesem Grund wurde eine Vergleichsmessung (Abb. A.1) durchgeführt. Es zeigt sich, dass beide Messmethoden nahezu identische Ergebnisse liefern. Durch die Möglichkeit der Automatisierung der Messmethode bei Veränderung der Sendeleistung, wurde diese Methode gewählt.

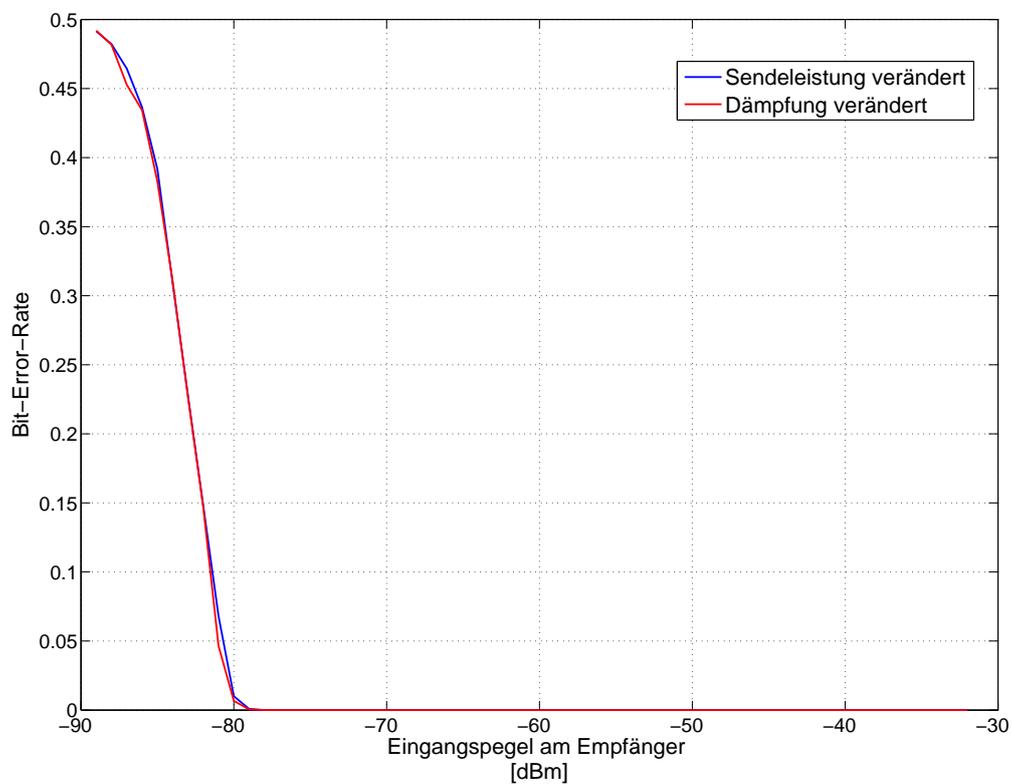


Abbildung A.1.: Eingangskennlinie bei Veränderung der Sendeleistung oder der Dämpfung

**A.2.2. Filterkoeffizienten**

Die originalen Filterkoeffizienten der Noxon Treiberdatei lauten:

Tabelle A.3.: Filterkoeffizienten original

0,01390414	-0,03451993	-0,05204535	0,28394743	0,57563087
0,28394743	-0,05204535	-0,03451993	0,01390414	

Die geänderten Filterkoeffizienten lauten:

Tabelle A.4.: Filterkoeffizienten geändert

0,0002	0,0055	0,0088	0,007	-0,0002	-0,0096	-0,0153
-0,0123	0,0001	0,0162	0,0262	0,0213	-0,0001	-0,0294
-0,0496	-0,0429	0,0001	0,0738	0,158	0,2246	0,2499
0,2246	0,158	0,0738	0,0001	-0,0429	-0,0496	-0,0294
-0,0001	0,0213	0,0262	0,0162	0,0001	-0,0123	-0,0153
-0,0096	-0,0002	0,007	0,0088	0,0055	0,0002	

### A.3. Angepasste Boot-Datei für das Ubuntu-Betriebssystem

Listing A.1: uEnv.txt des Ubuntu-Systemimages

```
1 vram=40MB
2 defaultdisplay=dvi
3 dvmode=1024x600MR-16@60
4 bootfile=zImage
5 bootinitrd=initrd.img
6 boot=bootz
7 address_image=0x80300000
8 address_initrd=0x81600000
9 console=ttyO2,115200n8
10 mmcroot=/dev/mmcblk0p2 ro
11 mmcrootfstype=ext4 rootwait fixrtc
12 xyz_load_image=fatload mmc 0:1 ${address_image} ${bootfile}
13 xyz_load_initrd=fatload mmc 0:1 ${address_initrd} ${bootinitrd}
14 xyz_mmcboot=run xyz_load_image; run xyz_load_initrd; echo Booting
    from mmc ...
15 mmcargs=setenv bootargs console=${console} ${optargs} vram=${vram}
    omapfb.mode=${defaultdisplay}:${dvmode} video=${defaultdisplay}
   }:${dvmode} omapfb.debug=y omapdss.debug=y omapdss.def_disp=${
    defaultdisplay} root=${mmcroot} rootfstype=${mmcrootfstype} ${
    device_args}
16 optargs=console=tty0
17 deviceargs=setenv device_args
18 loaduimage=run xyz_mmcboot; run deviceargs; run mmcargs; ${boot} ${
    address_image} ${address_initrd}:${filesize}
```

# Abbildungsverzeichnis

1.1.	Elemente eines digitalen Übertragungssystems . . . . .	2
1.2.	QAM-Modulator . . . . .	3
1.3.	Konstellationsdiagramm 16-QAM . . . . .	3
1.4.	Fourier-Spektrum des OFDM-Signals . . . . .	4
1.5.	zyklischer Präfix zur Aufhebung von ISI und ICI [3] . . . . .	5
1.6.	OFDM-Modulator . . . . .	5
1.7.	Erzeugung DRM-Sendesignal [5] . . . . .	6
1.8.	Empfängeraufbau . . . . .	9
1.9.	Funktioneller Aufbau des Empfängers . . . . .	11
1.10.	Empfangskette DRM+ . . . . .	11
1.11.	Terratec Noxon DAB-Stick . . . . .	12
1.12.	Ettus Research USRP 1 + LFRX und WBX - Board . . . . .	12
1.13.	Microtelecom Perseus SDR Empfänger . . . . .	13
1.14.	Blockschaltbild <i>pandaboard ES</i> [17] . . . . .	14
1.15.	Blockschaltbild "Idealer Empfängeraufbau" . . . . .	16
1.16.	Blockschaltbild "Realer Empfängeraufbau" . . . . .	19
2.1.	Empfänger-Prototyp . . . . .	23
2.2.	Leerer Aluminiumkoffer: Frontansicht . . . . .	24
2.3.	Leerer Aluminiumkoffer: Seitenansicht . . . . .	24
2.4.	unbestückte Anschlussplatte . . . . .	25
2.5.	bestückte Anschlussplatte . . . . .	25
2.6.	<i>pandaboard ES</i> mit Kühlkörper auf der CPU . . . . .	26
2.7.	überbrückter Widerstand R85 [30] . . . . .	26
2.8.	Buchsenleisten . . . . .	26
2.9.	LCD-Touchscreen . . . . .	27
2.10.	LCD-Platine mit eingebautem Widerstand . . . . .	27
2.11.	Audioverstärker . . . . .	28
2.12.	NOXON Stick . . . . .	28
2.13.	Spannungswandler ohne Gehäuse . . . . .	28
2.14.	Li-Polymer Akku . . . . .	28
2.15.	Versorgungsspannungsumschaltung und Unterspannungsüberwachung . . . . .	29
2.16.	Der Kofferdeckel des Empfängers . . . . .	30
2.17.	Der Kofferboden des Empfängers . . . . .	31
3.1.	Prinzipieller Messaufbau . . . . .	35
4.1.	Labora Aufbau . . . . .	39
4.2.	Fraunhofer DRM Contentserver Statusmonitor . . . . .	40
4.3.	Fraunhofer DRM Contentserver Weboberfläche . . . . .	40

4.4. Fraunhofer Contentserver in der Sendekette . . . . .	41
4.5. Spark Contentserver Graphische Oberfläche . . . . .	41
4.6. Spark Contentserver in der Sendekette . . . . .	42
4.7. Fraunhofer IIS Basisbandmodulator 0.91 . . . . .	42
4.8. Spark Einstellungen für das Sendesignal . . . . .	43
4.9. Spark Anzeige Ausgabesignal . . . . .	43
4.10. Rohde & Schwarz SMU 200A . . . . .	43
4.11. R&S SMU 200A in der Sendekette . . . . .	44
4.12. Ettus Research USRP B100 . . . . .	44
4.13. USRP B100 in der Sendekette . . . . .	45
4.14. Senderkombination 1 . . . . .	45
4.15. Senderkombination 2 . . . . .	46
4.16. Senderkombination 3 . . . . .	46
4.17. Fraunhofer DAB Contentserver Statusmonitor . . . . .	47
4.18. Fraunhofer DAB Contentserver Weboberfläche . . . . .	47
4.19. R&S DAB Testsender . . . . .	47
4.20. DAB+ Sendekette . . . . .	48
4.21. Das Kofferradio . . . . .	48
4.22. RtIo-Tool zum Anzeigen des Empfängerstatus . . . . .	49
4.23. DRM+ Empfang mit dem Kofferradio . . . . .	50
4.24. DRM+ Decoder WaveSink 0.2 . . . . .	50
4.25. Noxon DAB MediaPlayer . . . . .	51
4.26. Dämpfungsglieder . . . . .	52
4.27. Splitter/Combiner . . . . .	52
4.28. PAD BMP-5075 . . . . .	52
4.29. Messaufbau DRM+ für Senderkombination 1 & 2 . . . . .	53
4.30. Messaufbau DRM+ für Senderkombination 3 . . . . .	53
4.31. Messaufbau DAB+ . . . . .	54
5.1. 4-QAM Sendesignal S-S-R, bei eingestellter Sendeleistung von -25 dBm . . . . .	55
5.2. 4-QAM Sendesignal S-S-R, Crest-Faktor . . . . .	56
5.3. 4-QAM Sendesignal S-S-R mit überlagerter Spektrumsmaske . . . . .	57
5.4. 16-QAM Sendesignal S-S-R, bei eingestellter Sendeleistung von -25 dBm . . . . .	57
5.5. 16-QAM Sendesignal S-S-R, Crest-Faktor . . . . .	58
5.6. 16-QAM Sendesignal S-S-R mit überlagerter Spektrumsmaske . . . . .	58
5.7. 4-QAM Sendesignal F-S-R, bei eingestellter Sendeleistung von -25 dBm . . . . .	59
5.8. 4-QAM Sendesignal F-S-R, Crest-Faktor . . . . .	59
5.9. 4-QAM Sendesignal F-S-R mit überlagerter Spektrumsmaske . . . . .	60
5.10. 16-QAM Sendesignal F-S-R, bei eingestellter Sendeleistung von -25 dBm . . . . .	60
5.11. 16-QAM Sendesignal F-S-R, Crest-Faktor . . . . .	61
5.12. 16-QAM Sendesignal F-S-R mit überlagerter Spektrumsmaske . . . . .	61
5.13. 4-QAM Sendesignal F-F-U, bei eingestellter Sendeleistung von -25 dBm . . . . .	62
5.14. 4-QAM Sendesignal F-F-U, Crest-Faktor . . . . .	62
5.15. 4-QAM Sendesignal F-F-U mit überlagerter Spektrumsmaske . . . . .	63
5.16. 16-QAM Sendesignal F-F-U, bei eingestellter Sendeleistung von -25 dBm . . . . .	63
5.17. 16-QAM Sendesignal F-F-U, Crest-Faktor . . . . .	64
5.18. 16-QAM Sendesignal F-F-U mit überlagerter Spektrumsmaske . . . . .	64

---

5.19. DAB+ Signal im Kanal 5A - 174,928 MHz . . . . .	66
5.20. Crest-Faktor DAB+ Signal . . . . .	66
5.21. Messaufbau Rauschzahlbestimmung . . . . .	67
5.22. Ausgabe Noxon Stick bei Abschluss mit 50 $\Omega$ Widerstand . . . . .	68
5.23. 4-QAM Signal, Eingangskennlinie Noxon V1 im VHF-Band I, II und III . . . . .	69
5.24. 16-QAM Signal, Eingangskennlinie Noxon V1 im VHF-Band I, II und III . . . . .	70
5.25. 4-QAM Signal, Eingangskennlinie Noxon V2 im VHF-Band I, II und III . . . . .	74
5.26. 16-QAM Signal, Eingangskennlinie Noxon V2 im VHF-Band I, II und III . . . . .	75
5.27. Vergleich 4-QAM & 16-QAM Sendesignal im VHF-Band III, Noxon V1 . . . . .	76
5.28. 16-QAM Signal, Vergleich Sender Spark und Sender Fraunhofer . . . . .	77
5.29. 4-QAM Signal, Verlauf Signal-Stör-Abstand im VHF-Band I, II und III . . . . .	78
5.30. 16-QAM Signal, Verlauf Signal-Stör-Abstand im VHF-Band I, II und III . . . . .	79
5.31. Geschwindigkeitsmessung 4-QAM Signal, Fading „Urban Vehicle“ im VHF-Band I, II und III . . . . .	80
5.32. Geschwindigkeitsmessung 16-QAM Signal, Fading „Urban Vehicle“ im VHF-Band I, II und III . . . . .	81
5.33. Geschwindigkeitsmessung 4-QAM Signal, Fading „Rural“ im VHF-Band I, II und III . . . . .	82
5.34. Geschwindigkeitsmessung 16-QAM Signal, Fading „Rural“ im VHF-Band I, II und III . . . . .	83
5.35. 4-QAM Signal, SNR, Fading „Urban Vehicle“ im VHF-Band I, II und III . . . . .	84
5.36. 16-QAM Signal, SNR, Fading „Urban Vehicle“ im VHF-Band I, II und III . . . . .	85
5.37. 4-QAM Signal, SNR, Fading „Rural“ im VHF-Band I, II und III . . . . .	86
5.38. 16-QAM Signal, SNR, Fading „Rural“ im VHF-Band I, II und III . . . . .	87
5.39. Schutzabstandsbetrachtung 16-QAM Signal bei einem Noxon V1 im VHF-Band III mit den ursprünglichen Filterkoeffizienten . . . . .	88
5.40. Schutzabstandsbetrachtung 16-QAM Signal bei einem Noxon V1 im VHF-Band III mit geänderten Filterkoeffizienten . . . . .	89
5.41. Schutzabstandsbetrachtung 16-QAM Signal bei einem Noxon V1 im VHF-Band III im Bereich von 8 MHz mit geänderten Filterkoeffizienten . . . . .	90
5.42. Schutzabstandsbetrachtung 16-QAM Signal bei einem Noxon V2 im VHF-Band III im Bereich von 8 MHz mit geänderten Filterkoeffizienten . . . . .	91
5.43. Vergleich Eingangskennlinie DRM+ Decoder Fraunhofer & WaveSink, 16-QAM Signal . . . . .	92
5.44. Vergleich SNR DRM+ Decoder Fraunhofer & WaveSink, 16-QAM Signal . . . . .	93
5.45. 16-QAM Signal, Fading „Rural“ im VHF-Band I, II und III, WaveSink DRM+ Decoder . . . . .	94
6.1. Präsentation des Kofferradio-Prototyps . . . . .	97
A.1. Eingangskennlinie bei Veränderung der Sendeleistung oder der Dämpfung . . . . .	102



# Quellenverzeichnis

- [1] Roppel, Carsten: Grundlagen der digitalen Kommunikationstechnik, 2006, Carl Hanser Verlag
- [2] Meyer, Martin: Kommunikationstechnik: Konzepte der modernen Nachrichtenübertragung, 1999, Vieweg
- [3] Lerntutorial LNTwww , Modulationsverfahren - Vielfachzugriffsverfahren  
[http://www.lntwww.de/downloads/Modulationsverfahren/Theorie/Kapitel5/Mod\\_Kap5.6.pdf](http://www.lntwww.de/downloads/Modulationsverfahren/Theorie/Kapitel5/Mod_Kap5.6.pdf)
- [4] Website des Deutschen DRM-Forum  
<http://www.deutsches-drm-forum.de>
- [5] Lehnert, Joachim: Vorlesungsunterlagen „Digitaler Rundfunk“, TU KL, SS 2011
- [6] ETSI-Norm ES 201980, DRM System Specification, V3.2.1 (2012-06)  
[http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_es/201900\\_201999/201980/03.02.01\\_60/es\\_201980v030201p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_es/201900_201999/201980/03.02.01_60/es_201980v030201p.pdf)
- [7] ETSI-Norm EN 300401, DAB Standart, V1.4.1 (2006-01)  
[http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/300400\\_300499/300401/01.04.01\\_40/en\\_300401v010401o.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300400_300499/300401/01.04.01_40/en_300401v010401o.pdf)
- [8] Digital Radio Receiver Profiles des World DMB Forums  
[http://www.worlddab.org/public\\_document/file/113/World\\_DMB\\_Receiver\\_Profiles\\_Final\\_charset\\_\\_2\\_.pdf](http://www.worlddab.org/public_document/file/113/World_DMB_Receiver_Profiles_Final_charset__2_.pdf)
- [9] Digital Radio Receiver Profiles des DRM Consortiums  
[http://www.drm.org/uploads/files/drm\\_receiver\\_profiles.pdf](http://www.drm.org/uploads/files/drm_receiver_profiles.pdf)
- [10] Minimum Receiver Requirements des DRM Consortiums  
[http://www.drm.org/uploads/files/DRM\\_Minimum\\_Requirements.pdf](http://www.drm.org/uploads/files/DRM_Minimum_Requirements.pdf)
- [11] Feilen, Michael: DRM+ Contentserver/Modulator Spark, TU München  
<http://www.drm-sender.de>
- [12] Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) Erlangen  
<http://www.iis.fraunhofer.de>
- [13] Prof. Dr.-Ing. Andreas Steil, FH Kaiserslautern  
<http://www.fh-kl.de/~andreas.steil/>
- [14] Terratec Noxon DAB-Stick  
[http://www.terratec.net/de/produkte/NOXON\\_DAB\\_Stick\\_150604.html](http://www.terratec.net/de/produkte/NOXON_DAB_Stick_150604.html)

- [15] Ettus Research USRP 1  
<https://www.ettus.com/product/details/USRP-PKG>
- [16] Microtelecom Perseus  
<http://microtelecom.it/perseus/>
- [17] *pandaboard ES*  
<http://www.pandaboard.org>
- [18] Chumby 8  
<http://www.chumby.com>
- [19] *pandaboard ES* Touchpanel: Chipsee - Pandaboard Expansion  
<http://www.tigal.at/product/2543>
- [20] LVDS Adapter V2 + 10" LCD mit Touchscreen  
<http://www.watterott.com/de/LVDS-Adapter-V2-inkl-10-LCD-Touchscreen>
- [21] Fraunhofer IIS Software Radio (DRM30 Decodersoftware)  
<http://www.iis.fraunhofer.de/bf/db/pd/drm/swr.jsp>
- [22] DREAM DRM Receiver  
[http://sourceforge.net/apps/mediawiki/drm/index.php?title=Main\\_Page](http://sourceforge.net/apps/mediawiki/drm/index.php?title=Main_Page)
- [23] GNU Radio Main Page  
<http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki>
- [24] Shoutcast Free Radio Stations  
<http://www.shoutcast.com>
- [25] Icecast  
<http://www.icecast.org>
- [26] CELT Audio Codec  
<http://www.celt-codec.org>
- [27] Presseinformation Fraunhofer-IIS über Diveemo  
[http://www.iis.fraunhofer.de/Images/PM\\_Audio\\_IBC\\_Diveemo\\_tcm182-65869.pdf](http://www.iis.fraunhofer.de/Images/PM_Audio_IBC_Diveemo_tcm182-65869.pdf)
- [28] Realtek RTL2832U Chip Features  
<http://www.realtek.com.tw/products/productsView.aspx?Langid=1&PFid=35&Level=4&Conn=3&ProdID=257>
- [29] ETSI Norm TS 102820, Multiplex Distribution Interface, V1.2.1  
[http://www.drm.org/uploads/files/spec\\_24.pdf](http://www.drm.org/uploads/files/spec_24.pdf)
- [30] Chalkboard Electronics Modifikationshinweise *pandaboard ES*  
<http://www.chalk-elec.com/?p=1515>
- [31] Fraunhofer IIS DAB Multimedia Player  
<http://www.iis.fraunhofer.de/de/bf/amm/produkte/digirundfunk/digirundf/dabdrmmplayer.html>

- [32] Fraunhofer IIS DRM ContentServer  
<http://www.iis.fraunhofer.de/de/bf/amm/produkte/digirundfunk/digirundf/drmcontentserver.html>
- [33] Rohde & Schwarz SMU200A Vector Signal Generator  
[http://www2.rohde-schwarz.com/en/products/test\\_and\\_measurement/signal\\_generation/SMU200A.html](http://www2.rohde-schwarz.com/en/products/test_and_measurement/signal_generation/SMU200A.html)
- [34] Ettus Research USRP B100  
<https://www.ettus.com/product/details/UB100-KIT>
- [35] Fraunhofer IIS DAB ContentServer  
<http://www.iis.fraunhofer.de/de/bf/amm/produkte/digirundfunk/digirundf/dabdbcontentserver.html>
- [36] ETSI-Norm TS 102349, Digital Radio Mondiale (DRM); Receiver Status and Control Interface (RSCI), V3.1.1 (2010-12)  
[http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/102300\\_102399/102349/03.01.01\\_60/ts\\_102349v030101p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102300_102399/102349/03.01.01_60/ts_102349v030101p.pdf)
- [37] Planning Parameters for DRM Mode E ('DRM+') concerning the use in VHF bands I, II and III, V 3.0  
[http://www.drm-radio-kl.eu/berichte\\_vortraege/drmplus-hdradio/Planning-parameters-for-DRMplus-V30.pdf](http://www.drm-radio-kl.eu/berichte_vortraege/drmplus-hdradio/Planning-parameters-for-DRMplus-V30.pdf)
- [38] Informationen und Tools über den RTL2832U Chip  
<http://sdr.osmocom.org/trac/wiki/rtl-sdr>
- [39] Köhler, Martin: Diplomarbeit „Messtechnische Bewertung der Nutzbarkeit von DRM+ im VHF-Band III“, FH KL, 2010  
[http://www.drm-radio-kl.eu/berichte\\_vortraege/feldversuch\\_2010/Labormessungen\\_DRMplus\\_Band-III.pdf](http://www.drm-radio-kl.eu/berichte_vortraege/feldversuch_2010/Labormessungen_DRMplus_Band-III.pdf)
- [40] Bernhard, Michael & Röhrich, David & Handte, Thomas & Speidel, Joachim: „Analytical and numerical studies of quantization effects in coherent optical OFDM transmission with 100 Gbit/s and beyond“, Institut für Nachrichtentechnik, Universität Stuttgart
- [41] Proakis, John G.: Digital Communications, Third Edition, International Edition 1995, McGraw-Hill