

Abschlussbericht des Modellversuchs zur Erprobung der digitalen Hörfunkübertragung im lokalen Bereich mit dem System DRM



Autoren:

Dipl.-Ing. Friederike Maier

Institut für Kommunikationstechnik Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Dr.-Ing. Albert Waal

Institut für Kommunikationstechnik Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Dipl.-Ing. Detlef Pagel

Niedersächsische Landesmedienanstalt (NLM)

Inhaltsverzeichnis

| 1 | Einl | eitung 1 |
|---|-------------------|--|
| | 1.1 | Digitalisierung des terrestrischen Hörfunks |
| | 1.2 | Der Modellversuch - Rechtsgrundlage und Organisation |
| | 1.3 | Der Modellversuch - Versuchsphasen |
| | | 1.3.1 Phase 1 |
| | | 1.3.2 Phase 2 |
| | | 1.3.3 Phase 3 |
| | 1.4 | Danksagungen |
| 2 | DRI | M Systemparameter 5 |
| _ | 2.1 | OFDM Parameter |
| | $\frac{2.1}{2.2}$ | Multiplex bildung im DRM System |
| | $\frac{2.2}{2.3}$ | OFDM-Übertragungsrahmen |
| | $\frac{2.5}{2.4}$ | Encoding |
| | 2.4 2.5 | Audio- und Datenübertragung |
| | 2.0 | riadio and Datenabertiagung |
| 3 | DRI | M im 11-m-Band |
| | 3.1 | DRM Frequenzhopping |
| | | 3.1.1 Equipment |
| | | 3.1.2 Empfängersoftware |
| | | 3.1.3 Sendersystem |
| | | 3.1.4 Systemtest |
| | 3.2 | DRM Feldmessungen |
| | | 3.2.1 Equipment |
| | | 3.2.2 DRM-Parameter |
| | | 3.2.3 Stationäre Messungen |
| | | 3.2.4 Mobile Messungen |
| | | 3.2.5 Höhenmessungen |
| | 3.3 | Raumwellenausbreitung |
| | | 3.3.1 Überreichweiten während des Feldtests |
| 4 | DRI | M+ Sende- und Empfangsequipment 39 |
| | 4.1 | Sendertechnik |
| | 1.1 | 4.1.1 DRM+ Basisbandsignalgenerator |
| | | 4.1.2 Generierung des analogen Sendesignals |
| | | 4.1.3 Direkte Aufwärtsmischung |
| | | 4.1.4 Die Endstufe des DRM+ Senders |
| | 4.2 | Der DRM+ Empfänger |
| | | 201 2 2 2 1 1 2 m b 10 m 20 1 |

II Inhaltsverzeichnis

| | | 4.2.1 Die Empfangstechnik des digitalen Rundfunksystems | 49 |
|---|---|--|---|
| | | 4.2.2 RF-Frontend für DRM+ Empfänger | 50 |
| | | 4.2.3 Digitale Signalverarbeitung im Basisband | 50 |
| 5 | DRI | M+ Feldmessungen im VHF Band II | 53 |
| | 5.1 | System Konfiguration | 53 |
| | 5.2 | Sende- und Empfangsequipment | 53 |
| | 5.3 | Sendeinhalte | 54 |
| | 5.4 | Messparameter | 54 |
| | 5.5 | Messungen | 55 |
| | | 5.5.1 Offene Umgebungen | 55 |
| | | 5.5.2 Industriegebiet | 56 |
| | | 5.5.3 Radiale Route | 57 |
| | | 5.5.4 Messungen in städtischer Umgebung | 59 |
| | | 5.5.5 Reichweitenmessung | 62 |
| | 5.6 | Versorgungsprognosen | 65 |
| 6 | Vert | träglichkeit zwischen DRM+ und FM | 67 |
| | 6.1 | Subjektive Audiountersuchung | 67 |
| | | 6.1.1 Messaufbau | 67 |
| | | 6.1.2 Messungen | 68 |
| | 6.2 | Messung der PR nach ITU-R BS.641 | 73 |
| | | | |
| 7 | DRI | M+ im VHF Band III | 75 |
| 7 | DRI 7.1 | M+ im VHF Band III Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von | 75 |
| 7 | | Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von | 75 |
| 7 | | Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von DRM+ im VHF-Band III (174 - 230 MHz) | |
| 7 | 7.1 | Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von DRM+ im VHF-Band III (174 - 230 MHz) | 75 |
| 7 | 7.1 | Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von DRM+ im VHF-Band III (174 - 230 MHz) | 75 77 |
| 7 | 7.1 | Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von DRM+ im VHF-Band III (174 - 230 MHz) | 75 77 77 |
| 7 | 7.1 7.2 | Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von DRM+ im VHF-Band III (174 - 230 MHz) | 75 77 77 79 |
| 7 | 7.1 7.2 | Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von DRM+ im VHF-Band III (174 - 230 MHz) | 75 77 77 79 79 |
| 7 | 7.1 7.2 | Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von DRM+ im VHF-Band III (174 - 230 MHz) | 75 77 77 79 79 |
| 7 | 7.1 7.2 | Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von DRM+ im VHF-Band III (174 - 230 MHz) | 75 77 77 79 79 80 |
| 7 | 7.17.27.3 | Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von DRM+ im VHF-Band III (174 - 230 MHz) | 75 77 77 79 79 80 85 |
| 7 | 7.17.27.3 | Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von DRM+ im VHF-Band III (174 - 230 MHz) | 75 77 77 79 79 80 85 86 |
| 7 | 7.17.27.3 | Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von DRM+ im VHF-Band III (174 - 230 MHz) | 75 77 77 79 79 80 85 86 86 |
| 7 | 7.17.27.37.4 | Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von DRM+ im VHF-Band III (174 - 230 MHz) Untersuchung der Kanaleigenschaften in Band III 7.2.1 Auswirkung der Empfängergeschwindigkeit auf den DRM+ Empfang 7.2.2 Flat fading Messungen im VHF Band III 7.3.1 Equipment 7.3.2 Messergebnisse 7.3.3 Versorgungsprognosen Grundlegende Überlegungen zur Einplanung von DRM+ in das Band III 7.4.1 Einplanung von DRM+ in das bestehende Frequenzraster im Band III 7.4.2 Prinzipielle Überlegungen zur Frequenzplanung 7.4.3 Möglichkeiten der Sendernetzplanung für DRM+ | 75 77 77 79 79 80 85 86 86 86 |
| | 7.17.27.37.4 | Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von DRM+ im VHF-Band III (174 - 230 MHz) | 75 77 79 79 80 85 86 86 86 89 |
| | 7.1 7.2 7.3 7.4 | Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von DRM+ im VHF-Band III (174 - 230 MHz) Untersuchung der Kanaleigenschaften in Band III 7.2.1 Auswirkung der Empfängergeschwindigkeit auf den DRM+ Empfang 7.2.2 Flat fading Messungen im VHF Band III 7.3.1 Equipment 7.3.2 Messergebnisse 7.3.3 Versorgungsprognosen Grundlegende Überlegungen zur Einplanung von DRM+ in das Band III 7.4.1 Einplanung von DRM+ in das bestehende Frequenzraster im Band III 7.4.2 Prinzipielle Überlegungen zur Frequenzplanung 7.4.3 Möglichkeiten der Sendernetzplanung für DRM+ ammenfassung Zusammenfassung DRM im 11-m-Band | 75 77 79 79 80 85 86 86 89 |
| | 7.1 7.2 7.3 7.4 Zus 3 8.1 | Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von DRM+ im VHF-Band III (174 - 230 MHz) Untersuchung der Kanaleigenschaften in Band III 7.2.1 Auswirkung der Empfängergeschwindigkeit auf den DRM+ Empfang 7.2.2 Flat fading Messungen im VHF Band III 7.3.1 Equipment 7.3.2 Messergebnisse 7.3.3 Versorgungsprognosen Grundlegende Überlegungen zur Einplanung von DRM+ in das Band III 7.4.1 Einplanung von DRM+ in das bestehende Frequenzraster im Band III 7.4.2 Prinzipielle Überlegungen zur Frequenzplanung 7.4.3 Möglichkeiten der Sendernetzplanung für DRM+ ammenfassung Zusammenfassung DRM im 11-m-Band | 75 77 79 79 80 85 86 86 89 93 |
| | 7.1 7.2 7.3 7.4 Zus : 8.1 8.2 8.3 | Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von DRM+ im VHF-Band III (174 - 230 MHz) | 75 77 79 79 80 85 86 86 86 89 93 94 |

| Inhaltsve | rzeichnis III |
|-----------|--------------------------|
| | |
| A.2 | Sun Spot Number: 100 |
| A.3 | Sun Spot Number: 150 |
| A.4 | Stundenweise Betrachtung |
| Literatu | rverzeichnis 109 |

IV Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

Digital Radio Mondiale (DRM) ist ein vom 1998 gegründeten DRM Konsortium entwickeltes digitales Rundfunksystem. Dieses nicht profit-orientierte Konsortium hat das Ziel, den AM-Rundfunk (Lang-, Mittel- und Kurzwelle) in die digitale Welt zu überführen, da insbesondere die Audio-Qualität der AM-Übertragungen nicht mehr zeitgemäß ist. Im Jahre 2001 wurde das digitale Hörfunksystem DRM vom 'European Telecommunications Standards Institute' (ETSI) standardisiert (ETSI-Standard EN 101 980 V1.1 2001-99). Im Jahr 2003 erfolgte die Standardisierung durch die 'International Telecommunication Union' (ITU) und es begannen die Regelaussendungen im DRM-Standard, da anlässlich der 'World Radio Conference 2003' (WRC 03) der regulative Rahmen für DRM zur Nutzung in den AM-Bändern gesteckt wurde.

DRM ist bedingt durch die relativ schmalen nutzbaren Kanalbandbreiten im AM-Bereich (5 kHz bis 20 kHz, je nach Frequenzband und Region) als schmalbandiges digitales Hörfunksystem zu bezeichnen. Der DRM-Datenstrom kann in bis zu vier einzelne Datenströme unterteilt werden. Während der laufenden Aussendungen kann der Rundfunkveranstalter direkt die Anzahl der zu übertragenden Datenströme unterbrechungsfrei variieren. So ist es z.B. möglich, Nachrichten in vier verschiedenen Sprachen gleichzeitig in einem Kanal auszusenden, jedoch für hochwertige Musikausstrahlungen den gesamten Kanal, d.h. die gesamte verfügbare Nettodatenrate zu nutzen. Die Möglichkeit der parallelen Ausstrahlung von Programmen z.B. in verschiedenen Sprachen ist sehr nützlich bei der Kurzwellenversorgung von Regionen, in denen mehrere Sprachen gesprochen werden.

Ein im Jahr 2005 gefasster Beschluss des DRM-Konsortiums ermöglichte es die obere Grenzfrequenz auf 120 MHz zu erweitern. Dadurch erhielt das System DRM (AM-Bereich bis 30 MHz) eine zweite Systemvariante (DRM+, 30 MHz bis 120 MHz). Diese beiden Systemfamilien unterscheiden sich im nutzbaren Frequenzbereich, DRM30 für den AM-Bereich und DRM+ für den weltweiten FM-Bereich. Später wurde die obere Grenzfrequenz der Systemfamilie DRM+ auf 174 MHz erweitert.

Das DRM-Konsortium besteht heute aus knapp 100 Mitgliedern aus allen Kontinenten, davon 31 aus Deutschland. Mitglieder sind Broadcaster, Empfänger- und Senderindustrie, Netzbetreiber, Forschungseinrichtungen, Verbände und Regulierungsgremien.

1.1 Digitalisierung des terrestrischen Hörfunks

Die Verbreitung von digitalem terrestrischen Hörfunk erfolgt heute in großen Teilen Deutschlands im VHF-Band III (174-230 MHz) mit dem digitalen Hörfunksystem Digital Audio Broadcasting (DAB, Eureka 147). Digital Audio Broadcasting nutzt zur Audiocodierung das Verfahren MPEG Layer 2. Derzeit wird jedoch die Einführung von DAB+, im ersten Schritt mit

2 Einleitung

bundesweiten Programmen in einem bundesweiten Layer vorbereitet. Das digitale Hörfunksystem DAB+ nutzt das moderne Audiocodierverfahren MPEG4 HE AAC v2. Bei Nutzung von MPEG 4 HE AAC v2 können die Audiodaten bei gleicher Qualität nochmals in ihrer Datenrate reduziert werden, sodass sich eine kostengünstigere Verbreitung der Programme ergibt. DAB+ wird wie DAB in einem Frequenzblock mit der Bandbreite von 1,536 MHz verbreitet. In diesem Frequenzblock können Datenraten von 790 kBit/s (bei sehr großem Fehlerschutz PL1) über 1,152 MBit/s (normaler Fehlerschutz PL3) bis zu 1,728 MBit/s (sehr geringer Fehlerschutz PL5) übertragen werden. Somit ergibt sich die Möglichkeit, in einem DAB-Block ein Multiplex mit 10 bis 16 Hörfunkprogrammen (je nach Qualität) und Zusatzdiensten zu verbreiten. Es kann also eine große Anzahl von Hörfunkprogrammen in großen Flächen kostengünstig verbreitet werden, wenn der Multiplex komplett belegt ist. Natürlich haben diese Programme dann alle den gleichen Versorgungsbereich, eine individuelle Veränderung des Versorgungsbereiches bzw. eine Anpassung an die Versorgungsvorgaben kann nicht durchgeführt werden.

Genau diese Anpassung an lokal oder regional abgegrenzte Versorgungsbereiche muss der lokale Hörfunk erfüllen, um seiner Versorgungsaufgabe gerecht zu werden. Wird nun lokaler oder regionaler Hörfunk mit dem technischen System DAB+ verbreitet, kann der Multiplex auf Grund der wenigen zu verbreitenden lokalen Angebote nicht gefüllt werden, die Verbreitung ist nicht ressourceneffizient und nicht wirtschaftlich. Werden hingegen eine Vielzahl lokaler Programme aus verschiedensten Regionen in einem dann gefüllten Multiplex verbreitet, so verlieren diese Programme den lokalen Charakter, die Verbreitung geht am Versorgungsziel vorbei und ist ebenfalls unwirtschaftlich.

Das digitale Hörfunkverfahren DAB+ eignet sich zur Versorgung großer Flächen mit vielen Programmen und gleichen Versorgungsgebieten. Bei lokalen und regionalen Programmstrukturen, die die Verbreitung von nur einem oder wenigen Programmen in den dementsprechenden Bereichen vorsieht, sind schmalbandige digitale Hörfunksysteme, wie z.B. DRM/DRM+, vorzusehen. Mit diesem schmalbandigen System kann jeder Programmanbieter seinen eigenen Versorgungsbereich, je nach Anforderung oder Vorgabe, ohne Berücksichtigung der Versorgungsinteressen anderer Programmanbieter, umsetzen.

Zu den lokalen Hörfunkprogrammanbietern in Niedersachsen gehören die 11 Bürgersender sowie zwei Kooperationen mit Bremen, die eine lokale und regionale Berichterstattung gewährleisten. Zusätzlich wird es ab 2011 gemäß des Niedersächsischen Mediengesetzes möglich sein, privaten, werbefinanzierten Hörfunk zu realisieren. Die drei landesweiten privaten, werbefinanzierten Hörfunksender schalten zur regionalen Berichterstattung und zur regionalen Werbung ebenfalls ihre Programme auseinander. Diese Möglichkeiten, die zurzeit im UKW-Bereich möglich sind, nämlich die Realisierung von lokalen Hörfunkangeboten und die Auseinanderschaltung bei bestimmten Inhalten unter Nutzung verschiedener UKW-Frequenzen, können bei Nutzung von DAB+ so nicht umgesetzt werden. Sollen die heute über UKW-Rundfunk verbreiteten lokalen und regionalisierten Programme in die digitale Welt überführt werden, wird hierzu ein schmalbandiges digitales Hörfunksystem benötigt. Aus diesem Grund wurde in Niedersachsen ein Modellversuch initiiert, um die Möglichkeiten von DRM und DRM+ zur rundfunktechnischen Versorgung lokaler und regionaler Strukturen zu untersuchen.

1.2 Der Modellversuch - Rechtsgrundlage und Organisation

Gemäß § 34 des Niedersächsischen Mediengesetzes (NMedienG) besteht die Möglichkeit, Modellbzw. Betriebsversuche mit neuartigen Rundfunkübertragungstechniken, neuen Programmformen oder multimedialen Angeboten durchzuführen. Die max. Dauer ist gem. § 34 Abs. 2 S. 2 NMedienG auf fünf Jahre begrenzt. Die rechtliche Basis des Modellversuchs stellt die Verordnung über einen Modellversuch mit dem digitalen terrestrischen Rundfunkübertragungsverfahren Digital Radio Mondiale (DRM) vom 19.7.2005, veröffentlicht im Nds. GVBl. Nr. 16/2005 seitens des Landes Niedersachsen, dar.

Der Modellversuch begann am 1.8.2005 und endete mit Ablauf des 31.7.2010. Mit dieser Verordnung und der Verordnung Nds. GVBl. Nr. 8/2009 vom 9.4.2009 (Erweiterung des Modellversuchs auch auf das VHF-Band III) bestand nunmehr die Möglichkeit, das digitale Hörfunksystem DRM im Kurzwellenbereich (11-m-Band) im Band II (UKW-Bereich) und im Band III (VHF-Bereich) zu entwickeln und zu erproben.

Ein dementsprechender Projektvertrag bzw. die Vereinbarung über den Modellversuch DRM in der Region Hannover wurde am 16.08.2005 von den Projektteilnehmern, der Niedersächsischen Landesmedienanstalt, des Instituts für Kommunikationtechnik der Leibniz-Universität Hannover und der Firma StarWaves GmbH Bad Münder (Projektmitglied vom 1.8.2005 bis 31.7.2008) unterzeichnet. Das Entscheidungsorgan im Modellversuch stellte der Projektrat dar, dem alle Vertragsparteien angehörten und dessen Vorsitz die NLM hatte. Als technische Projektleitung in diesem Modellversuch war die Leibniz Universität Hannover ebenfalls Vorsitzender des technischen Ausschusses, der den Projektrat in allen technischen Fragen beriet.

1.3 Der Modellversuch - Versuchsphasen

1.3.1 Phase 1

Die Erprobung der Aussendung von lokalen Hörfunkangeboten über das System DRM30 ist sowohl im Mittelwellen- als auch im Kurzwellenbereich möglich. Eine lokale Versorgung über Mittelwellenfrequenzen ist in Deutschland, bedingt durch relativ wenig nutzbare Frequenzen, Überreichweiten, die eine Absenkung der Sendeleistung nachts erforderlich machen, sowie relativ großer Sendeantennenanlagen, eher nur in wenigen Fällen realisierbar. Es steht jedoch ein sehr wenig genutzter Kurzwellen-Rundfunkfrequenz-Bereich, das 11-m-Band (25,67 bis 26,1 MHz) mit 43 Kanälen zur Verfügung. Im Modellversuch wurden daher die Möglichkeiten der Nutzung dieses 11-m-Bandes für den lokalen Bereich ermittelt und es wurde dazu eine Sendeanlage errichtet. Neben der Untersuchung der Frequenzumschaltung bei Störungen sollten Feldstärkemessungen am Boden die theoretische Versorgungsberechnungen verifizieren und die Ergebnisse der mobilen Messung sollten zeigen, welche Sendeparameter betriebsseitig einzustellen sind.

4 Einleitung

1.3.2 Phase 2

In dieser Phase des Modellversuchs wurde die Nutzung von DRM+ für den lokalen Hörfunk im Band II (87,5 bis 108 MHz) untersucht. Als rasterkonformes System kann DRM+ in das UKW-Band eingeplant und mit einer Bandbreite von 96 kHz können somit in einem Programm-Multiplex bis zu vier Services Audio, Video oder Daten übertragen werden. Zur Ermittlung der Nutzbarkeit von DRM+ Aussendungen für den lokalen Hörfunk wurden dementsprechende Sendeanlagen und Empfänger entwickelt und gefertigt sowie Feldmessungen durchgeführt.

1.3.3 Phase 3

Bedingt durch die sehr starke Belegung des UKW-Bereichs (87,5 bis 108 MHz) durch Sendestationen, die eine zukünftige Einführung von digitalen Hörfunksystemen parallel zu FM in diesem Frequenzbereich sehr erschweren oder gar unmöglich machen, wurde das Rundfunkfrequenzband III (174 bis 230 MHz) hinsichtlich der Verwendbarkeit für DRM+ Aussendungen untersucht. Dazu wurden die Frequenzabhängigkeit der Kanaleigenschaften und des Systems analysiert, Sende- und Empfangsequipment für Band III wurde entwickelt und aufgebaut sowie Feldmessungen von Signalen im Standard DRM+ im Band III wurden durchgeführt.

1.4 Danksagungen

Bedanken möchten wir uns an dieser Stelle bei allen, die zum Gelingen dieses Projektes beigetragen haben. An erster Stellen den Studenten, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten oder als wissenschaftliche Hilfskräfte an dem Projekt mitgearbeitet haben.

Besonderen Dank an die Bundesnetzagentur (BNetzA) und den Norddeutschen Rundfunk (NDR) für die Unterstützung bei den Prognoserechnungen und Messungen, an die Firma Thomson für das Leihen des Sendeequipments, an RFmondial, Nautel, Transradio, Fraunhofer IIS, Sat-Service Schneider GmbH, Kathrein, Bosch-Blaupunkt, Sennheiser und das DRM Konsortium.

Ebenso möchten wir dem Dpt. Electronics & Telecommunication der Universität des Baskenlandes (UPV/EHU), der Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg und der FH Kaiserslautern für die Zusammenarbeit und den Austausch und den EntwicklerInnen des open source DReaM Softwareradios für ihre Arbeit danken.

2 DRM Systemparameter

DRM verwendet als Modulationsverfahren das Mehrträgerverfahren OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex). Für die verschiedenen Anforderungen der Lang (LW),- Mittel (MW)- und Kurzwellenausbreitung (KW) wurden verschiedene 'Robustness Moden' (A-D, DRM30) definiert, Mode E (DRM+) ein 'Robustness Mode' für höhere Frequenzen wurde später ergänzt.

2.1 OFDM Parameter

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die OFDM Parameter und die typische Verwendung der Moden.

| OFDM Parameter von DRM | | | | | |
|------------------------|-----------|--------|-------|-----------|-------------------|
| 'Robustness Mode' | A | В | С | D | Е |
| Trägerabstand (Hz) | 41,66 | 46,88 | 68,18 | 107,1 | 444,44 |
| Symboldauer (ms) | 26,66 | 26,66 | 20,00 | 16,66 | 2,5 |
| Schutzintervall (ms) | 2,66 | 5,33 | 5,33 | 7,33 | 0,25 |
| Verwendung | LW, MW, | MW, KW | KW | KW | ${ m Zeit/Freq.}$ |
| | KW Boden- | Raum- | Raum- | Raumwelle | selekt. |
| | welle | welle | welle | | Kanäle |

Als Unterträgermodulation stehen 16- und 64-QAM zur Verfügung, die Bandbreite kann je nach Frequenzband und Region zu 9 oder 10 kHz eingestellt werden. Im Falle einer Simulcastübertragung zusammen mit einem analogen AM-Signal im selben Kanal sind zusätzlich Modes mit einer Bandbreite von 4,5 bzw. 5 kHz vorgesehen. Die breitbandigen Modes mit 18 bzw. 20 kHz Bandbreite finden in anderen ITU-Regionen Verwendung.

DRM Mode E hat eine Bandbreite von 96 kHz und verwendet 4- bzw. 16-QAM Modulation.

2.2 Multiplexbildung im DRM System

Die Vielfalt möglicher Kombinationen der zu übertragenden Information in einem digitalen Rundfunksystem erfordert die Übertragung zusätzlicher Service- und Signalisierungsinformationen. Die Zusammensetzung von Nutz- und Serviceinformationen in einem Datenstrom wird als ein Multiplex bezeichnet.

Im DRM System besteht der System-Multiplex aus drei logischen Kanälen, die parallel übertragen werden. Diese Kanäle werden Main Service Channel (MSC), Service Description Channel

(SDC) und Fast Access Channel (FAC) genannt.

Main Service Channel

Der Hauptkanal mit der größten Datenkapazität kann bis zu vier unabhängige Nutzdatenströme (Programm-Multiplex) transportieren. Ein Nutzdatenstrom kann sowohl Audio-Service-komponenten als auch Datendienst-Servicekomponenten beinhalten. Die Zusammensetzung der Servicekomponenten kann vom Programmanbieter flexibel gestaltet werden. Die Datenrate des gesamten Datenstroms hängt von den eingestellten Parametern der Kanalcodierung sowie von der Art der Unterträgermodulation ab.

Service Description Channel

Im SDC wird die Information über die Zusammensetzung der Nutzdaten im MSC sowie programmrelevante Daten übertragen. Außerdem sind im SDC Informationen über die verwendete Sprache des Programms, das Datum und die Zeit, die Art der Verschlüsselung (engl. Conditional Acces, CA) und die Signalisierung alternativer Frequenzen (engl. Alternative Frequency Signaling, AFS) enthalten. Einige dieser Parameter sind optional.

Fast Access Channel

Mit den Daten aus dem FAC stellt der Empfänger die wichtigsten Parameter (wie z.B Bandbreite des DRM+ Signals, Modulation des SDC und MSC, und Länge des Interleavers) für die Demodulation und die Decodierung des empfangenen DRM+ Signals ein.

Da für eine einwandfreie Demodulation des empfangenen DRM+ Signals die Richtigkeit der Daten aus FAC und SDC essentiell ist, werden die Datenblöcke in FAC- und SDC-Kanälen mit einer Checksumme Cyclic Redundancy Check (CRC) versehen.

Die Verwaltung der Eingabe und Speicherung aller Nutzdaten, die zeitliche Planung der Diensteausstrahlung und die Zusammensetzung des Multiplexes werden in einem *Content Server* abgewickelt.

2.3 OFDM-Übertragungsrahmen

Bei der praktischen Realisierung eines OFDM-Übertragungssystems ist es sinnvoll, einzelne OFDM-Symbole in Übertragungsrahmen zusammenzufassen. Im DRM+ System wird ein Super-Übertragungsrahmen als Hauptübertragungseinheit definiert. Ein Super-Übertragungsrahmen beinhaltet vier Übertragungsrahmen bei DRM+ (drei bei DRM30). Die Dauer des Übertragungsrahmens T_F entspricht einem Vielfachen der Rahmenlänge vom Quellencoder und beträgt 100 ms bei DRM+ (400 ms bei DRM30). Die Dauer der Super-Übertragungsrahmen ist demnach 400 ms bei DRM+ (1200 ms bei DRM30).

Ein Subträger eines OFDM-Symbols wird OFDM-Zelle genannt. Ein Übertragungsrahmen besteht aus N_s OFDM-Symbolen, die wiederum aus K OFDM-Zellen zusammengesetzt sind. Die OFDM-Zellen können Nutzdaten (MSC), Information der Logischen Kanälen FAC, SDC oder Referenzinformation für Synchronisierungszwecke übertragen. Bild 2.1 zeigt den Aufbau

¹engl. Transmission Super Frame

²engl. Transmission Frame

2.4 Encoding 7

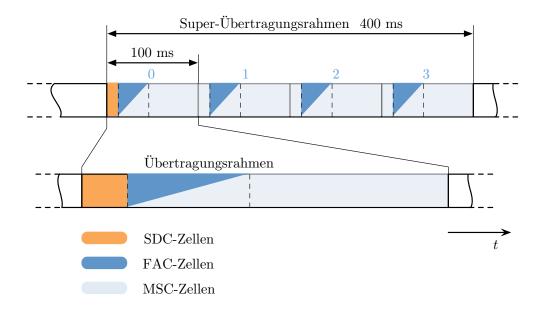


Abbildung 2.1: Struktur der Übertragungsrahmen im DRM+ System.

eines Super-Übertragungsrahmen für das DRM+ System.

Die SDC-Informationen werden nur im ersten Übertragungsrahmen übertragen. Die FAC- und MSC-Zellen sind über alle Übertragungsrahmen verteilt.

Zusätzlich werden über die Gesamtlänge des Super-Übertragungsrahmens die Referenz- oder Pilot-Zellen verteilt. Diese Zellen werden für Zeit-, Frequenzsynchronisation und zur Schätzung der Kanalübertragungsfunktion benötigt.

2.4 Encoding

Um die Nutzdatenraten einzustellen, lassen sich durch verschiedene 'Protection Level' (PL) die Coderaten variieren. Dabei gibt es verschiedene Fehlerschutzmechanismen im Standard. Bei der 'Equal Error Protection' (EEP) werden alle Übertragungsdaten gleichmäßig codiert, die 'Unequal Error Protection' (UEP) hat den Vorteil, dass durch einen ungleichmäßigen Fehlerschutz bei fehlerhafter Übertragung ein besserer Höreindruck entsteht [1]. Damit und mit den verschiedenen Bandbreiten lassen sich bei DRM30 Datenraten von 4,8-72 kbps einstellen und das System damit auf die zur Verfügung stehende Bandbreite und Übertragungseigenschaften des Kanals optimieren. Die Details der möglichen Einstellungen sind in [2] zusammengefasst.

Bei DRM+ sind Datenraten von 37.3 - 186.6 kbps möglich. Abbildung 2.2 zeigt die unterschiedlichen Variationsmöglichkeiten der Coderaten, der der Datenraten und des zum Empfang nötigen Signal zu Rausch Abstandes (SNR). So ist es zum Beispiel möglich, vier verschiedene Services (2x Audio, 2x Daten) mit einer Gesamt-Datenrate von 186 kbit/s zu übertragen, oder mit weniger Leistung aber gleicher Reichweite ein Signal mit nur zwei Services (1x Audio, 1x Daten) und einer Datenrate von 76 kbit/s.

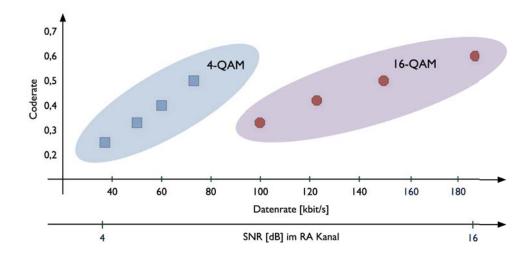


Abbildung 2.2: DRM+ Encoding vs. Datenraten/SNR

2.5 Audio- und Datenübertragung

Um den Broadcastern ein Optimum zwischen Audioqualität und Anzahl der Services bereitzustellen, bietet DRM drei verschiedene MPEG4 Audiocodecs. Der AAC Encoder benötigt die größte Datenrate und liefert die beste Qualität, CELP und HVXC benötigen deutlich weniger Datenrate, sind jedoch nur für Sprachübertragungen ausgelegt. Alle drei Codecs lassen sich durch die Verwendung von 'Spectral Band Replication' (SBR) verbessern. Im DRM30 Mode mit einer Bandbreite von 18/20 kHz und bei DRM+ erlauben die zur Verfügung stehenden Datenraten die Verwendung von MPEG 4 Stereo kompatiblem 5.1 Surround Sound.

Neben Audiodaten ist es möglich Textinformationen, den Nachrichtenservice Journaline, EPG (Electronic Program Guide), Slide Shows und Verkehrsinformationen (TMC) zu übertragen.

Das 11-m-Band von 25,67-26,1 MHz ist das frequenzmäßig oberste Kurzwellenband, kann also von allen handesüblichen DRM30 Empfängern empfangen werden. Da jedoch in diesem Frequenzbereich verstärkt Störungen zu erwarten waren, wurde auf diese und deren Kompensation in diesem Modellversuch verstärkt eingegangen.

Bedingt durch die Eigenschaft der Reflektion von Funkwellen an der Ionosphäre in diesem Frequenzbereich, können Aussendungen im 11-m-Band weit über die lokale Verbreitung hinausgehen bzw. Funkdienste aus anderen Staaten können die lokale Verbreitung stören. Abhängig sind diese Störungen von der Beschaffenheit der Ionosphäre, also auch von der Tageszeit, von der Jahreszeit sowie von der Sonnenfleckenzahl bzw. der Sonnenaktivität und dem Sonnenzyklus. Um diese Effekte zu untersuchen, wurden Simulationen der Ionosphärenausbreitung für verschiedene Tages- und Jahreszeiten durchgeführt.

Im Lokalbereich können Störungen durch Elektrogeräte, Zündanlagen, Straßenbahnen, Powerline-Communication-Systeme (PLC), Rückkanäle in Kabelnetzen, Industrieanlagen auf ISM-Frequenzen etc. auftreten. Da die Störungen im Allgemeinen schmalbandig sind, werden also nur wenige, jedoch immer verschiedene, der im 11-m-Band zur Verfügung stehenden 43 Kanäle gestört. Es wurde untersucht, ob durch automatische Sendefrequenzumschaltung (Frequenzhopping) das Programm immer auf einer ungestörten Frequenz weiterverbreitet werden kann. Dazu wurde ein Hörfunkprogramm verbreitet, dem jeweils eine bestimmte Anzahl von verschiedenen Sendefrequenzen zur Verfügung stehen. Störungen in der Übertragung wurden von PC-basierten DRM-Empfängern, die sich im Versuchsgebiet befanden, über das Internet direkt an die Sendezentrale gemeldet. Hier wurde im Störungsfall ein Frequenzwechsel vorgenommen. Statistische Auswertungen sollten zeigen, inwieweit sich lokale oder weit entfernte Störer auf den Empfang auswirken und in welcher Stärke diese Störungen auftreten.

Feldstärkemessungen am Boden sollen theoretische Versorgungsberechnungen verifizieren und die Ergebnisse der mobilen Messung sollen zeigen, welche Sendeparameter betriebsseitig einzustellen sind.

3.1 DRM Frequenzhopping

Durch einen Wechsel der Sende- bzw. Empfangsfrequenzen soll ermöglicht werden, die Einflüsse von Störungen zu minimieren.

Dabei muss der Sender entweder die selben Programme auf mehreren Frequenzen anbieten, was für kleine lokale/regionale Anbieter zu kostenintensiv ist, oder bei Störungen die Sendefrequenz wechseln und auf einer alternativen Frequenz weiter übertragen. Da im Rahmen des Modellversuchs nur ein Sender zur Verfügung stand, gab es keine Möglichkeit, gleichzeitig auf

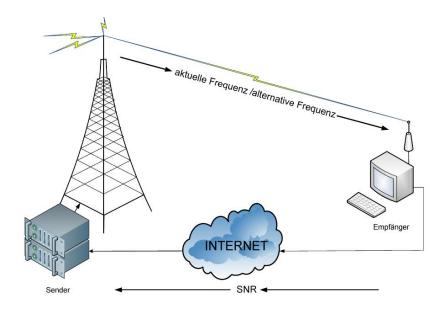


Abbildung 3.1: Informationsaustausch zwischen Sender und Empfänger

mehreren Frequenzen zu senden. Aus diesem Grund wurde die zweite Variante mit der Sendefrequenzumschaltung realisiert. Diese Tatsache, dass sowohl am Sender als auch am Empfänger die Frequenz umgeschaltet werden musste, verlangte ständige Kommunikation zwischen dem Sender und dem Empfänger.

Als Hauptsendefrequenz stand die Frequenz $26,045~\mathrm{MHz}$ und als Alternativ-Frequenz die $26,085~\mathrm{MHz}$ zur Verfügung

Abbildung 3.1 zeigt den Informationsaustausch zwischen Sender und dem Empfänger. Der Sender teilt dem Empfänger parallel zu angebotenen Diensten aktuelle und alternative Übertragungsfrequenzen über den Sendeweg mit. Der Empfänger analysiert die Qualität des Signals und informiert den Sender über eventuell aufgetretene Störungen.

Diese Informationsübertragung findet über das Internet statt. Als Indikator der gestörten Verbindung kann das Verhältnis zwischen Signal- und Rauschleistung (SNR) dienen. Fällt der SNR-Wert unter ein bestimmtes Niveau, so können die Dienste nicht mehr dekodiert werden. Dieses führt zur Unterbrechung des Empfangs.

Die Entscheidung über die Frequenzänderung treffen die beiden Seiten anhand des Verlaufs des SNR-Wertes. Bleibt dieser Parameter länger unter einem bestimmten Niveau als es von den Einstellungen vorgegeben ist, schalten Sender und Empfänger auf die alternative Frequenz um. Wenn die neue Frequenz ungestört ist, wird die Übertragung auf dieser Frequenz fortgesetzt. Falls auf der neuen Frequenz kein Signal zu empfangen oder die Qualität des Signals nicht ausreichend ist, wird nach einiger Zeit zurück auf die alte Frequenz umgeschaltet.

Auf Senderseite wird erst auf die alternative Frequenz umgestellt, wenn mehr als 50% aller Test-Empfänger einen Empfangsausfall melden. Nach der Umschaltung wird eine Pause eingelegt, bis alle Empfänger ihre Frequenzeinstellungen geändert haben. Dann wird der Vorgang wiederholt. Es wird wieder untersucht wie viele Empfänger eine Störung melden. Falls die Mehrheit der Test-Empfänger kein Signal empfängt, wird zurück auf die alte Frequenz umgeschaltet.

3.1.1 Equipment

Im Rahmen des Modellversuchs zur Erprobung der digitalen Hörfunkübertragung in Hannover wurde eine DRM-Senderanlage auf Basis der DRM-Signalmodulator DRM-DMOD2 von der Firma Transradio eingesetzt. Eine wichtige Eigenschaft des DRM-DMOD2 ist die Möglichkeit diesen extern zu steuern. Die Datenübertragung erfolgt über die Fernbedienungsschnittstelle ttyS11 in Form eines seriellen RS-232-C-Protokolls.



Abbildung 3.3: Antennenstandort auf dem Dach des Universitätsgebäudes

Empfangsseitig wurde ein PC-basierter Empfänger verwendet. Das empfangene DRM-Signal wird dabei auf eine Zwischenfrequenz gemischt und mit Hilfe einer gewöhnlichen Soundkarte im PC digitalisiert. Das digitalisierte Signal wird dann von Software verarbeitet und als Audio-Signal mit der Soundkarte ausgegeben. Der Vorteil von einem PC-basierten DRM-Empfänger ist, dass man auf die technischen Daten des DRM-Signals, wie SNR, Signalstärke, Anzahl der nicht dekodierten Audioframes etc. leicht zugreifen kann.

Der PC-basierte Empfänger verwendete als Frontend ein DRT1-Modul der Firma SatSchneider. Der DRM-Tunerbaustein DRT1 ist ein hochwertiges HF-Modul mit einer Eingangs-Frequenz von 10 kHz bis 30 MHz. Der Ausgang des DRT1 liefert ein ZF-Signal auf einer Frequenz

von 12 kHz. So kann eine PC-Soundkarte als ADC (Analog to Digital Converter) verwendet werden. Die hohe Kanalselektion wird mittels eines Kristallfilters am ersten ZF-Filter erreicht. Der DRT1 hat eine Bandbreite von 10 kHz, ist also für die 10 kHz Modes von DRM geeignet.

Als Empfangssoftware wurde die DReaM-Software von der Technischen Universität Darmstadt gewählt [3]. Dabei handelt es sich um ein Open-Source- Projekt, das für die Echtzeitdekodierung von DRM-Streaming entwickelt wurde.

Die Empfängersoftware wurde dahingehend erweitert, dass die Empfangsparameter aufgezeichnet und an den Sender übermittelt werden können.

3.1.2 Empfängersoftware

Die Software bietet die Möglichkeit, das DRM-Signal zu empfangen, den DRM-Empfänger zu steuern und Daten an den Sender zu senden. In diesem Softwarepaket wurden folgende Funktionen realisiert:

- die Auswertung des empfangenen Signals. Als Ergebnis dieser Auswertung werden aktuelle und alternative Übertragungsfrequenzen ermittelt und der SNR-Wert gemessen
- der SNR-Wert wird über das Internet an den Sender gesendet
- bei einem niedriegen SNR-Wert wird die Empfangsfrequenz geändert

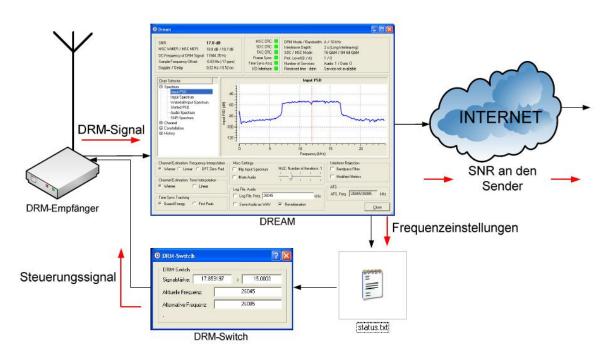


Abbildung 3.4: Empfängersystemarchitektur

Die Entscheidung über den Übergang auf die alternative Empfansfrequenz wird erst dann getroffen, wenn der SNR-Wert länger als eine definierte Periode den Minimumwert für ungestörten Empfang unterschreitet.

Abbildung 3.4 zeigt die Empfängersystemarchitektur. Mit Hilfe des erweiterten DReaM wird das empfangene DRM-Signal dekodiert. Dabei werden bei ausreichendem SNR-Niveau Audio-

und Datendienste zu Verfügung gestellt.

Die Frequenzeinstellungen lassen sich aus den zusammen mit den Audioprogrammen gesendeten Textnachrichten auslesen. Die Frequenzparameter und der SNR-Wert werden in eine Textdatei mit dem Namen 'status.txt' geschrieben. Diese Datei dient als Datenquelle für den 'DRM-Switch'. Der 'DRM-Switch' ist eine Applikation, die für die Analyse der Signalqualität benutzt wird und bei schwachem Signal die Frequenzumschaltung realisiert. Die Frequenzänderung erfolgt über eine serielle RS-232-Schnittstelle.

3.1.3 Sendersystem

Abbildung 3.5 zeigt die Sendersystemarchitektur. Mit Hilfe der erweiterten DReaM-Software werden die SNR-Werte von den Test-Empfängern über das Internet an den Server übertragen. Der 'DRM-Logger' ist ein Analyseprogramm, das die empfangenen SNR-Werte auswertet und daraus eine Entscheidung über die Sendefrequenzänderung trifft. Die Frequenzänderung erfolgt über die externe Ansteuerung der Sendeanlage.

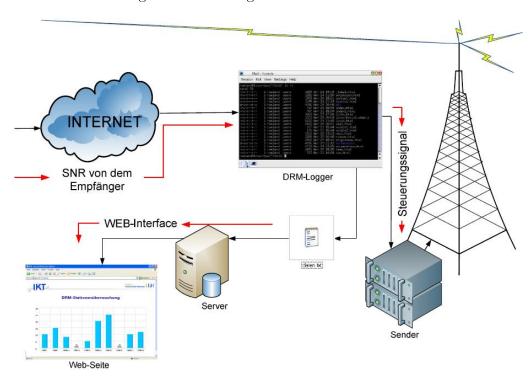


Abbildung 3.5: Sendersystemarchitektur

3.1.4 Systemtest

Die richtige Funktionsweise des Systems setzt eine zeitliche Synchronisierung aller Systemkomponenten voraus. Alle Frequenzumschaltungen müssen möglichst gleichzeitig stattfinden, um die Unterbrechungen beim Audiosignal möglichst gering zu halten. Zu den Systemeinstellungen gehören:

• die Signal-Rausch-Toleranz

• die Pausen zwischen den aufeinanderfolgenden Umschaltungen der Frequenz

Der minimale Signal-Rausch-Abstand, bei welchem das Audiosignal noch gut zu empfangen ist, wird als Signal-Rausch-Toleranz definiert. Der Wert für diesen Parameter wird mit Hilfe von SNR-Messungen bei unterschiedlichen realen Empfangsbedingungen ermittelt. Abbildung 3.6 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer Messung, die zur Berechnung des minimal benötigten Signal-Rausch-Abstands durchgeführt wurde. Als Empfangsantenne bei diesen Messungen wurde eine kombinierte Stab-Magnet-Loop-Antenne genutzt. Diese Antenne war auf den Frequenzbereich im 11-m-Band abgestimmt. Durch Abschirmung der Antenne werden unterschiedliche Empfangseigenschaften emuliert. Im Diagramm ist ablesbar, dass der stabile Empfang und die zuverlässige Dekodierung des Audiosignals bei eingestellten DRM-Parametern nur bei einem SNR größer als 15 dB möglich ist. Dieser Wert wurde als Signal-Rausch-Toleranz definiert und für die nachfolgenden Versuche verwendet.

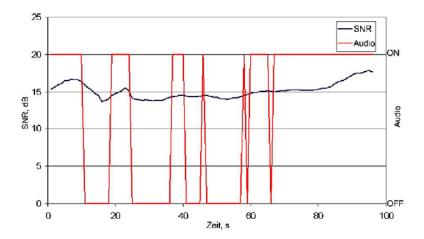


Abbildung 3.6: SNR/Audioverlauf über die Zeit

Bei der Wahl der Pausen zwischen aufeinander folgende Frequenzumschaltungen ist die Zeit wichtig, die der Empfänger braucht, um komplett neu zu synchronisieren und die Daten zu dekodieren.

Bei der Verwendung eines DRM-Empfängers auf Basis des 'DRT1'-Modul und der Dekodierungssoftware DReaM beträgt die Zeit für die komplette Synchronisierung bis zu 3 Sekunden. Die Pause zwischen aufeinander folgende Umschaltungen der Frequenz im Empfänger (im Folgenden Empfangsumschaltpause genannt) muss daher länger als 3 Sekunden sein. Nach der Frequenzänderung muss gewartet werden, bis der Empfänger die komplette Synchronisation durchgeführt hat. Erst dann kann sichergestellt werden, ob auf dieser Frequenz der Empfang möglich ist.

Daher muss die Pause zwischen zwei aufeinander folgende Frequenzumschaltungen im Sender (im Folgenden Sendeumschaltpause genannt) das Dreifache der Empfangsumschaltpause betragen. Nach Änderung der Sendefrequenz kann die Logik im Sender erst dann entscheiden, ob die Umschaltung erfolgreich war, wenn alle Empfänger auf die neue Frequenz umgeschaltet wurden und dort synchronisiert sind. Am längsten braucht dafür der Empfänger, der sich nach der Frequenzänderung schon einige Zeit auf der richtigen Frequenz befindet, aber die Synchronisierung auf dieser Frequenz nicht erfolgreich ist. Dieser Empfänger muss zweimal die

Frequenz ändern, und dazu noch genug Zeit für die komplette Synchronisierung haben. Daraus folgt, dass die Sendeumschaltpause dreimal länger als die Empfangsumschaltpause sein muss. Für die nachfolgenden Testversuche wurde diese Umschaltpause auf 10 Sekunden gesetzt.

Des Weiteren wurde die Reaktion des Systems auf einen Ausfall des Audiosignals bei mehreren Empfänger untersucht. Eine Empfangsstörung, bei der mehr als 50% aller Empfänger kein Audiosignal dekodieren können, führt zur Änderung der Sendefrequenz. Für den Versuch wurde lediglich ein Empfänger genutzt. In diesem Fall wurde die Empfangsstörung an diesem Gerät als eine Störung bei 100% der Empfänger festgelegt. Als Folge dieser Störung findet die Änderung der Sendefrequenz statt. Um die Störung zu emulieren, wurde die Datenverbindung zwischen dem Rechner und dem DRM-Empfänger für kurze Zeit unterbrochen.

Infolge der Störung sinkt der SNR-Wert unter die Toleranzgrenze und der Empfang des Audioprogramms ist nicht mehr möglich. Der Empfänger signalisiert dem Sender daraufhin, dass er auf eine vorgegebene alternative Sendefrequenz (26,085 MHz) umschalten soll und schaltet ebenfalls auf die Alternativfrequenz um. Wenn die Frequenzumschaltung von Sender und Empfänger abgeschlossen ist, benötigt der Empfänger 1-3 Sekunden für die Zeit- und Frequenzsynchronisierung, dann steigt der Signal-Rausch-Abstand wieder. Wenn dieser die 15 dB-Marke erreicht hat, bleibt der Empfänger auf der neuen Frequenz und der Empfang wird fortgesetzt.

Dieser Versuch zeigt, dass das System im Fall einer überregionalen Störung, wenn mehr als 50% aller Empfänger betroffen sind, die Umschaltung auf eine alternative Frequenz veranlasst. Die Dauer der Unterbrechung des Audiosignals beträgt in diesem Fall ca. 3 Sekunden.

In einem weiteren Versuch wurde die Reaktion des Systems auf die Änderung der Sendefrequenz untersucht. In diesem Fall handelt es sich um die Empfänger, die von der Störung nicht betroffen sind, aber wegen der Änderung der Sendefrequenz auf die alternative Frequenz umschalten müssen.

Für den Versuch wurde auch exemplarisch nur ein Empfänger genommen. Die Sendefrequenz wird manuell auf die alternative Frequenz umgestellt. Als Folge dieser Frequenzumschaltung sinkt der SNR-Wert im Empfänger unter 15 dB und der Empfänger schaltet daraufhin auf die alternative Frequenz um. Wenn die Frequenzumschaltung abgeschlossen ist, steigt der Signal-Rausch-Abstand wieder. Wenn der SNR-Wert die 15 dB-Marke erreicht, fixiert der Empfänger die neue Frequenz und der Empfang wird auf dieser Frequenz weiter fortgesetzt.

Bei dieser Untersuchung wurde ermittelt, dass im Falle einer Änderung der Sendefrequenz die Empfänger den Empfang auf einer alternativen Frequenz fortsetzen können. Die Dauer der Unterbrechung des Audiosignals beträgt in diesem Fall ca. 3-5 Sekunden.

Die Umschaltung der Sendefrequenz führt zu einem Ausfall des Audiosignals. Die minimal ermittelte Unterbrechungszeit liegt bei ca. 3 Sekunden. Im Worst-Case, wenn der Empfänger aufgrund der falschen Entscheidung mehr als zwei Mal die Empfangsfrequenz umschaltet, kann es aber zur einer Unterbrechungszeit von 12 bis 17 Sekunden kommen.

3.2 DRM Feldmessungen

In Kooperation mit der Firma Thomson, die den Sender und eine Sendeantenne zur Verfügung stellte, fand die Versuchsaussendung eines DRM Signals auf der Frequenz 26,045 MHz im Frühjahr/Sommer 2009 in Hannover statt. Die Versorgung bei Aussendung mit der Antenne von Thomson und der bei Aussendung mit einer GP27 Ground-Plane Antenne wurde verglichen. Gesendet wurde Musik, die unter der Creative-Commons Lizenz [4] steht, von der Webseite http://www.jamendo.com.

Feldtests in Nürnberg [5] und Mexiko Stadt [6] zeigten, dass die minimale nutzbare Feldstärke sehr stark vom Rauschpegel in der Umgebung abhängt und in vielen Fällen höher, als die in den Planungsparametern [7] gegebenen Werte ist. An diese Tests soll hier angeknüpft werden und insbesondere Parameter für DRM mit einer 64-QAM Modulation untersucht werden.

Die gemessenen Daten sollten mit verschiedenen Feldstärkeprognosen verglichen werden. Die Prognosen wurden von der BNetzA mit verschiedenen Ausbreitungsmodellen berechnet. Außerdem wurden die Messdaten der Universität des Baskenlandes (UPV/EHU) zur Verfügung gestellt um ein dort entwickeltes, an der ITU-R P.1546 angelehntes, Planungtool für die direkte Ausbreitung im 11-m-Band zu überprüfen (siehe [8]).

Ein weiterer Aspekt, der mit der Messung untersucht werden sollte, war die Höhenabhängigkeit der Feldstärke des Empfangssignals. Bei einem Feldtest in Hannover 2006 wurden Signaleinbrüche des Empfangspegels bei einer Höhe von 4,50 m festgestellt.

Da es trotz Sonnenfleckenminimum zu Raumwellenausbreitung kommen kann, wurde unter Amateurfunkern und ambitionierten Kurzwellenhörern darum gebeten, uns Empfangsberichte zu senden. Die Universität des Baskenlandes (UPV/EHU) in Bilbao betreibt ein DRM Monitoringsystem, in dem das Signal aus Hannover integriert wurde.

3.2.1 Equipment

Sendeequipment

Der Sender wurde mit den folgenden Geräten und Einstellungen betrieben:

• Frequenz: 26,045 MHz

• Leistung: 80 W ERP

• Antennenhöhe: 70 m

• Antennenstandort: Appelstr. 9A, Hannover, lat: 52.388, long: 9.712

• Modulator: Thomson Skywave 2000

• Endstufe Thomson/Hitachi TN-1000-1 500W

• Sendeantennen: Thomson 26 MHz Monopol, Ground-Plane GP27

Der Thomson 26 MHz Monopol hat einen Antennengewinn von 1,75 dBi, entsprechend -0,45 dBd. Die GP-27 hat einen Antennengewinn von 0 dBd.

Bei den verwendeten Antennen, sowohl der GP27 als auch dem Thomson Monopol, handelt es

sich um rundstrahlende, vertikal polarisierte Antennen. Diese haben in Richtung ihrer Antennenachse, vertikal nach oben, keine und im Bereich hoher Elevationswinkel, gegen die Horizontale gemessen, geringe Abstrahlung. Dies ist Voraussetzung für eine vornehmlich auf die Bodenwelle gestützte Ausbreitung, da nur geringe Strahlungsanteile für eine mögliche Raumwellenausbreitung zur Verfügung stehen. Je geringer die vertikale Halbwertsbreite der Antennencharakteristik, desto ausgeprägter ist dieser Effekt.

Grundgedanke der von Thomson entwickelten Antenne war die Bereitstellung einer mechanisch robusten sowie elektrisch hoch belastbaren Antenne, die auch unter widrigsten Umweltbedingungen einen hohen Grad an Zuverlässigkeit bietet.

Empfänger/Messgeräte

- Empfangsantennen: Rohde & Schwarz HE 010 Stabantenne auf einer Metallfläche auf dem Fahrzeugdach (Höhe: 1,50 m) montiert, Reusenantenne (Schwarzbeck BBA 9106 für Höhenmessungen)
- Feldstärkemessungen: Rohde & Schwarz FSH-6 Spectrum Analyser/Rhode & Schwarz ESCE Messempfänger
- SNR/Audioqualität: DReaM Software DRM Empfänger in M-AUDIO FAST TRACK Pro USB Soundkarte, SatSchneider DRT1 Tuner
- GPS: Garmin GPSmap 60 GPS-Empfänger

3.2.2 DRM-Parameter

Da bei DRM für die lokale Verbreitung im 11-m-Band die Bodenwellenausbreitung von Interesse ist, werden hier die Moden A und B verwendet. Bei Verwendung der 64 QAM, einer Bandbreite von 10 kHz und eine UEP (Unequal Error Protection) mit Protection Level 0 (Coderate = 0,5) für Part A und Protection Level 1 (Coderate = 0,6) für Part B, wird eine Datenraten von 26,480 kbps erreicht. Die Verwendung des längeren Interleavers (über 2 ms) hat sich in vorherigen Tests als robuster erwiesen. Bei vorherigen Messungen stellte sich heraus, dass der mobile Empfang im Mode B besser ist als im Mode A, daher wurden vergleichende mobile Messungen in Mode A und B durchgeführt. In Mode B wurde ebenfalls UEP mit mit Protection Level 1 (Coderate = 0,6) für Part A und Protection Level 2 (Coderate = 0,71) für Part B verwendet, bzw. bei einer Messfahrt Protection Level 0 (Coderate = 0,5) für Part A und Protection Level 1 (Coderate = 0,6) für Part B. Die verwendeten Protection Level und Datenraten werden in der folgenden Tabelle zusammengefaßt.

| Verwendete Protection Level und Datenraten | | | |
|--|-------------------|------------------|--|
| Modus | PL (Part A/PartB) | Datenrate [kbps] | |
| A | 0/1 | 26,5 | |
| В | 0/1 | 21 | |
| В | 1/2 | 24,7 | |

In [7] wird für die genannten Einstellungen bei einer Bandbreite von 9 kHz, um eine Bitfehlerrate $< 10^{-4}$ zu erreichen, ein minimales HF-SNR von 15,3 dB für den AWGN Kanal und

Protection Level (PL) 1 angegeben. Der Wert für 10 kHz Bandbreite wird nicht angegeben, müsste aber leicht darüber liegen. Dies entspricht nach [7] Annex 1 einer minimalen Feldstärke von 19,8 $dB\mu V/m$. Für Mode B wird ein HF-SNR von 15,9 dB (entsprechend 20,4 $dB\mu V/m$) für PL 1 und 17,7 dB (entsprechend 22,1 $dB\mu V/m$) für PL 2 angegeben. Nicht berücksichtigt sind dabei die Kanalübertragungseigenschaften, die die benötigte minimale Feldstärke noch erhöhen. Messungen in Nürnberg und Mexiko Stadt haben gezeigt, dass der Wert stark vom Rauschpegel abhängig ist. So wurde bei Feldtests an der Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg für Mode A, 4-QAM SDC Mode, 16-QAM, Coderate: 0.62 und einer Bandbreite von 10 kHz eine minimale Feldstärke von 23 dB $\mu V/m$ festgestellt [9]. In Mexiko Stadt wurden aufgrund des hohen Rauschlevels mit Robustnessmode B, einer Bandbreite von 10 kHz, 16 QAM und einer Coderate von 0,5 für den mobilen Empfang 37 $dB\mu V/m$ benötigt [6].

2006 wurden Messungen mit der Ground-Plane GP27 Sendeantenne und verschiedenen Empfangsantennen durchgeführt. Die Messorte bei den jetzigen Messungen wurden teilweise von den vorherigen Messungen übernommen, da sich jedoch der Antennenstandort geändert hat und ein Dachaufbau jetzt auf der anderen Seite der Antenne ist, können die Messungen nur bedingt verglichen werden.

3.2.3 Stationäre Messungen

Die Sendeantenne war am südwestlichen Rand des Daches des Universitätsgebäudes in der Appelstrasse 9A montiert. In nordwestlicher Richtung befand sich ein Dachaufbau von ca. 2,70 m Höhe. Eventuell auftretende Abschattungen mussten also berücksichtigt werden.

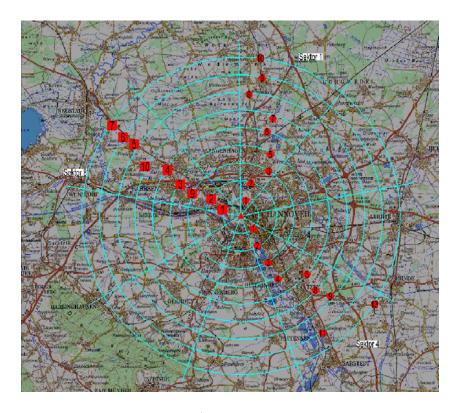


Abbildung 3.7: Messpunkte- und sektoren (Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

Gemäß Messvorschrift BNetzA (Wiener Abkommen) wurden Clustermessungen durchgeführt. Die Messfläche (Cluster) ist dabei 10 λ x 10 λ , für das 11-m-Band also ca. 110 x 110 m. Der Abstand der Messpunkte ist ca. 0,8-0,9 λ , hier also ca. 8,8 m. Weichen die ersten 5 Messwerte voneinander um nicht mehr als 5 dB ab, so ist keine weitere Messung notwendig. Ist die Abweichung > 5 dB, ist jedoch an 11 Messpunkten zu messen. Abbildung 3.7 zeigt die Messpunkte in einem Abstand von Vielfachen von 2 km vom Sender.

Ergebnisse der stationären Messungen

Die Abbildungen 3.8 - 3.10 zeigen die Ergebnisse der stationären Feldstärkemessungen mit den beiden Sendeantennen im Vergleich.

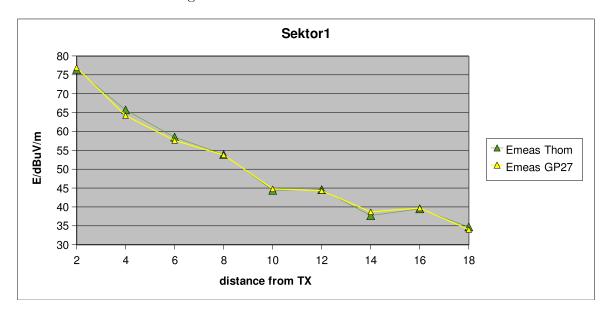


Abbildung 3.8: Vergleich der Messungen in Sektor 1

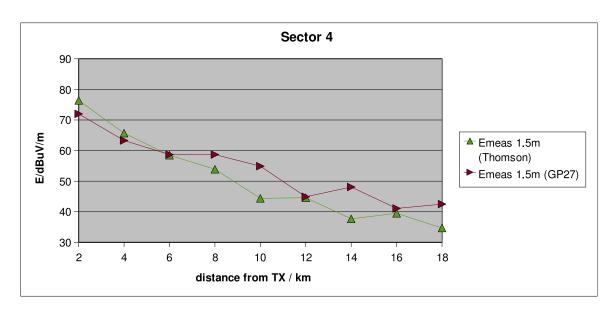


Abbildung 3.9: Vergleich der Messungen in Sektor 4

Es ist zu sehen, dass die beiden Sendeantennen sehr ähnliche Ergebnisse liefern. Einzelne Abweichungen (z.B. Abbildung 3.9 bei 10 km Abstand vom Sender) können dadurch zu erklären

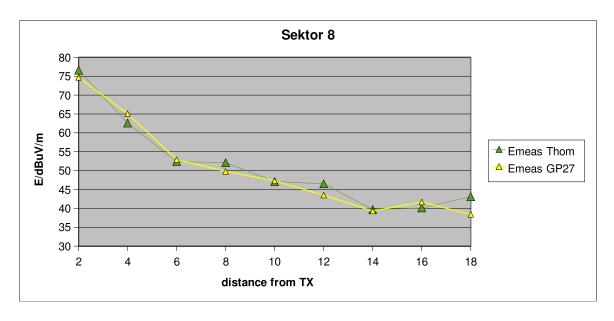


Abbildung 3.10: Vergleich der Messungen in Sektor 8

sein, dass es nicht möglich war, an exakt den selben Messpunkten nochmals zu messen, da zum Beispiel ein Parkplatz belegt war.

Vergleich der Messungen mit den Prognosen

Die Abbildungen 3.11 bis 3.13 zeigen die gemessenen Werte mit der GP27 Antenne im Vergleich zu Feldstärkeprognosen, die von der BNetzA mit verschiedenen Ausbreitungsmodellen erstellt wurden.

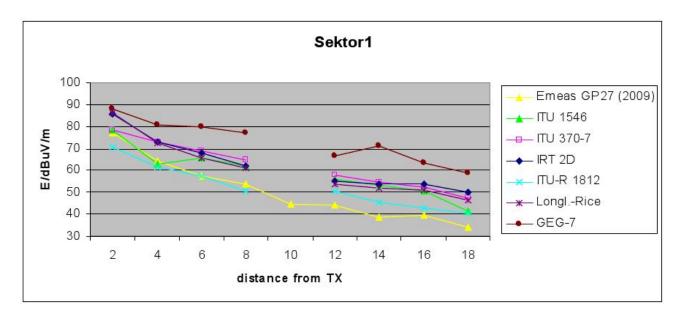


Abbildung 3.11: Vergleich der Messungen mit den Prognosen in Sektor 1

Dabei zeigt sich, dass das GEG-7 Modell, das von der Gemischten Experten Gruppe ARD/DBP entwickelt wurde, grundsätzlich zu hohe Feldstärkewerte errechnet. Dieses Modell basiert auf der Epstein-Peterson Methode, die auf jedem Hindernis einen imaginären Sender, der mit einem bestimmten Dämpfungsfaktor gegenüber dem vorhergehenden versehen ist. Dies wird mit einem

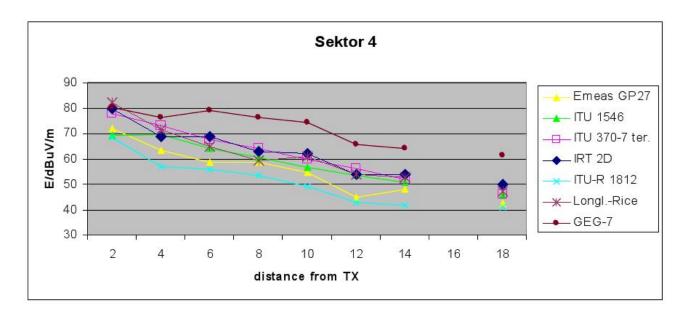


Abbildung 3.12: Vergleich der Messungen mit den Prognosen in Sektor 4

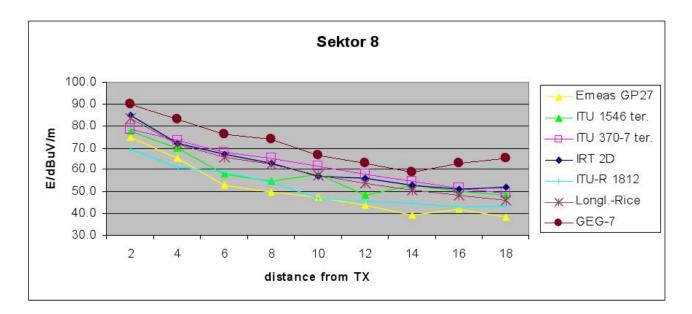


Abbildung 3.13: Vergleich der Messungen mit den Prognosen in Sektor 8

modifizierten "free space" Modell kombiniert [10].

Das deterministische Ausbreitungsmodell, beruhend auf der ITU-R 1812, kommt den gemessenen Werten am nächsten und berechnet meist eine geringe negative Abweichung des gemessenen Wertes.

Die mit dem statistischen Modell, beruhend auf der ITU-R 1546, berechneten Werte weisen eine geringe positive Abweichung auf. Gegenüber dem Vorgängermodell, der ITU-R 370-7 haben die berechneten Werte mit der ITU-R 1546 kleinere Abweichungen.

Das Longley Rice Modell des US Institute for Telecommunications Science (ITS) wurde in den 1960ern entwickelt und kann detailierte Oberflächenstrukturen zwischen Sender und Empfänger miteinbeziehen. Dies ergibt ähnliche Ergebnisse, wie die nach ITU-R 370-7 berechneten Werte.

Das IRT-2D Modell basiert auf einem modifizierten Deygout-Modell [10]. Dieses unterscheidet die Hindernisse zwischen Sender und Empfänger in dominante und weniger dominante, was in die Dämpfungskoeffizienten mit eingeht [11]. Auch hier sind die Ergebnisse recht ähnlich zu den vorhergehenden.

Zusätzlich wurde von Iván Peña von der Universität des Baskenlandes (UPV/EHU) eine speziell für den Frequenzbereich 26 MHz angepaßte Version des Ausbreitungsmodells nach ITU-R P.1546 entwickelt und die Messwerte mit den prognostizierten verglichen, um die Anwendbarkeit des Modells für diesen Frequenzbereich zu verifizieren. Eine ausführliche Analyse des Vergleichs unter Berücksichtigung topographischer Daten und der Umgebung der Messpunkte mit dem Ergebniss, eines mittleren Messfehlers von unter 3 dB, ist in [8] zu finden.

3.2.4 Mobile Messungen

Bei den mobilen Messungen wurde entlang von radialen Routen auf der B6 und der B441 in Sektor 8 in einem Abstand von ca. 2-18 km vom Sender die Feldstärke, das (berechnete) SNR und die Audioqualität gemessen. Jeweils einmal für Robustnessmode A und B, wobei Mode B einmal mit PL 0/1 gemessen wurde, ansonsten mit PL 1/2.

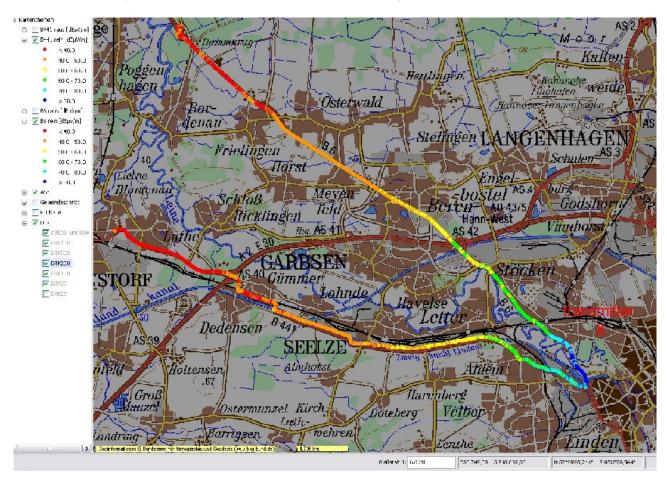


Abbildung 3.14: Feldstärkeverteilung bei den mobilen Messungen mit der GP27 (Karte: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Abbildung 3.14 zeigt die radialen Routen (B6 oben und B441 unten), auf denen jeweils gemessen

wurde. Hier ist die Feldstärkeverteilung bei der Messung mit der GP27 Antenne eingetragen. Im Folgenden sind in die Graphen jeweils links die Feldstärke und Audioqualität als Verhältnis zwischen korrekt dekodierten Audioframes und in einem Frame enthaltene Audioframes und rechts das von DReaM berechnete SNR eingezeichnet.

Auswertung der mobilen Messungen mit der Thomson Sendeantenne

Abbildung 3.15 bis 3.17 zeigen die Graphen mit Feldstärke, Audioqualität und SNR für die Messungen mit der Thomson Antenne. Auf der B6 konnte das Signal bis ca. 14 km vom Sender entfernt fast fehlerfrei empfangen werden. Im Robustnessmode B ein wenig weiter als im Mode A. Auf der B 441 war im Mode B schon ab ca. 12 km kein durchgehender Empfang mehr möglich.

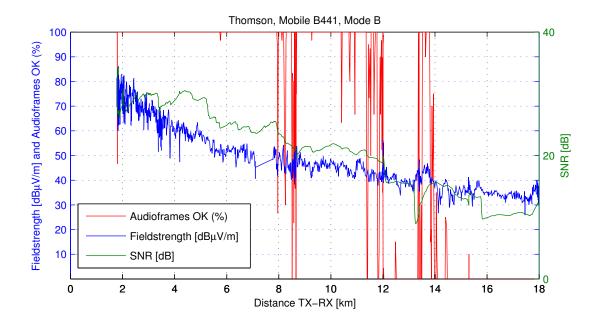


Abbildung 3.15: Mobile Messung entlang der B 441 in Mode B mit der Thomson Antenne

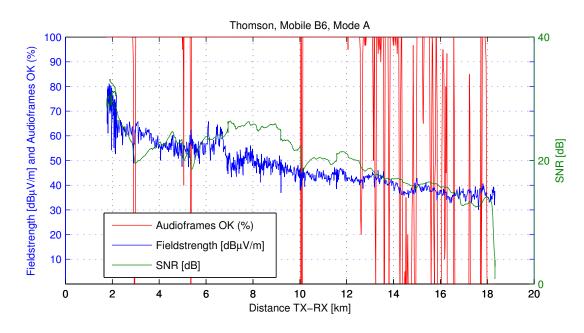


Abbildung 3.16: Mobile Messung entlang der B 6 in Mode A mit der Thomson Antenne

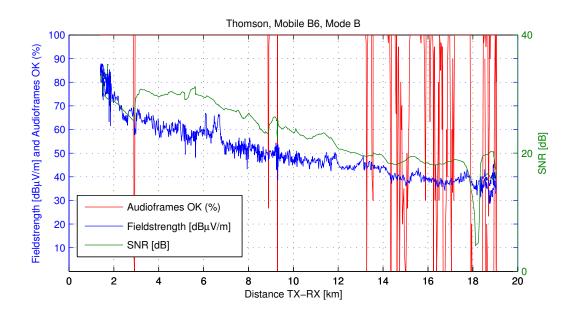


Abbildung 3.17: Mobile Messung entlang der B 6 in Mode B mit der Thomson Antenne

Die geringere Reichweite kann an dem Dachaufbau, der sich in Richtung B 441 ziemlich direkt vor der Antenne befindet, liegen. Die berechneten SNR-Werte liegen je bei etwa 20 dB an der Grenze des Versorgungsgebiets, was bei einer Feldstärke von ca. 40 $dB\mu V/m$ der Fall ist.

Auswertung der mobilen Messungen mit der GP27 Sendeantenne

Die Messungen mit der GP 27 Antenne entsprechen weitgehend denen mit der Thomson Antenne durchgeführten. Entlang der B 441 (Abbildung 3.18 und 3.19) ist ein Empfang bis zu einer Entfernung von ca. 12 km vom Sender möglich, im Mode B etwas weiter als im Mode A. Entlang der B 6 geht die Reichweite wieder bis ca. 14 km (Abbildung 3.20 und 3.21).

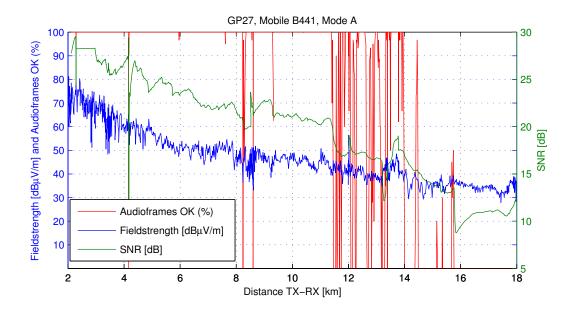


Abbildung 3.18: Mobile Messung entlang der B 441 in Mode A mit der GP27 Antenne

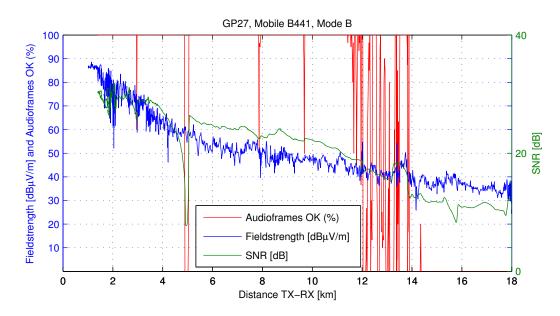


Abbildung 3.19: Mobile Messung entlang der B 441 in Mode B mit der GP27 Antenne

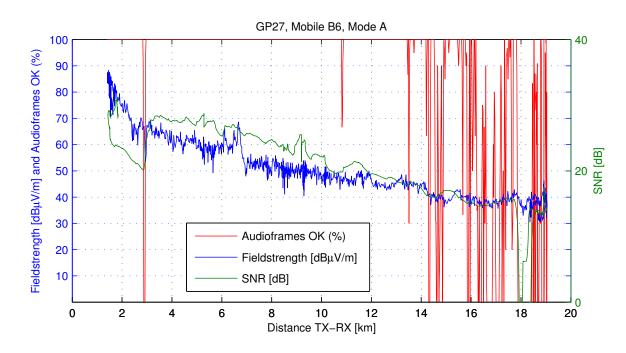


Abbildung 3.20: Mobile Messung entlang der B 6 in Mode A mit der GP27 Antenne

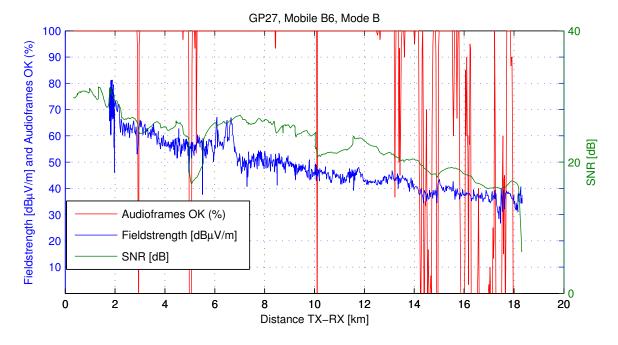


Abbildung 3.21: Mobile Messung entlang der B 6 in Mode B mit der GP27 Antenne

Abbildung 3.22 zeigt Messungen im Mode B mit den selben Protectionleveln wie im Mode A Betrieb (Part A:0,5 Part B: 0,6). Hier war ein Empfang bis ca. 16 km vom Sender entfernt möglich, jedoch mit einer geringeren Datenrate.

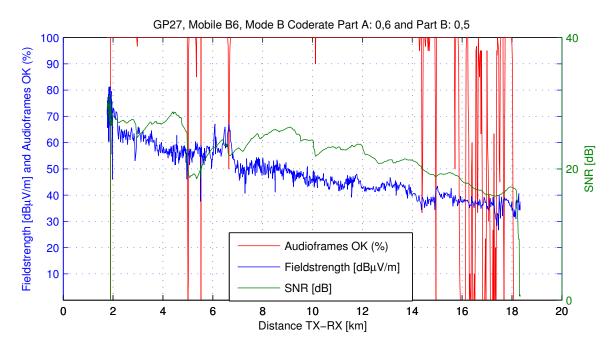


Abbildung 3.22: Mobile Messung entlang der B 6 in Mode B, Coderate 0.5/0.6 mit der GP27 Antenne

Vergleich der Feldstärke der beiden Sendeantennen

Abbildung 3.23 und 3.24 zeigen die Feldstärken, die bei den mobilen Messungen gemessen wurden im direkten Vergleich. Die Feldstärke bei der Messung mir der Thomson Antenne ist etwas höher als die mit der GP 27.

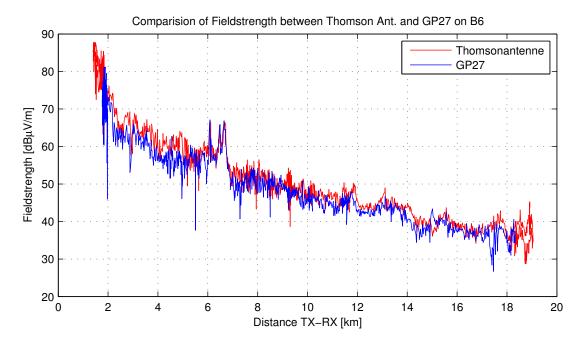


Abbildung 3.23: Vergleich der Feldstärken bei verschiedenen Antennen auf der B6

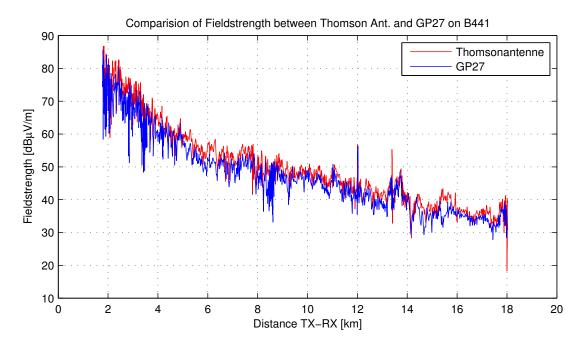


Abbildung 3.24: Vergleich der Feldstärken bei verschiedenen Antennen auf der B441

Weitere mobile Messungen

Weitere mobile Feldstärkemessungen wurden von der Bundesnetzagentur (BNetzA) durchgeführt. Abbildung 3.25 zeigt die Ergebnisse einer Messfahrt in Sektor 1, mit der GP27 als Sendeantenne, Abbildung 3.26 zeigt die Ergebnisse einer Messfahrt durch Hannovers Innenstadt.



Abbildung 3.25: Feldstärkeverteilung einer Messfahrt in Sektor 1 (Karte: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

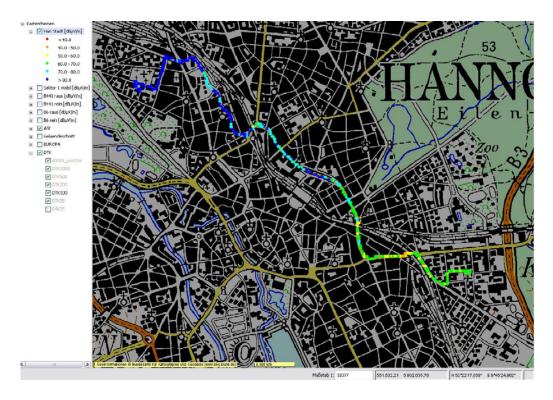


Abbildung 3.26: Feldstärkeverteilung einer Messfahrt in Hannovers Innenstadt (Karte: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

3.2.5 Höhenmessungen

Bei den Höhenmessungen 2006 wurden starke Signaleinbrüche bei einer Höhe von ca. 4,50 m festgestellt. Diesem Effekt sollte nachgegangen und der theoretische Höhengewinn überprüft werden.

Dieser beträgt, je nach Umgebungsprofil, für 26 MHz nach ITU-R P.1546 [12], ausgehend von einer Empfängerhöhe von 10 m, an der entsprechenden Stelle für eine Empfängerhöhe von 1,50 bzw. 3 m folgende Werte:

| Umgebungshöhe | 10 m (Vorstadt) | 20 m (Stadt) | 30 m (Innenstadt) |
|----------------------|-----------------|--------------|-------------------|
| Höhengewinn (1,50 m) | -5,6 dB | -10,2 dB | -13,1 dB |
| Höhengewinn (3 m) | -4.7 dB | -9.6 dB | -12.7 dB |

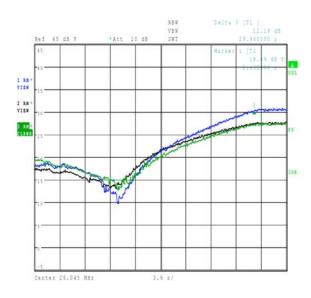
Die Richtlinie ITU P.370-7 [13] gibt für das VHF Band folgende Werte an, ist jedoch durch die ITU-R P.1546 mittlerweile ersetzt.

| Umgebung | Rural | Suburban | Urban |
|----------------------|--------|----------|----------|
| Höhengewinn (1,50 m) | -11 dB | -13,7 dB | -16,5 dB |
| Höhengewinn (3 m) | -7 dB | -8,7 dB | -10,5 dB |

Die folgenden Messungen wurden alle an Messpunkt 6 in Sektor 1 am 29.6.2009 durchgeführt.

30 DRM im 11-m-Band

Bei Messungen mit der HE010 Antenne und einem Faltdipol an einem höhenverstellbaren Metallmast trat der gleiche Effekt auf, wobei bei der HE010 Antenne durch das fehlende Gegengewicht die Kopplung mit dem Mast deutlich größer war, da der Metalluntergrund als Gegengewicht fehlte. Dadurch betrugen die Signaleinbrüche fast 15 dB. Da der Einfluss des Masten nicht zu ermitteln ist, lassen sich aus den Messungen auch keine sinnvollen Ergebnisse für den Höhengewinn in 10 m Höhe erzielen.



Date: 29.JUN.2009 12:38:35

Abbildung 3.27: Höhenscan 3-9 m mit der Reusenantenne am Mast (blau), 15 cm vom Mast enfernt (grün), 15 cm vom Mast enfernt in andere Richtung gemessen (schwarz)

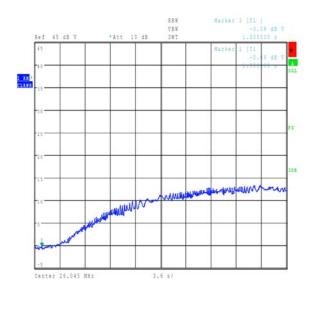
Messungen mit einer Reusenantenne (Schwarzbeck BBA 9106) am ausfahrbaren Mast des Messwagens der BNetzA zeigten einen geringeren Einbruch des Signals bei 4,50 m Höhe. Eine Vergrößerung des Abstands der Antenne zum Mast verkleinerte den Signaleinbruch (Abbildung 3.27).

Abbildung 3.28 zeigt einen Höhenscan der Reusenantenne mit horizontaler Polarisation. Die Signalleistung ist hierbei geringer, jedoch besteht eine gute Entkopplung vom Stativ und es kommt nicht zu einem Einbruch des Signals.

Messungen an einem nicht-metallenen Stativ von 1,50 -10 m konnten nur mit verschiedenen Aufbauten realisiert werden, daher wurden verschiedene Scans für einzelne Höhenabschnitte angefertigt (Abbildung 3.30).

Abbildung 3.29 zeigt das Ergebniss der verschiedenen Abschnitte zusammen mit den Höhenangaben. Der gesamte Höhengewinn von 1,50 m bis 10 m ergibt sich durch Addition der einzelnen Abschnitte zu 9,5 dB, was in etwa den, mit der P.1546 berechneten Werten, bei einer Umgebungshöhe von 20 m entspricht, bzw. etwas geringer als die Berechnung in ländlicher Umgebung mit der P.370-7.

Für großflächigere Höhenmessungen war das Messequipment nicht praktikabel.



Date: 29.JUN.2009 12:26:00

Abbildung 3.28: Höhenscan 3-9 m mit der Reusenantenne in horizontaler Polarisation

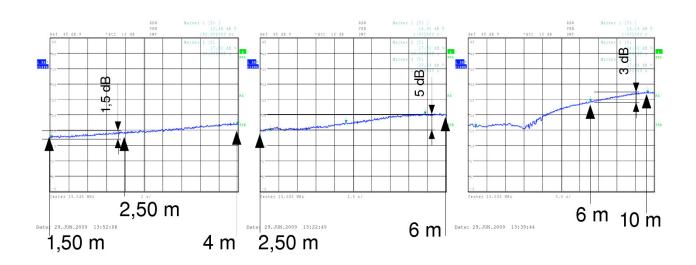


Abbildung 3.29: Höhenscan 1,50-10 m mit der Reusenantenne am Kunststoffmast

32 DRM im 11-m-Band



Abbildung 3.30: Kunststoffstativ auf Messfahrzeug für die Höhenmessungen bis $10~\mathrm{m}$ Höhe

3.3 Raumwellenausbreitung

Aufgrund von Ionisierungen in der Erdatmosphäre kommt es bei bestimmten Tages- und Jahreszeiten zu Reflektionen der Kurzwelle an der Ionosphäre. Dies führt zur Bildung einer Raumwelle mit großer Reichweite und kann zu Störungen zwischen Sendern, die tausende Kilometer voneinander entfernt sind, führen. Dies soll im Folgenden durch Ausbreitungssimulationen im 11-m-Band untersucht werden.

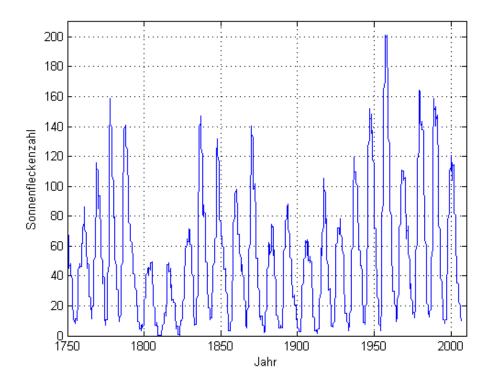


Abbildung 3.31: Sonnefleckenzyklus von 1750 bis heute

Abhängig ist die Intensität der Ionisierung stark von der Zahl der Sonnenflecken, die in einem 11-jährigen Zyklus zu- und abnehmen. Abbildung 3.31 zeigt die monatlich gemittelten Sonnenfleckenzahlen von 1750 bis heute¹.

Abbildung 3.32 zeigt die Sonnenfleckenzahl der letzten Jahre und eine Prognose bis 2019. Hier zeigt sich, dass im Modellversuchszeitraum 2005-2010 ein Sonnenfleckenminimum war und dass 2013/14 mit dem nächsten Sonnenfleckenmaximum zu rechnen ist.

Die Raumwellenausbreitung ist abhängig von der geographischen Lage und der Ionosphärenbeschaffenheit (tages- , jahreszeitl. Änderungen, Sonnenfleckenaktivität). Abbildung 3.33 zeigt den Aufbau der Ionosphärenschichten. Die D-Schicht in ca. 60 - 90 km Höhe ist tagsüber vorhanden, die Ionisation ist abhängig vom Sonnenstand. Die Ionenkonzentration reicht nicht aus, die Kurzwelle (KW) zu reflektieren, KW durchdringt sie und wird stark gedämpft.

Die E-Schicht in ca. 100 - 130 km Höhe ist tagsüber vorhanden, die Ionisation entspricht dem

¹National Geophysical Data Center, http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsunspotnumber.html

DRM im 11-m-Band

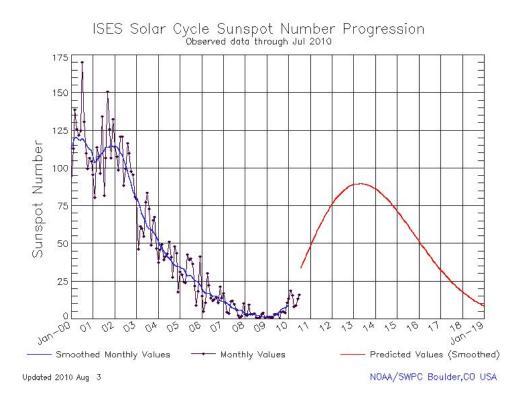


Abbildung 3.32: Sonnefleckenzyklus Prognose

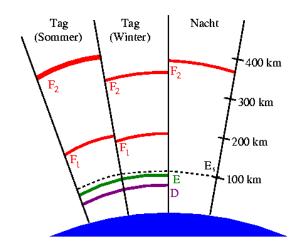


Abbildung 3.33: Die Ionosphäre (Quelle: Wikipedia)

Sonnenstand. Sie reflektiert Frequenzen ab 1,5 MHz bereits morgens.

Die E_s -Schicht in ca. 100-120 km Höhe tritt sporadisch im Sommer abhängig von der Sonnenfleckenaktivität auf, dabei kann es auch zu Überreichweiten im UKW-Bereich kommen, KW-Verbindungen können teilweise zusammenbrechen.

Die F1-Schicht in ca. 170-220 km Höhe ist tagsüber vorhanden, nachts geht sie mit der F2-Schicht zusammen, wobei durch die große Höhe des Reflektionspunktes weite Entfernungen überbrückt werden können. Die F2-Schicht in ca. 250 - 400 km Höhe ist Tag und Nacht vorhanden.

Während die Kurzwelle durch die D- und E-Schicht hauptsächlich gedämpft wird, erfolgt an den F-Schichten eine Reflektion.

Raumwellen-Ausbreitungsprognosen

Die folgenden Ausbreitungsprognosen wurden mit dem Kurzwellenausbreitungsprogramm ITSHF des Institutes for Telecommunication Sciences, Boulder, erstellt. Senderstandort war Hannover, mit einer Groundplaneantenne, die die Eigenschaften der bei den Messungen Verwendeten GP27 entspricht und einer Sendeleistung von 100 W ERP.

Da sich die Ionosphäre in Abhängigkeit der Sonnenaktivität, der Tages- und Jahreszeit ändert, wurden exemplarisch Feldstärke- und SNR- (Signal-Rausch-Abstand) Diagramme für Sonnenfleckenzahlen (SSN) von 50, 100 und 150 erstellt, jeweils für Januar, März, Mai, Juli, September und November und für 0 bzw. 24 Uhr, 6 Uhr, 12 Uhr und 18 Uhr. Die Graphen befinden sich im Anhang A.1-A.3. Um für die Zeiten mit hoher Sonnenfleckenzahl genauere Ergebnisse zu bekommen, über welche Zeiträume die Störungen auftreten wurden in Anhang A.4 Prognosen im stündlichen Abstand erstellt.

Aus den Graphen läßt sich, die durch die Raumwelle erzeugte Feldstärkeverteilung, ablesen. Die größte Signalstärke tritt mit 23,3 $dB\mu V/m$ bei einer Sonnenfleckenzahl von 150 im November um 12 Uhr auf (Abbildung 3.34 (links)). Feldstärken von 23 $dB\mu V/m$ und 21 $dB\mu V/m$ treten

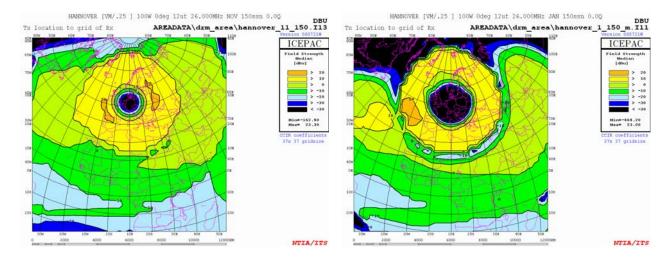


Abbildung 3.34: Ausbreitungsprognose für November (links) und Januar (rechts), 12 Uhr, SSN=150

im Januar bzw. März um 12 Uhr ebenfalls bei einer Sonnenfleckenzahl von 150 auf (Abbildung 3.34 rechts und 3.35 links).

Während im November die höchsten Feldstärken in einem Abstand von ca. 2000 km vom Senderstandort auftreten, beträgt der Abstand im Januar und März ca. 2800 km.

Ausgehend von einer Versorgungsfeldstärke von 35 $dB\mu V/m$ und einem benötigten minimalen Signal-zu-Rausch Abstand $SNR_{min}=15$ dB, zur zuverlässigen Decodierung der Audiodaten, treten in den Wintermonaten im Sonnenfleckenmaximum geringfügige Störungen auf. Dies betrifft einerseits den Empfang von Sendern in dem Gebiet, in dem die Raumwelle wieder auf den Boden trifft. Gleichzeitig kann auch der DRM-Sender durch andere, auf der gleichen Frequenz arbeitende Sender an den jeweiligen Orten der hohen Feldstärke, gestört werden.

36 DRM im 11-m-Band

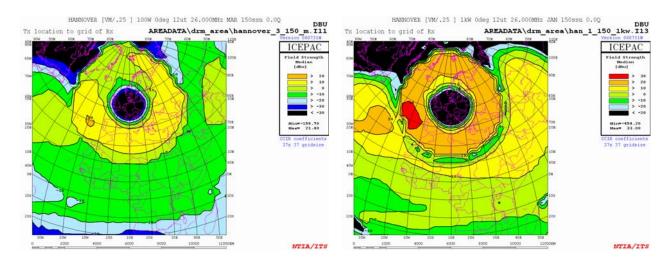


Abbildung 3.35: Ausbreitungsprognose für März 12 Uhr (links) und Januar 12 Uhr mit 1kW Sendeleistung (rechts), 12 Uhr, SSN=150

Die in Anhang A.4 aufgeführten Prognosen für November, Januar und März zeigen, dass die Feldstärken über 20 $dB\mu V/m$ im November zwischen 9 und 14 Uhr, im Januar zwischen 10 und 13 Uhr und im März zwischen 10 und 14 Uhr auftreten, wobei sich die Orte und die Ausdehnung der Orte hoher Feldstärke über die Zeit verändern.

Für die störungsfreie Versorgung mit DRM im 11-m-Band ist also eine Frequenzplanung nötig, die die Nutzung der gleichen Frequenzen in einem Kreisbogen mit einem Innenradius von ca. 1800 km und einem Außenradius von ca. 3000 km ausschließt. Dies gilt für eine Sendeleistung von 100 W ERP.

Bei einer Erhöhung der Sendeleistung auf 1 kW ERP verbreitert sich die Zone, in der im Sonnenfleckenmaximum Störungen auftreten können deutlich (Abbildung 3.35 rechts). Bei größerer Sendeleistung muss die Planung entsprechend angepasst werden.

$3.3.1\,$ Überreichweiten während des Feldtests

Obwohl die Messungen im Zeitraum eines Sonnenfleckenminimums durchgeführt wurden, kam es zu Raumwellenausbreitungen.

Die Universität des Baskenlandes (UPV/EHU) betreibt ein Monitoringsystem, in das der Sender in Hannover mit aufgenommen wurde. Dabei wurden die Aussendungen aus Hannover mehrmals in Bilbao (Entfernung zum Sender: 1135 km) empfangen. Empfangsberichte erreichten den Modellversuch u.a. aus Viechtach im Bayerischen Wald, aus Leibnitz in Österreich und aus Paris.



Pilot Trial DRM Hannover

Abbildung 3.36: QSL-Karte des Modellversuchs

38 DRM im 11-m-Band

4 DRM+ Sende- und Empfangsequipment

In diesem Kapitel werden Konzepte der Sende- und Empfangstechnik für das digitale Rundfunksystem DRM+ vorgestellt.

Die Basis des Senders ist ein Modulator, der das DRM+ Basisbandsignal generiert. Der Modulator erhält die Daten von einem *Content Server* und erzeugt daraus digitale Abtastwerte des Sendesignals im Basisband. Der Aufbau des Modulators wird im Abschnitt 4.1.1 beschrieben.

Zur Erzeugung des analogen Sendesignals aus digitalen Werten des Basisbandsignals wird im Rahmen dieser Arbeit ein direkter Aufwärtsmischer benutzt.

Der DRM+ Empfänger wurde letztlich als Superheterodynempfänger realisiert. Die Leistungsfähigkeit des Empfängers wird zunächst anhand der Basisbandsimulationen verifiziert. Die Ergebnisse der Simulation und der Implementierung des Empfängers werden im Abschnitt 4.2 beschrieben.

4.1 Sendertechnik

Ein moderner Sender für ein digitales Rundfunksystem ist ein komplexes Zusammenspiel einzelner Systemkomponenten. Das Radioprogramm, bestehend aus Audio- und Multimediadaten, muss encodiert und entsprechend dem Sendeplan vorbereitet werden. Diese vorbereiteten Daten werden dann zu dem eigentlichen Modulator des Sendesignals transportiert. Nach der Modulation folgt die Verstärkung des Signals und die Zuführung zu einer Antenne.

Die meisten Hersteller spezialisieren sich auf die Entwicklung und Herstellung einzelner Komponenten. Um dennoch die richtige Funktionalität der Systemmodule untereinander zu gewährleisten, bedarf es einer präzisen und gut strukturierten Schnittstellenbeschreibung. Für das DRM-System wurden spezielle Protokolle und Schnittstellen definiert:

- DCP (ETSI TS-102 821) [14]. Dieses Protokoll stellt Transportmechanismen für Applikationen, die auf spezielle Anforderungen des Rundfunks abgestimmt sind, bereit. Es gewährleistet eine zuverlässige Übertragung sowohl für uni- als auch bidirektionale Kommunikation. Die definierten Übertragungswege sind serielle Verbindungen, UDP/IP und TCP/IP Netzwerke sowie das Speichern und Lesen aus Dateien.
- MDI (ETSI TS-102 820) [15]. Dieses Interface ist ein Anwendungsprotokoll und dient zur Übertragung der DRM-Multiplex-Daten vom *DRM Content Server* zum DRM-Modulator. Einzelne Elemente des DRM-Multiplexes werden entsprechend dem DCP-Protokoll verpackt. Zu den Elementen des DRM-Multiplexes gehören u.a.:
 - FAC-Informationen
 - SDC-Informationen

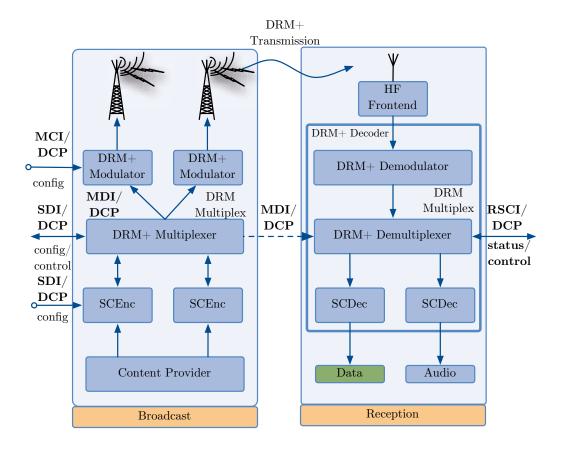


Abbildung 4.1: Systemkomponenten und die standardisierten Schnittstellen im DRM+ System.

- Daten des MSC-Kanals
- Übertragungsmodus¹

Damit der DRM-Modulator ein vollständiges DRM-Signal generieren kann, müssen diese Daten zwingend im Datenstrom enthalten sein. Optional können weitere in der MDI-Spezifikation beschriebene Elemente übertragen werden. Für ein SFN-Netzwerk ist in jedem MDI-Paket eine Zeitmarke enthalten. Diese Information definiert den Zeitpunkt, wann mit der Aussendung des dazugehörigen Übertragungsrahmens begonnen werden soll. Darüber hinaus kann der MDI-Datenstrom, wie in Abbildung 4.1 dargestellt, auch direkt dem Empfänger zu Test- und Überwachungszwecken zugeführt werden.

• Receiver Status and Control Interface (RSCI) (ETSI TS 102 349) [16]. Über diese Schnittstelle kann ein DRM-Empfänger einerseits Empfangs- und Messdaten liefern und andererseits gesteuert werden. Als Statusinformation kann z.B. die Empfangsfrequenz, Art der Demodulation, Synchronisationsstatus und Übertragungsmodus übertragen werden. Die Messdaten sind z.B. Empfangssignalpegel, Bitfehlerrate oder die Modulationsfehlerrate. Mit dieser Schnittstelle kann ein automatisches Überwachungssystem einfach aufgebaut werden. Um die Ergebnisse der Messung unterschiedlicher Hersteller vergleichen zu können, wurden in diesem Standard auch die Verfahren zur Berechnung der Messwerte definiert.

¹engl. Robustness Mode

4.1 Sendertechnik 41

Durch diese Strukturierung können Module von unterschiedlichen Herstellern verwendet werden. Die Systembetreiber bleiben in dieser horizontalen Struktur unabhängig von den Herstellern und können das System flexibel gestalten. Abbildung 4.1 gibt eine Übersicht aller Systemkomponenten und der standardisierten Schnittstellen im DRM+ System.

Dieser Abschnitt konzentriert sich auf die Modulation des Sendesignals und die Demodulation des Empfangssignals. Es wird angenommen, dass der DRM-Modulator schon fertig encodierte und nach dem DRM-Standard zusammengesetzte Daten von einem *Content Server* erhält. Diese Daten werden dem Modulator über die MDI-Schnittstelle zur Verfügung gestellt.

Auf der Empfängerseite ist die RSCI-Schnittstelle implementiert, die die Auswertung der Empfangsqualität während Feldtests erleichtert. Andere Schnittstellen spielen für diese Arbeit eine untergeordnete Rolle. Aus diesem Grund wird hier auf eine detaillierte Beschreibung dieser Schnittstellen und Protokolle verzichtet.

4.1.1 DRM+ Basisbandsignalgenerator

In diesem Abschnitt wird die Implementierung des DRM+ Modulators dargestellt.

Abbildung 4.2 zeigt das Blockschaltbild des DRM+ Basisbandmodulators.

Die Realisierung des Basisbandmodulators verwendet zwei digitale Signalprozessoren. Die Aufgabe des ersten digitalen Signalprozessors (DSP 1) ist vor allem die Kommunikation mit dem Content Server. Die dort vorbereiteten Daten werden über eine Ethernet-Schnittstelle übertragen. Als Transportprotokolle werden DCP und MDI verwendet.

Des Weiteren übernimmt er die Steuerung und die Kontrolle weiterer Komponenten. Die Parameter wie z.B. die IP-Adresse, Sendefrequenz, DAC-Register werden von einem Steuerrechner über die RS232-Schnittstelle entgegengenommen. Die integrierten Komponenten werden dann über die seriellen Datenbusse SPI und I2C gesteuert. Der verwendete digitale Signalprozessor ist ein ADSP-BF537E des Herstellers *Analog Devices* [17]. Dieser Prozessor verfügt über eine integrierte Ethernet-Schnittstelle und erleichtert hierdurch die Implementierung des MDI/DCP-Protokolls.

Der zweite digitale Signalprozessor (DSP 2) übernimmt die Modulation des DRM+ Signals und die spektrale Formung des OFDM-Signals. Zusätzlich kann in diesem digitalen Signalprozessor ein Algorithmus zur Reduzierung des Crest-Faktors aktiviert werden. Hier wurde ein ADSP-BF533 [18] verwendet.

Am Ausgang des Modulators stehen die I/Q-Komponenten des modulierten Basisbandsignals in digitaler Form bereit. Jeder Wert des abgetasteten Signals wird in 16-Bit dargestellt. Diese Auflösung erlaubt eine höhere Signaldynamik als 12-Bit oder 14-Bit und dennoch bleiben die Digital-Analog-Wandler leicht zu beschaffen und kostengünstig.

Abbildung 4.3 zeigt die Platine des DRM-Modulators, der im Laufe des Modellversuchs entwickelt wurde. Das modulierte Signal wird mit Hilfe der Digital-Analog-Wandler in ein analoges Signal gewandelt.

Als eine Option kann dieses Signal auch in digitaler Form über eine asynchrone serielle Schnittstelle für die Weiterverarbeitung zur Verfügung gestellt werden. Als sehr praktisch hat

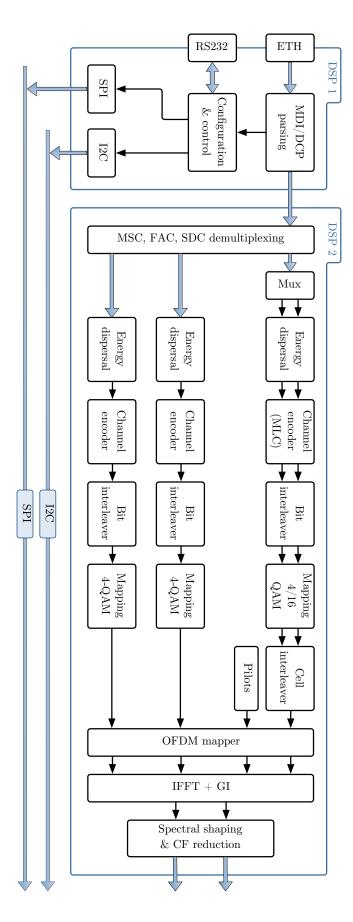


Abbildung 4.2: Blockschaltbild des DRM+ Basisbandmodulators.

4.1 Sendertechnik 43

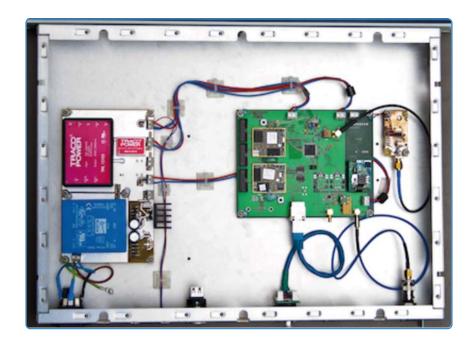


Abbildung 4.3: Der Aufbau des Modulators.

sich an dieser Stelle die AES3-Schnittstelle erwiesen. Diese kann die digitalen Daten von zwei Kanälen mit einer maximalen Abtastfrequenz von 192 kHz übertragen und ist im professionellen Audiobereich sehr verbreitet [19]. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, die Daten über eine Soundkarte aufzunehmen und dann direkt im Rechner zu analysieren. Abbildung 4.4 zeigt ein Diagramm des gesamten Versuchsaufbaus.

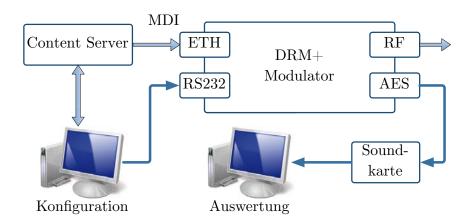


Abbildung 4.4: Messaufbau der DRM+ Sendekette.

4.1.2 Generierung des analogen Sendesignals

Für die Erzeugung des analogen Sendesignals aus den digitalen Basisbanddaten für das digitale Hörfunksystem DRM+ wurden in dieser Arbeit folgende Konzepte untersucht:

- direkte Aufwärtsmischung des Sendesignals,
- eine direkte Generierung des Sendesignals mittels eines Digital-Analog-Wandlers und einer Software Defined Radio (SDR) Realisierung.

Der Vorteil des ersten Ansatzes ist eine einfache Realisierung mit modernen integrierten Chipsätzen. Von Nachteil sind dabei die parasitären Einflüsse der nicht idealen Komponenten, wie z.B. das Phasenrauschen des Lokaloszillators, die Spuren von PLL-Schaltung oder die Unsymmetrie des IQ-Mischers.

In einem SDR Konzept der Sendearchitektur werden Funktionen, die konventionell auf analoger Technik basieren, wie z.B. die Aufwärtsmischung vom Basisband in den HF-Bereich, durch digitale Signalverarbeitung implementiert. Entsprechend hoch sind dann jedoch die Anforderungen an die digitale Signalverarbeitung und es setzt die Verwendung leistungsstärkerer Digital-Analog-Wandler voraus. Im Folgenden wird nur das Konzept der direkten Aufwärtsmischung detailliert betrachtet.

4.1.3 Direkte Aufwärtsmischung

Dieses Konzept ist wegen seiner Einfachheit und guten Integrierbarkeit in modernen Sendern und Mobilfunkgeräten weit verbreitet. Das Sendesignal $s_{TX}(t)$ wird hier direkt aus dem Basisbandsignal ohne eine Zwischenfrequenz erzeugt. Das entsprechend vereinfachte Blockschaltbild zeigt Abbildung 4.5.

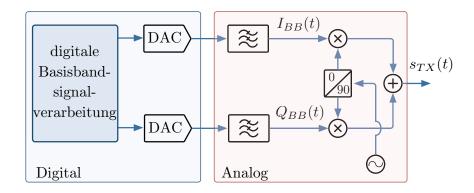


Abbildung 4.5: Vereinfachtes Blockschaltbild eines Senders mit direkter Aufwärtsmischung.

Die beiden Digital-Analog-Wandler wandeln die Inphase- und Quadraturkomponenten des digitalen Basisbandsignals in die analogen Signale $I_{BB}(t)$ und $Q_{BB}(t)$ um. Diese Signale werden mit einem Tiefpassfilter gefiltert und in einem Quadraturmodulator auf eine Trägerfrequenz ω_c moduliert.

$$s_{TX}(t) = I_{BB}(t)\cos(\omega_c t) + Q_{BB}(t)\sin(\omega_c t)$$
(4.1)

Abbildung 4.6 zeigt eine schematische Darstellung des Sendesignals im Frequenzbereich für unterschiedliche Schritte der Signalaufbereitung.

Die Grundabtastfrequenz f_s der Quadraturkomponenten des DRM+ Signals ist 96 kHz. Im Modulator wird ein Signal mit einer Abtastfrequenz von 192 kHz erzeugt (Abbildung 4.6.a),

4.1 Sendertechnik 45

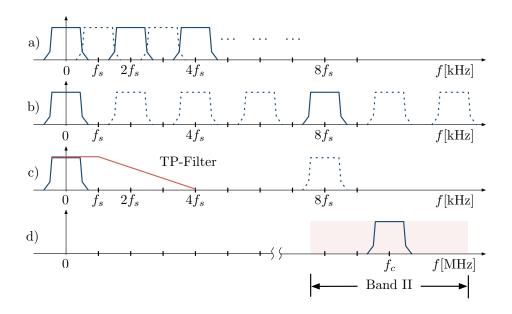


Abbildung 4.6: Das Sendesignal im Frequenzbereich: a) am Ausgang des Modulators, b) nach Interpolation im Digital-Analog-Wandler, c) nach dem TP-Filter, d) das Sendesignal im BP-Bereich.

wodurch die weitere Verarbeitung des analogen Signals vereinfacht wird. Im Digital-Analog-Wandler werden des Weiteren Interpolationsfilter mit dem Interpolationsfaktor zwei verwendet. Die dabei verwendeten Interpolationsfilter sind einfache Halbbandfilter. Das Signal wird somit insgesamt 8x überabgetastet (Abbildung 4.6.b), also mit einer Abtastfrequenz von 768 kHz generiert. Jede Quadraturkomponente des konvertierten analogen Signals wird dann mit einem TP-Filter gefiltert (Abbildung 4.6.c). Das Basisbandsignal wird zuletzt in einem Quadraturmodulator auf die Trägerfrequenz f_c (Abbildung 4.6.d) aufmoduliert.

Praktische Realisierung

Die praktische Realisierung dieses Konzeptes kann in vier Baugruppen unterteilt werden:

- Digital-Analog-Wandler
- Tiefpassfilter
- Quadraturmodulator und Ausgangstiefpassfilter
- Lokaloszillator

Die erste Baugruppe ist ein Digital-Analog-Wandler. Diese Aufgabe übernimmt ein Baustein AD9777 von der Firma Analog Devices [20]. Der AD9777 ist ein zweikanaliger 16-bit Analog-Digital-Wandler. Mit einer maximalen Abtastrate von 400 Msps ist er gut für die Erzeugung des analogen DRM+ Basisbandsignals geeignet. Um die Anforderungen an das Antialiasing-Filter gering zu halten, kann eine interne 2x/4x/8x Interpolation eingeschaltet werden. Ein weiterer Vorteil dieses Wandlers sind die integrierten programmierbaren Verstärker der analogen Ausgangssignale, womit die I/Q-Unsymmetrie des nachgeschalteten analogen I/Q-Modulators ausgeglichen werden kann.

Die nominale Abtastrate des DRM+ Sendesignals ist 96 kHz. Das analoge Tiefpassfilter für die

Aliasingunterdrückung ist mit dieser Abtastrate praktisch nicht realisierbar. Um die Realisierbarkeit dennoch zu gewährleisten, wird das Signal interpoliert. Die erste Interpolationsstufe ist im Modulator. Die Abtastrate des digitalen Ausgangssignals ist 192 kHz. Im Digital-Analog-Wandler wird zusätzlich eine weitere zweifache Interpolation eingeschaltet. Damit reduziert sich die Anforderung an die Filterflankensteilheit enorm.

Das TP-Filter wurde mit folgenden Anforderungen entworfen. Die Welligkeit der Übertragungsfunktion im Durchlassbereich soll möglichst gering sein. Die Interpolationsfilter im Digital-Analog-Wandler, insbesondere die erste Interpolationsstufe, verursachen eine Abschwächung des Nutzsignals bei höhen Frequenzen. Nach dem Modulator wird häufig zusätzlich noch ein Bandpassfilter geschaltet. Alle diese Filter haben keine ideale rechteckförmigen Übertragungsfunktionen, so dass ein ausgestrahltes OFDM-Sendesignal eine Abrundung des Spektrums aufweist, was zu einer zusätzlichen Belastung der Kanalschätzung im Empfänger führen würde.

Ein OFDM-Signal fordert ein Filter mit einem linearen Phasenverlauf. Dabei soll die Gruppenlaufzeit innerhalb des nutzbaren Frequenzbereichs möglichst konstant sein.

Die TP-Filter für die Quadraturkomponenten des Signals wurden als 5-Pol und 7-Pol Filter aus passiven Bauelementen realisiert. Die Möglichkeit, die Filter aus Operationsverstärkern, aufzubauen wurde verworfen, da deren DC-Offsetspannung zu Stabilitätsproblemen führte. Die Übertragungsfunktion und der Phasenverlauf beider Filter sind in Abbildung 4.7 dargestellt.

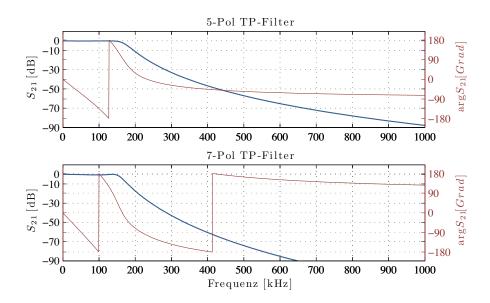


Abbildung 4.7: Die berechneten Übertragungsfunktionen der verwendeten TP-Filter.

Um die konstante Gruppenlaufzeit im interessierenden Frequenzbereich sicherzustellen, wurde die Grenzfrequenz des Filters größer als 48 kHz gewählt. Für ein OFDM-Übertragungssystem ist die kleinere Gruppenlaufzeitdifferenz zu präferieren. Für das Zieldesign wurde aus diesem Grund das fünfpolige TP-Filter genommen.

Die dritte Baugruppe besteht aus einem Quadraturmodulator ADL5385 [21]. Dieser Modulator hat eine sehr gute Phasengenauigkeit und Amplitudenbalance. Zusammen mit den programmierbaren Verstärkern im Digital-Analog-Wandler kann eine gute Trägerfrequenzunterdrückung erzielt werden [22]. Der Quadraturmodulator kann das Sendesignal im Bereich zwischen 50 und

4.1 Sendertechnik 47

400 MHz erzeugen. Somit ist er für alle Frequenzbänder des DRM+ Systems geeignet. Die differentiellen Eingangssignale werden zuerst mit dem Quadratursignal des externen LO-Oszillators multipliziert und zusammenaddiert. In der Realisierung des DRM+ Modulators wurde am Ausgang des Modulators zusätzlich ein TP-Filter mit einer Grenzfrequenz um 230 MHz eingesetzt.

Die vierte Baugruppe in diesem Design ist ein LO-Oszillator. Der verwendete Quadraturmodulator benötigt für die Generierung des Sendesignals die doppelte Sendefrequenz.

$$f_{LO} = 2f_c \tag{4.2}$$

Der DRM+ Modulator soll alle Frequenzen vom Band I bis Band III abdecken, also von 47 bis 230 MHz. Hier wurde ein Oszillator Si570 vom Hersteller Silicon Laboratories eingesetzt [23]. Der Si570 Baustein ist ein Hybridschaltkreis im Keramikgehäuse. Er verwendet einen einfachen Quarz mit der Grundfrequenz von 114,275 MHz und einen DSPLL-Taktsynthesizer. Damit ergibt sich eine frei programmierbare Taktquelle mit geringerem Phasenrauschen. Der Oszillator kann Frequenzen im Bereich zwischen 10 MHz und 1,4 GHz generieren und ist demzufolge ausreichend für das DRM+ Systemkonzept. Die Langzeitstabilität des Oszillators ist im Datenblatt mit ± 20 ppm angegeben. Um die Langzeit- und die Temperaturstabilität des Oszillators zu erhöhen, wird zusätzlich eine geregelte Heizung des Bausteines verwendet.

Ein Blockschaltbild des Gesamtaufbaus ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

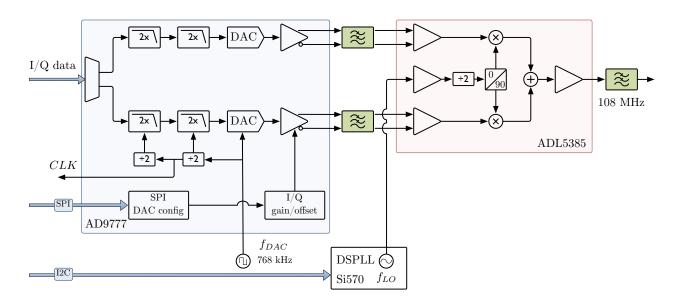


Abbildung 4.8: Blockschaltbild des analogen Teils des DRM+ Modulators mit dem direkten Aufwärtsmischer.

4.1.4 Die Endstufe des DRM+ Senders

Um von der Ausgangsleistung des im Abschnitt 4.1.2 beschriebenen DRM+ Modulators von -15 dBm auf die für einen Feldtest geplante Leistung von 20 W zu kommen, ist eine Verstärkung des Signals um 58 dB erforderlich.

Die Vorverstärkung des Sendesignals übernimmt ein linearer Verstärker ZHL-100W-52 der Firma Minicircuits. Dieser Verstärker arbeitet im A-Betrieb und ist für einen Frequenzbereich von 50-500 MHz ausgelegt. Der IP_3 beträgt laut Datenblatt bei 100 MHz 60,21 dBm. Es wurde bei einer Eingangsleistung von -10 dBm ein IP_3 von 53 dBm gemessen. Der Verstärkungsfaktor dieses Verstärkers ist 50 dB. Ohne Vergrößerung der Außerbandstrahlung des verstärkten Signals kann mit diesem Verstärker ein Pegel von 30 dBm erreicht werden.

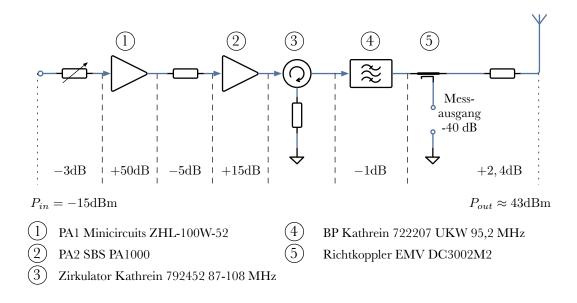


Abbildung 4.9: Der Pegelplan der DRM+ Sendeanlage.

Die restliche Verstärkung wird von einem umgebauten PA1000 FM-Verstärker der Firma SBS erzeugt. Dieser Verstärker arbeitet normalerweise im B-Betrieb und ist für die Verstärkung von FM-Signalen gedacht. Für den linearen Betrieb wurde eine konstante Vorspannung eingebaut. Durch die Einstellung des Ruhestroms lässt sich der Verstärker in den linearen Betrieb bringen. Bei einer Eingangsleistung von 20 dBm wurde ein IP_3 von 47 dB gemessen.

Abbildung 4.9 zeigt den kompletten Pegelplan der aufgebauten DRM+ Sendeanlage.

Das Bandpassfilter am Ausgang des Senders reduziert die Außerbandstrahlung des OFDM-Signals in den Nachbarkanälen. Die Eigenschaften des Sendesignals können am Messausgang eines Richtkopplers mit einem Koppelfaktor von -40 dB gemessen werden. In Abbildung 4.9 ist der Gewinn der Antenne berücksichtigt. Zusammen mit der Dämpfung des Zuführungskabels ergibt sich ein Gewinn von 2,4 dB. Alle Komponenten der Sendeanlage wurden in einem 19"-Schrank montiert. Die Antenne wurde auf dem Dach des Institutsgebäudes auf einem Stahlträger installiert. Die komplette Sendeanlage und die Antenne sind in Abbildung 4.10 dargestellt.

4.2 Der DRM+ Empfänger

Das digitale Hörfunksystem DRM+ unterscheidet sich von den traditionellen analogen Hörfunksystemen AM und FM vor allem durch eine andere Modulationsart des Sendesignals. Die



Abbildung 4.10: DRM+ Sendeanlage 95,2 MHz und die verwendete Sendeantenne.

Eigenschaften des digitalen OFDM-modulierten Signals stellen zusätzliche Anforderungen an die Komponenten des HF-Teils des Empfängers. Die Integration analoger und digitaler Technik in einem Empfänger erfordern neue Konzepte bei der Entwicklung moderner Empfänger.

4.2.1 Die Empfangstechnik des digitalen Rundfunksystems

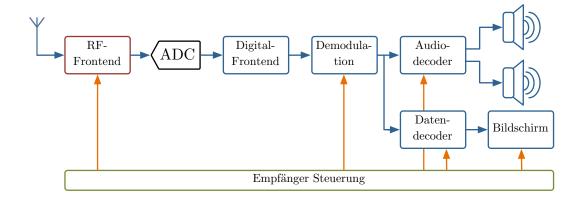


Abbildung 4.11: Blockdiagramm des digitalen Empfängers.

Abbildung 4.11 zeigt das Blockdiagramm eines typischen digitalen Empfängers. Das von der Antenne empfangene Signal wird zunächst in einem RF-Frontend verarbeitet. Dieser Block ist für die Abstimmung auf die Empfangsfrequenz, die Filterung des Signals und die Mischung auf eine Zwischenfrequenz oder direkt ins Basisband zuständig. Das resultierende Signal wird mit einem Analog-Digital-Wandler abgetastet. In einem weiteren Schritt der Signalverarbeitung wird das abgetastete Signal auf eine systemspezifische Abtastrate gebracht, die für die Verwendung der FFT notwendig ist. Anschließend wird das Signal entsprechend dem verwendeten

digitalen Standard demoduliert. Die so empfangenen Daten werden in einem Quellendecoder zum Audiosignal oder zu den Mediendaten wie z.B. Textnachrichten, Bilder oder Animationen verarbeitet. Wenn der Empfänger über einen Bildschirm verfügt, können die Daten auch visualisiert werden.

4.2.2 RF-Frontend für DRM+ Empfänger

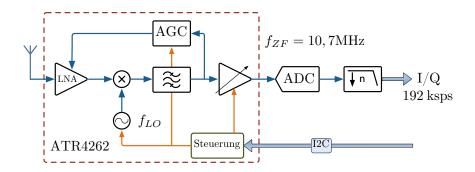


Abbildung 4.12: Blockdiagramm des verwendeten RF-Frontends.

Abbildung 4.12 zeigt das Blockdiagramm des Hochfrequenzteils des DRM+ Empfängers. Das empfangene Signal wird verstärkt und auf eine Zwischenfrequenz von 10,7 MHz runtergemischt. Zusätzlich wird auf dieser Zwischenfrequenz das Signal gefiltert. Mit diesem Bandpassfilter wird die Kanalselektivität erhöht. Im nächsten Schritt wird das Signal abgetastet und mit einem Sample-Rate-Konverter auf die Abtastfrequenz von 192 kHz gebracht. Diese Daten werden dann zur Demodulation weiterverarbeitet.

Im Rahmen des Modellversuchs wurde ein RF-Frontend ATR4262 vom Hersteller Atmel verwendet. Das Frontend verfügt über einen integrierten Oszillator zur Einstellung der Empfangsfrequenz, die über eine I2C-Schnittstelle vorgegeben werden kann. Die integrierte automatische Verstärkungsregelung regelt nur die Verstärkung des Eingangsverstärkers. Das Modul verfügt über keine automatische Verstärkungsregelung auf der Zwischenfrequenz. Damit das Signal am Ausgang nicht übersteuert wird, kann der vorprogrammierte Verstärkungsfaktor des ZF-Verstärkers über die Steuerung verändert werden. Das Modul ist für den Empfang der Signale im Frequenzbereich von 75-166 MHz spezifiziert. Die Messungen im Labor haben gezeigt, dass dieses Modul auch im tieferen Frequenzbereich (Band I) das DRM+ Signal noch gut empfangen kann.

Das Modul ist nach einem traditionellen Heterodyn-Prinzip aufgebaut. Durch eine Mischung des Empfangssignals auf eine niedrige Zwischenfrequenz wird die notwendige Filterung und die Verstärkung des Signals erleichtert. Die Signalfilterung auf einer konstanten Zwischenfrequenz ergibt eine deutlich höhere Selektion und verbessert dadurch wesentlich die Empfangsqualität.

4.2.3 Digitale Signalverarbeitung im Basisband

In Abbildung 4.13 wird die Blockstruktur des Empfängers dargestellt.

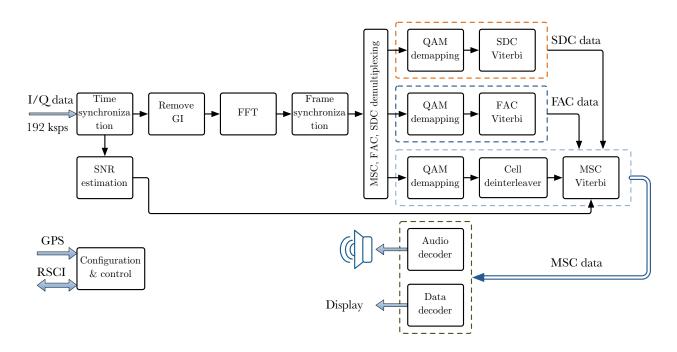


Abbildung 4.13: Die Signalverarbeitung im DRM+ Empfänger.

Die abgetasteten I/Q-Signale werden über eine geeignete Schnittstelle dem Empfänger zugeführt. Zuerst wird auf ein OFDM-Symbol im Zeitbereich synchronisiert. Dabei wird die Eigenschaft des Schutzintervalls des OFDM-Symbols genutzt. Die Abtastwerte im Schutzintervall sind eine zyklische Fortsetzung des OFDM-Symbols. Durch die Korrelation dieser Werte kann das OFDM-Symbol detektiert werden. Innerhalb dieses Algorithmus wird auch der Signal-Rausch-Abstand geschätzt. Diese Schätzung kann im Viterbi-Algorithmus verwendet werden, um den Rechenaufwand für die Decodierung der Daten bei einem guten Signal-Rausch-Abstand zu reduzieren.

Im nächsten Schritt wird das Schutzintervall entfernt und die Werte der synchronisierten OFDM-Symbole dem FFT-Algorithmus übergeben. Nach der Transformation wird die OFDM-Übertragungsrahmensynchronisation durchgeführt. Die Verteilung der Pilotzellen ist in einem OFDM-Übertragungsrahmen eindeutig. Eine zweidimensionale Korrelation der empfangenen OFDM-Zellen mit dem bekannten Pilotmuster gibt den Rahmenanfang an.

Da das Signal durch den Übertragungskanal verändert wird, muss die Wirkung des Übertragungskanals vor der Demodulation der Daten rückgängig gemacht werden. Zunächst wird die Kanalübertragungsfunktion geschätzt. Der Vergleich von empfangenen Pilotzellen mit den bekannten Werten der Pilotzellen gibt die Größe der Amplituden- und Phasenveränderung in einem OFDM-Übertragungsrahmen an diesen Stellen an. Die Größe der Veränderungen zwischen den Pilotzellen wird durch Interpolation bestimmt. Da die Piloten in Zeitrichtung einen kleineren Abstand als in Frequenzrichtung haben, wird zuerst in Zeitrichtung interpoliert. Diese interpolierten Werte dienen dann zusätzlich als Stützpunkte für die Interpolation in Frequenzrichtung. Auf diese Weise werden die geschätzten Werte der Kanalübertragungsfunktion für die Entzerrung jeder einzelnen OFDM-Zelle im Übertragungsrahmen berechnet.

Nach der erfolgreichen Übertragungsrahmensynchronisation und Kanalentzerrung werden die

Daten in einem Demultiplexer in drei logische Kanäle geteilt. Da die Daten des SDC-Kanals im ersten Übertragungsrahmen des Superframes übertragen werden, wird im Empfänger zuerst nach dieser Information gesucht. Danach werden die Daten aus den SDC- und FAC-Kanälen dekodiert. Mit den Parametern aus diesen Kanälen können schließlich die Daten aus dem MSC-Kanal dekodiert werden. Um den Rechenaufwand skalieren zu können, kann die Länge des Viterbi-Algorithmus für den MSC-Kanal dynamisch eingestellt werden.

Die demodulierten Daten werden dann dem entsprechenden Quellendecoder übergeben. Das Audiosignal wird über die Lautsprecher ausgegeben. Die Multimediadaten können auf einem Bildschirm dargestellt werden.

Zusätzlich zu den Grundfunktionen des Empfängers wurden die Visualisierung der verarbeiteten Daten (wie z.B Konstellationsdiagramm, geschätzte Kanalübertragungsfunktion oder das Spektrum des Eingangssignals) und standardisierte RSCI-Protokoll² zur Speicherung und späteren Auswertung der Empfangsparameter implementiert. Zusammen mit einem GPS-Empfänger können mobile und stationäre Messungen der Hörfunkversorgung im Feld durchgeführt werden.

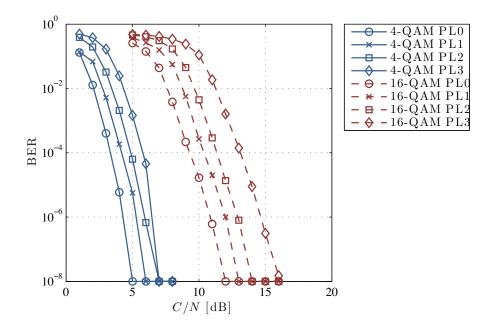


Abbildung 4.14: Die Empfängerperformance im AWGN-Kanal (Stand 2009).

Die Leistungsfähigkeit des Empfängers wurde anhand von Simulationen im Basisband mit einem AWGN-Kanal evaluiert. Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 4.14 dargestellt. Die Abhängigkeit der Bitfehlerwahrscheinlichkeit von dem Signal-Rausch-Abstand wurden für 4-QAM, 16-QAM und alle Coderaten PL0, PL1, PL2 und PL3 durchgeführt. Der logische FAC-Kanal hat eine feste Coderate von 0,5, der SDC-Kanal wurde mit der Coderate von 0,25 codiert. Diese Parametersätze wurden für den Vergleich unterschiedlicher Empfängerimplementierungen von der System Evaluation Group des DRM-Konsortiums definiert. Diese Werte sind also von der jeweiligen Implementierung des Empfängers abhängig. Sie können aber als Anhaltspunkt für die Systemleistung genommen werden.

²engl. Receiver Status and Control Interface

5 $\mathsf{DRM}+\mathsf{Feldmessungen}$ im VHF Band II

Während des Modellversuchs wurden verschiedene Messungen mit dem DRM+ System auf der Frequenz 95,2 MHz durchgeführt. Ziel war es, die Reichweite des DRM+ Systems für verschiedene Modulationsarten zu überprüfen und die minimal nötige Feldstärke in verschiedenen Umgebungen zu bestimmen. Gesendet wurde ein sehr robustes 4-QAM-Signal mit einer Bitrate von 49.8 kbps und ein 16-QAM Signal mit einer Bitrate von 149.3 kbps.

5.1 System Konfiguration

Der Sender mit der lizenzierten Sendeleistung von 30 W ERP stand auf dem Dach der Universiät Hannover (Appelstr. 9A, 30167 Hannover, GPS: lat: 52.388, long: 9.712).

Die Tests wurden mit einer robusten 4-QAM Modulation und einer 16-QAM Modulation mit hoher Datenrate durchgeführt. Für diese Protection Level liegen Simulationsergebnisse über das benötigte SNR im DRM ETSI Standard [24] in Annex A vor. Die benötigten SNR-Werte aus den Simulationen sind für ein städtisches Kanalmodell bei einer Empfangsgeschwindigkeit von 60 km/h in der folgenden Tabelle mit aufgeführt.

| Modulation | Protection level | Code rate | ${ m Bit\ rate\ [kbit/s]}$ | SNR aus ETSI [dB] |
|------------|------------------|-----------|----------------------------|-------------------|
| 4-QAM | 1 | 0.33 | 49.8 | 7.3 |
| 16-QAM | 2 | 0.5 | 149.3 | 15.4 |

Der SDC wurde mit einer Coderate von 0.25 betrieben.

5.2 Sende- und Empfangsequipment

Das folgende Equipment wurde für die Messungen verwendet:

- Fraunhofer Contentserver
- RFmondial Modulator
- Nautel Exciter/Amplifier NVE
- Sendeantenne: Kathrein K 52 40 1, 4- Element Yagi directional antenna (Hauptstrahlrichtung: 120°)
- Empfangsantenne: Kathrein K 51 16 4 / BN 510 351, Monopol (Antennenfaktor 10 dB, gemessen), die Antenne war auf dem Dach eines Kleinbusses in einer Höhe von 2 m über Grund angebracht

- HF-Frontend: Rohde & Schwarz ESVB Messempfänger, 10.7 MHz IF
- Feldstärkemessung: ESVB, BW: 300 kHz
- A/D Wandler Perseus
- RFmondial Software Empfänger

Abbildung 5.1 zeigt die horizontale Richtcharakteristik der Sendeantennen in horizontaler und vertikaler Polarisation, wobei die Antennen in beiden Fällen nach 120° ausgerichtet wurden.

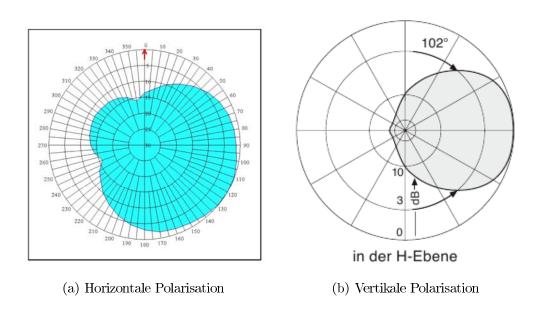


Abbildung 5.1: Antennendiagramme

5.3 Sendeinhalte

Ausgesendet wurde in beiden Modes ein Stereo Audiosignal und eine synchrone Pseudo Random Bit Sequenz, die für die Berechnung der Bitfehlerrate (BER) verwendet wurde (Details siehe [25]).

5.4 Messparameter

Die folgenden Parameter wurden während der Messung aufgezeichnet:

- Feldstärke (Mit Messempfänger Rohde & Schwarz ESVB, BW: 300 kHz, RMS)
- GPS Koordinaten
- Bitfehlerrate
- Signal zu Rausch Abstand (Berechnet über die Zeitkorrelation/Synchronisation, Details siehe [26])

5.5 Messungen 55

• Receiver Status Information (Status des Audio Dekoders, zeigt an, ob ein oder mehr Audio Frames innerhalb eines DRM Multiplex Frames fehlerhaft sind, Details siehe [25])

5.5 Messungen

Die Messungen wurden mit einer horizontal polarisierten Sendeantenne in verschiedenen Umgebungen (Industriegebiet, städtische Umgebung, offene Umgebung, Bundesstraße, radiale Route) und zum Vergleich mit einer vertikal polarisierten Sendeantenne in den städtischen Umgebungen an zwei Orten in der Innenstadt Hannovers und auf einer radialen Strecke in Richtung der Hauptstrahlrichtung durchgeführt. Abbildung 5.2 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Umgebungen.



Abbildung 5.2: Messorte (Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

5.5.1 Offene Umgebungen

Gemessen wurde mit einem DRM+ Signal mit 16-QAM Molulation auf einer Route im Welfengarten, in einer Entfernung von ca. 1 km vom Sender. In Abbildung 5.3 ist die gemessene Feldstärke und der Status der Audiodaten dargestellt, wobei ein grüner Punkt bedeutet, dass kein Audiofehler aufgetreten ist, ein roter Punkt bedeutet, das ein oder mehrere Audiofehler innerhalb eines Audioframes aufgetreten sind. Abbildung 5.4 zeigt die aufgezeichneten Daten über die Frames aufgetragen, wobei ein Frame einer Zeit von 100 ms entspricht. Hier zeigt sich, dass aufgrund der Nähe zum Sender und der entsprechend großen Feldstärke kaum Fehler auftraten.

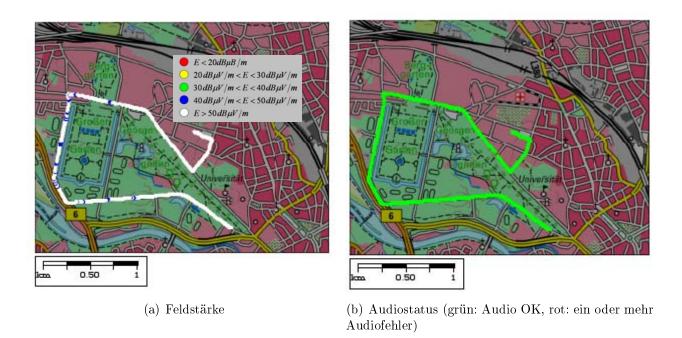


Abbildung 5.3: Messung im Welfengarten (Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

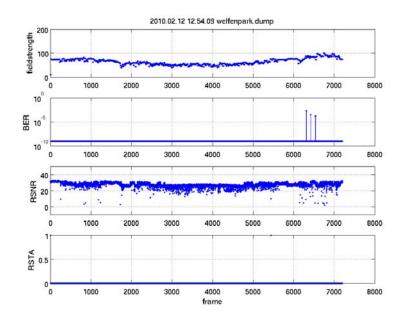


Abbildung 5.4: Messergebnisse im Welfengarten

5.5.2 Industriegebiet

Gemessen wurde ein DRM+ Signal mit 16-QAM Molulation in einem Industriegebiet im Norden Hannovers, mit einer Entfernung von ca. 3,5 km vom Sender. Abbildung 5.5 zeigt die Feldstärke und den Audiostatus auf der Messroute.

Abbildung 5.6 zeigt die Empfangsfeldstärke, die Bitfehlerrate (BER), das berechnete SNR (RSNR) und den Audiostatus (RSTA). Es ist ersichtlich, dass unter einer Feldstärke von ca.

5.5 Messungen 57



Abbildung 5.5: Messung im Industriegebiet (Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

 $45 dB\mu V/m$ Audiofehler auftraten und die Bitfehlerrate anstiegt.

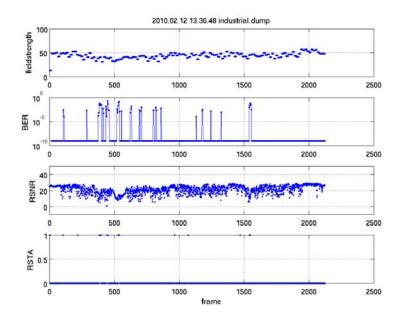


Abbildung 5.6: Messergebnisse im Industriegebiet

5.5.3 Radiale Route

Weitere Messungen mit horizontal polarisierter Sendeantenne wurden auf einer radialen Nord-Süd-Route durchgeführt. Als Modulation wurde wiederum 16-QAM verwendet. Abbildung 5.7 zeigt die Feldstärke und den Audiostatus.

In Abbildung 5.8 sind die Messergebnisse wiederum übereinander dargestellt. Hier zeigt sich ebenfalls, dass ab einem Abfall der Feldstärke auf ca. 45 $dB\mu V/m$ vermehrt Empfangsfehler auftraten.

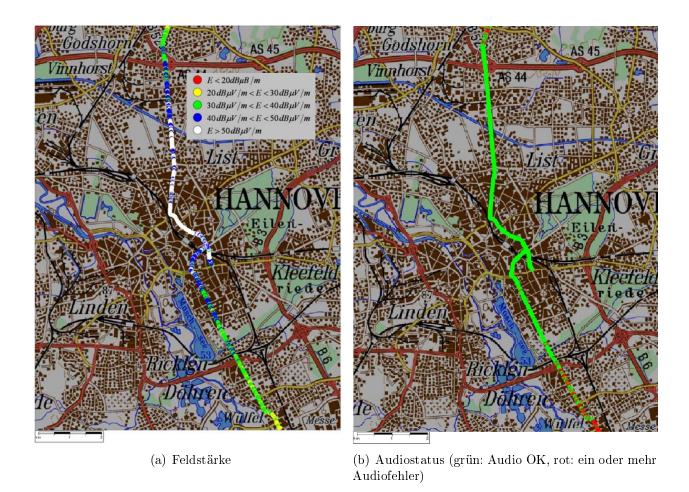


Abbildung 5.7: Messung auf einer radialen Route (Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

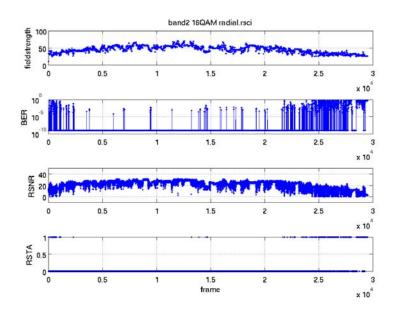


Abbildung 5.8: Messergebnisse auf der radialen Route

5.5 Messungen 59

5.5.4 Messungen in städtischer Umgebung

Die ersten Messungen in städtischer Umgebung wurden wiederum mit horizontaler Senderpolarisation durchgeführt. Da die Empfangsantenne vertikal auf dem Dach des Fahrzeugs angebracht war, wurden Vergleichsmessungen mit vertikaler Sendepolarisation durchgeführt. Die
Messorte lagen in einem Bereich, in dem die Strahlungsdiagramme bei vertikaler und horizontaler Montage der Sendeantenne den gleichen Gewinn hatten, wodurch die Ergebnisse vergleichbar sind.

Messungen in Bereich Raschplatz

Die Bebauung um den Raschplatz, hinter Hannovers Hauptbahnhof, besteht aus engen Straßen und einigen hohen Gebäuden, wodurch sich ausbreitungstechnisch eine 'dense urban' Umgebung ergeben sollte. Vergleichbar mit urbaner Bebauung wie z.B in London ist die hannoveraner Bebauung jedoch nicht. Die mittlere Entfernung zum Sender beträgt 2,5 km. Die Messungen wurden wieder mit 16-QAM Modulation durchgeführt, die durchschnittliche Geschwindigkeit des Messfahrzeugs betrug ca. 20 km/h.

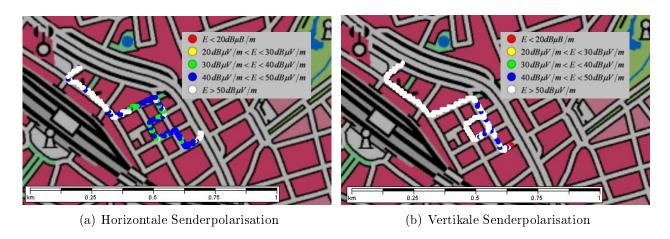


Abbildung 5.9: Feldstärke in der 'dense urban' Umgebung (Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

Abbildung 5.9 zeigt die gemessene Feldstärke bei den Messungen mit horizontaler und vertikaler Polarisation der Sendeantenne. Bei horizontaler Polarisation bewegen sich die Werte zwischen 30 und über 50 $dB\mu V/m$. Bei vertikaler Polarisation ist die Feldstärke deutlich höher. Die Mehrzahl der Werte sind über 50 $dB\mu V/m$, einige zwischen 40 und 50 $dB\mu V/m$.

Abbildung 5.10 zeigt den Audiostatus der Messungen im Bereich des Raschplatzes. Hierbei zeigt sich, dass bei horizontaler Polarisation schon vereinzelt Fehler auftreten, während die Messergebnisse für vertikale Polarisation noch weitgehend fehlerfrei sind.

Abbildung 5.11 zeigt die Messergebnisse im Vergleich. Hier wird auch die Feldstärkedifferenz deutlicher. Während sie bei horizontaler Polarisation meist um die 50 $dB\mu V/m$ bzw. leicht darunter liegt, erreicht sie bei vertikaler Polarisation bis zu 70 $dB\mu V/m$. Dementsprechend ist der Empfang bei vertikaler Polarisation im Gegensatz zur horizontalen fast fehlerfrei. Die SNR-Werte variieren deutlich stärker bei der horizontalen Polarisation, bei SNR Werten kleiner als 20 dB kommt es gehäuft zu Fehlern. Der Maximalwert von 28 dB ist durch die Berechnung

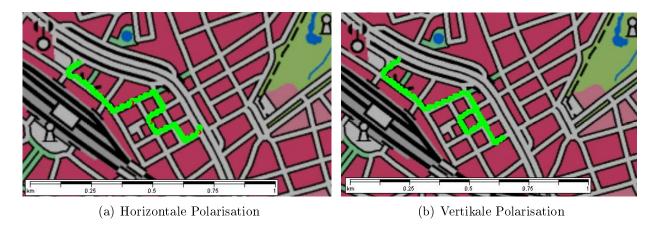


Abbildung 5.10: Audiostatus in der 'dense urban' Umgebung (grün: Audio OK, rot: ein oder mehr Audiofehler, Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

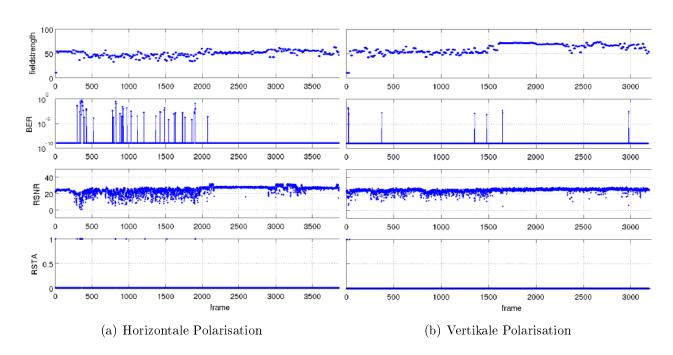


Abbildung 5.11: Messergebnisse von der Messfahrt hinterm Bahnhof ('dense urban')

bedingt.

Messungen in der Südstadt

Weitere Messungen wurden im Stadtteil Südstadt, ca. 4 km vom Sender entfernt, durchgeführt. Das Wohngebiet besteht aus Häusern mit 5-6 Stockwerken und kleineren Straßen. Die Geschwindigkeit des Messfahrzeugs lag zwischen 30 und 50 km/h.

Abbildung 5.12 zeigt die Feldstärkeverteilung. Bei horizontaler Polarisation variiert diese zwischen 30 und 50 $dB\mu V/m$, bei vertikaler Polarisation ist sie meist über 40 $dB\mu V/m$. Dementsprechend war der Empfang bei vertikaler Polarisation fast fehlerfrei, bei horizontaler Polarisation kam es besonders im rechten Teil in Abbildung 5.13 vermehrt zu Fehlern.

Abbildung 5.14 zeigt die Messergebnisse im Vergleich. Hier sieht man recht deutlich, dass bei

5.5 Messungen 61

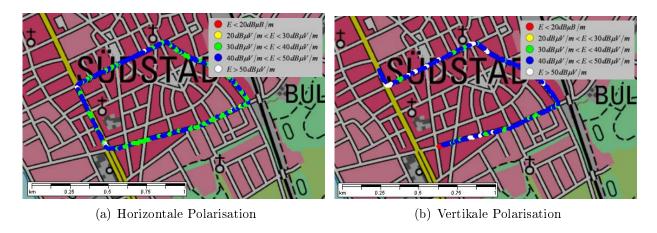


Abbildung 5.12: Feldstärke in der Südstadt (Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

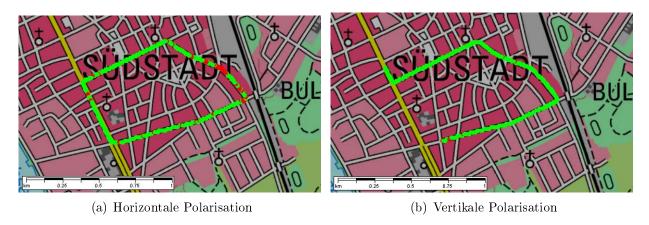


Abbildung 5.13: Audiostatus in der Südstadt (grün: Audio OK, rot: ein oder mehr Audiofehler, Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

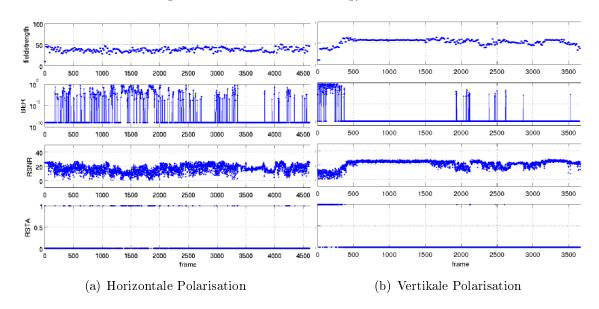


Abbildung 5.14: Messergebnisse in der Südstadt

einer relativ konstanten Feldstärke von ca. 46 $dB\mu V/m$, ein fehlerfreier Empfang noch möglich ist, bei starkem Fading jedoch vermehrt Fehler auftreten. Das entsprechende SNR liegt bei ca. 18 dB.

5.5.5 Reichweitenmessung

Die weiteren Tests wurden mit vertikaler Polarisation der Sendeantenne durchgeführt. Neben der 16-QAM Modulation wurde hier auch der 4-QAM Mode getestet. Gemessen wurde auf der B65 in Hauptstrahlrichtung, anfangs durch die Innenstadt Hannovers, anschließend durch ländliches Gebiet und durch einige Dörfer.

Messungen mit 16-QAM

Abbildung 5.15 zeigt die Feldstärke auf der Route.

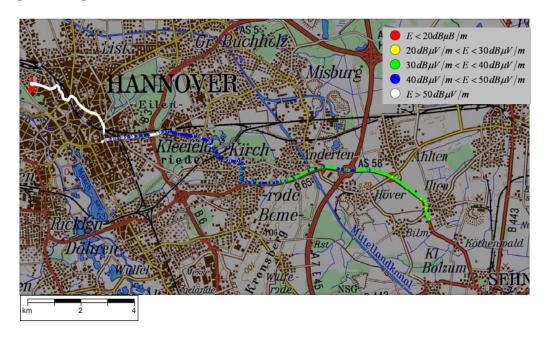


Abbildung 5.15: Feldstärke auf der B65 mit 16-QAM (Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

Abbildung 5.16 zeigt den Audiostatus, die Messung endete bei einer Entfernung von ca. 15 km vom Sender. Während der Empfang in offener Umgebung oftmals noch gut war, kam es beim Durchfahren von Dörfern zu Fehlern, was auf die dort verstärkt auftretende Mehrwegeausbreitung und die Abschattungseffekte zurückzuführen ist.

Abbildung 5.17 zeigt die Messergebnisse im Vergleich. Das Signal war bis zu einer Feldstärke von ca. 46 $dB\mu V/m$ decodierbar. Bei stärkerem Fading wurde etwas mehr Signalpegel benötigt.

5.5 Messungen 63



Abbildung 5.16: Audiostatus auf der B65 mit 16-QAM (grün: Audio OK, rot: ein oder mehr Audiofehler, Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

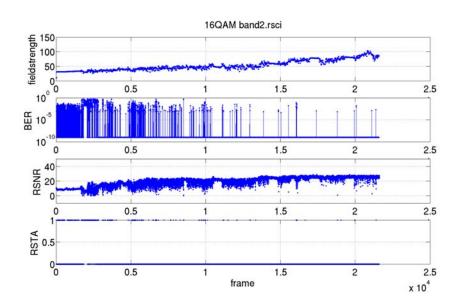


Abbildung 5.17: Messergebnisse auf der B65 mit 16-QAM (Fahrt in Richtung Sender)

Messungen mit 4-QAM

Zum Vergleich wurde die selbe Strecke mit 4-QAM Modulation gemessen (in Gegenrichtung). Hierbei wurde die Audioqualität ab einer Entfernung von ca. 30 km vom Sender auch im offenen Gelände schlecht und die Messung wurde abgebrochen.

Abbildung 5.18 zeigt die auf der Route gemessene Feldstärke.

In Abbildung 5.19 ist der Audiostatus dargestellt. Der Empfang wurde wiederum bei steigender

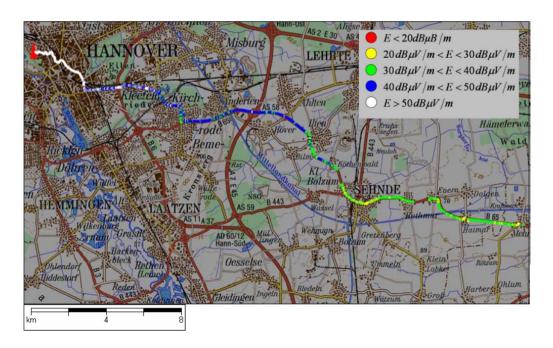


Abbildung 5.18: Feldstärke auf der B65 mit 4-QAM (Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

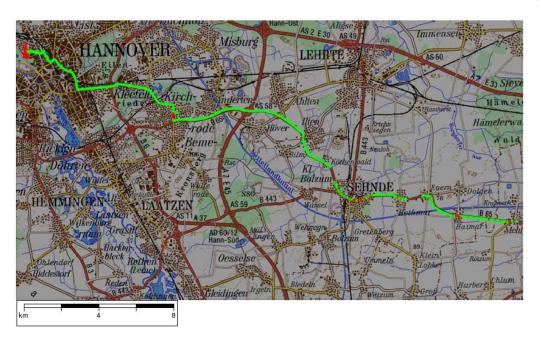


Abbildung 5.19: Audiostatus auf der B65 mit 4-QAM (grün: Audio OK, rot: ein oder mehr Audiofehler, Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

Entfernung vom Sender in den Dörfern zunehmend schlechter, ab einer Entfernung von ca. 30 km auch im offenen Gelände. Abbildung 5.20 zeigt die Messergebnisse im Vergleich. Mit der 4-QAM Modulation war ein Empfang bis ca. 30 $dB\mu V/m$ bei einem SNR von ca. 10 dB möglich.

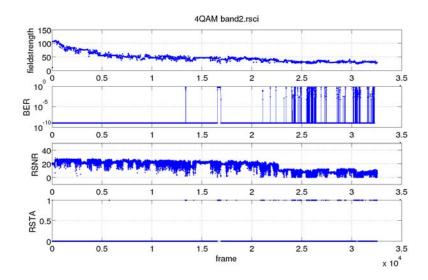


Abbildung 5.20: Messergebnisse auf der B65 mit 4-QAM (Fahrtrichtung weg vom Sender)

5.6 Versorgungsprognosen

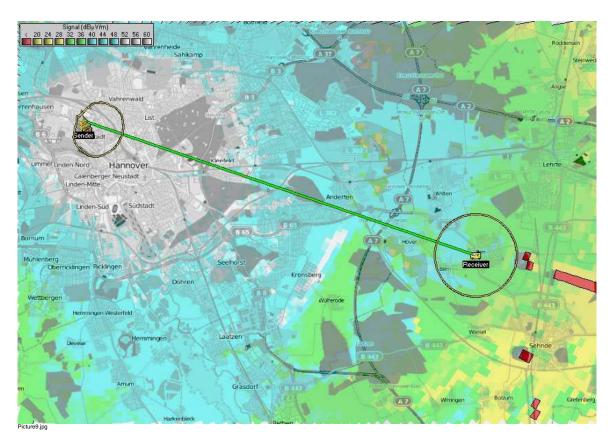


Abbildung 5.21: Feldstärkeprognosen in Band II (Kartenmaterial: Openstreetmap, CC-BY-SA Lizenz [4])

Feldstärkeprognosen wurden mit dem Programm Radiomobile ¹ durchgeführt. Das Programm verwendet das Longley-Rice Ausbreitungsmodell. Die Prognosen wurden mit den Messungen

 $^{^{1} \}verb|http://www.cplus.org/rmw/english1.html|$

verglichen um eine möglichst passende Einstellung der Parameter zu erhalten. Abbildung 5.21 zeigt die Feldstärkeverteilung, die mit 30 W ERP mit der Yagiantenne in vertikaler Polarisation berechnet wurde. Die Einstellungen hierfür waren 95% der Orte (location), 95% der Zeit (time) und 50% der 'situations'. Die Umgebung wurde zu 10% Stadt (city) gesetzt.

Wird davon ausgegangen, dass ab ca. 30 $dB\mu V/m$ ein Empfang im 4-QAM Mode möglich ist, entspricht dies dem Bereich vom Sender bis zur grünen Fläche. Bei 16-QAM reduziert sich die Versorgung auf ungefähr die halbe blaue Fläche bei einer Mindestfeldstärke bis ca. 46 $dB\mu V/m$.

6 Verträglichkeit zwischen DRM+ und FM

Für die Nutzung von DRM+ im Band II müssen die nötigen Frequenzabstände und Leistungsunterschiede (Protection Ratios, PR) eingehalten werden, die einen störungsfreien Betrieb beider Systeme nebeneinander ermöglichen.

Aufgrund des höheren Crestfaktors durch die nicht konstante Einhüllende hat ein DRM+ Signal im Vergleich zu einem FM Signal ein höheres Störpotential.

6.1 Subjektive Audiountersuchung

Im Folgenden wurde untersucht, inwieweit die Veränderung des Protection Ratios den subjektiven Höreindruck stört. Als FM-Audio Signal wurden hier Sprachaufnahmen, Stille und Musik verwendet.

6.1.1 Messaufbau

Zum Testen des benötigten Frequenzabstandes zwischen FM und DRM+ wurde der Aufbau nach Abb. 6.1 realisiert.

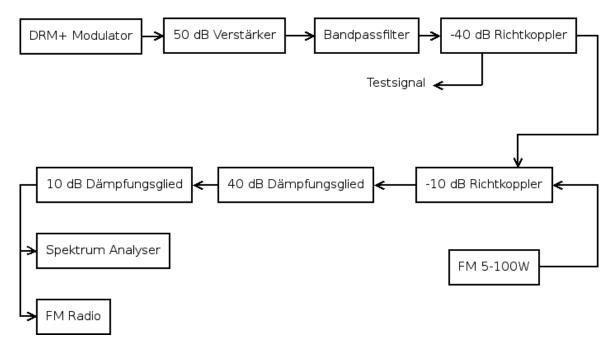


Abbildung 6.1: Blockschaltbild des Simulationsaufbaus

Das Ausgangssignal des DRM+ Modulators wird verstärkt, gefiltert und durchläuft einen

Richtkoppler mit 40 dB Auskoppeldämpfung, von dem ein Testsignal abgegriffen werden kann. Gleichzeitig wird ein FM-Stereo-Signal mit einem Transradio 100W FM Transmitter T3270 erzeugt und das DRM+ Signal auf den FM-Signal-Pfad über einen 10 dB Koppler (RVR IB-JECT12K10A) eingekoppelt. Die offenen Ausgänge des Kopplers wurden mit Abschlusswiderständen abgeschlossen. Das Ausgangssignal wurde mit einem Spektrumanalyser aufgezeichnet und das FM-Signal von einem Sony STR-GX 415 demoduliert und über eine Edirol FA-101 Soundkarte mit dem Open Source Schnittprogramm Audacity aufgenommen.

Abbildung 6.2 zeigt schematisch die nebeneinander liegenden DRM+ und FM-Signale. Der Frequenzabstand Δf bezeichnet den Abstand der Mittenfrequenzen der beiden Signale, ΔP die Differenz der HF-Leistungen bzw. den Schutzabstand.

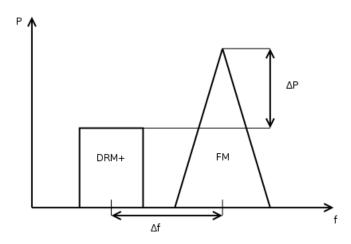


Abbildung 6.2: FM und DRM+ im Combined Mode

6.1.2 Messungen

Das FM-Audio-Signal wurde zuerst ohne Störer, anschließend mit dem DRM+ Signal als Störer im Abstand von 200 kHz, 150 kHz und 100 kHz aufgezeichnet. Abbildungen 6.3 - 6.5 zeigen die Spektren in verschiedenen Abständen des FM-Signals zum DRM+ Signal, wobei sich die Spektren bei einem Frequenzabstand von 100 kHz so sehr überlappen, dass mit erheblichen Störungen zu rechnen ist.

Des weiteren wurde die FM Leistung variiert, so dass der Unterschied zwischen FM- und DRM+ Leistung ΔP zwischen 11 und 26 dB lag. Die Abbildungen 6.6-6.11 zeigen Aufnahmen des Audiosignals. In der obersten Spur ist jeweils das FM-Audiosignal, bestehend aus einer Sprachaufnahme, Stille und einem Stück Musik ohne störendes DRM+ Signal, in der zweiten Spur mit DRM+ Signal im Abstand von 200 kHz, in der dritten im Abstand von 150 kHz und in der vierten Spur im Abstand von 100 kHz. Das während der Stille besonders hervortretende, durch das DRM+ Signal erzeugte, Rauschen wurde für einige Sekunden um 30 dB verstärkt, wodurch es sichtbar wurde.

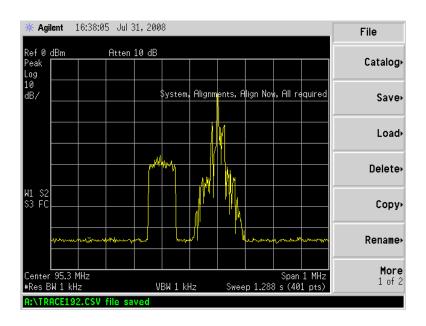


Abbildung 6.3: FM und DRM+ Signal im Abstand von 200 kHz bei $\Delta P = 20~dB$

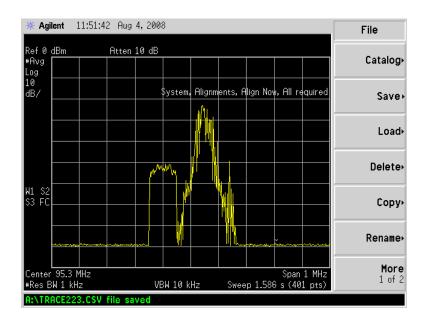


Abbildung 6.4: FM und DRM+ Signal im Abstand von 150 kHz bei $\Delta P = 23~dB$

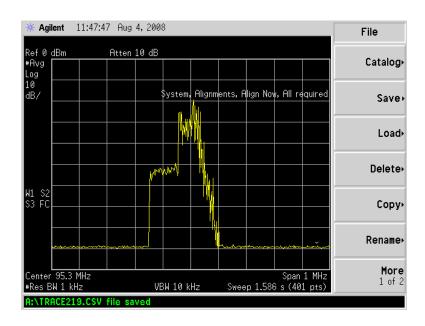


Abbildung 6.5: FM und DRM+ Signal im Abstand von 100 kHz $\Delta P = 26~dB$

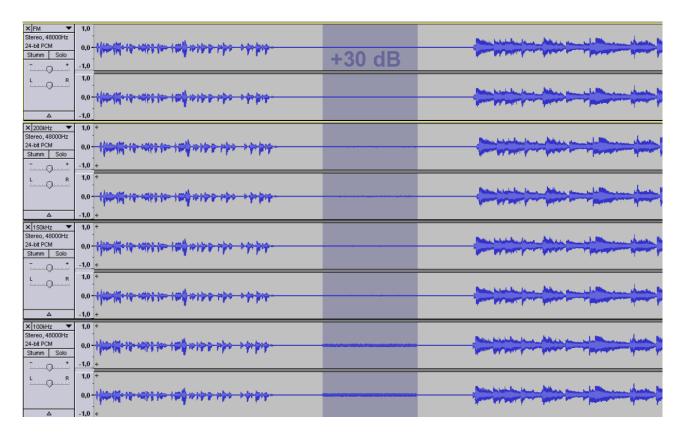


Abbildung 6.6: FM-Audio Signal bei $\Delta P = 26~dB$

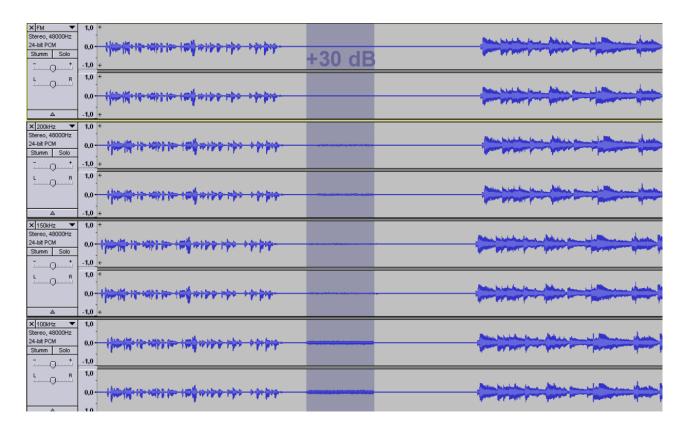


Abbildung 6.7: FM-Audio Signal bei $\Delta P = 23 \ dB$

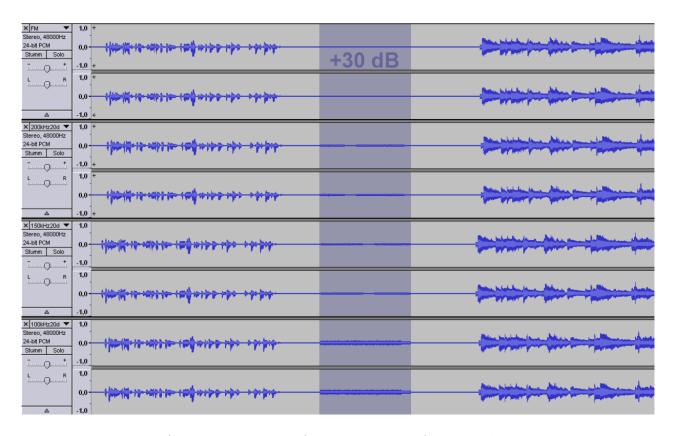


Abbildung 6.8: FM-Audio Signal bei $\Delta P = 20 \ dB$

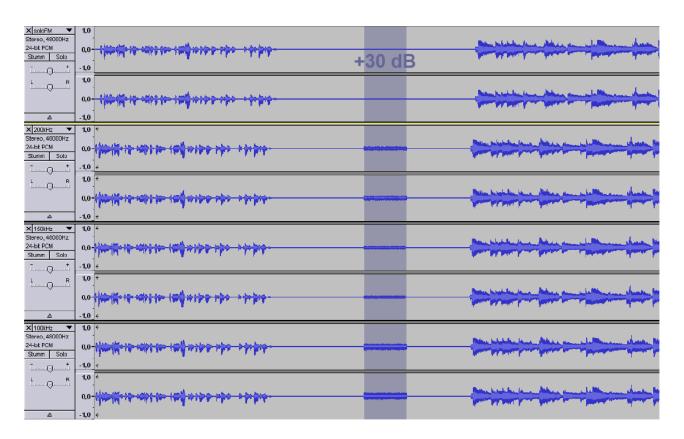


Abbildung 6.9: FM-Audio Signal bei $\Delta P = 17~dB$

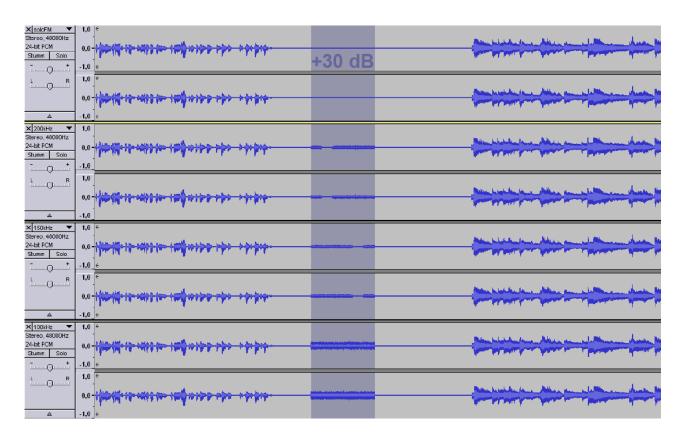


Abbildung 6.10: FM-Audio Signal bei $\Delta P = 14~dB$

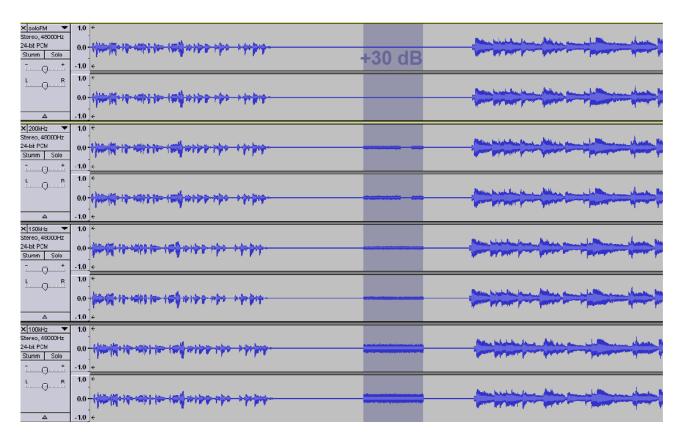


Abbildung 6.11: FM-Audio Signal bei $\Delta P = 11 \ dB$

Hierbei zeigt sich, dass für einen Frequenzabstand von 100 kHz bei allen getesteten Schutzabständen erhebliche Störungen auftreten. Bei einem Frequenzabstand von 150 kHz hängen die Störungen schon stark von der relativen Leistung ab. Während diese bei $\Delta P=26~dB$ kaum wahrnehmbar sind, ist das Rauschen bei $\Delta P=20~dB$ mit einem Kopfhörer bei leisen Passagen des Audiosignals leicht zu hören. Die Erhöhung des Abstandes auf 200 kHz macht keinen Unterschied, was an der Nichtlinearität der Basisbandfilter des DRM+ Senders liegen kann. Bei $\Delta P=17~dB$ sind die Störungen bei Sprachsignalen schon deutlicher zu hören und ab $\Delta P=14~dB$ sind sie auch über der übertragenen Musik wahrnehmbar.

6.2 Messung der PR nach ITU-R BS.641

Weitere Messungen wurden unter Berücksichtigung der Vorgaben der ITU-R BS.641 ('Determination of radio-frequency protection ratios for frequency-modulated sound broadcasting') durchgeführt. Ohne Störsignal muss der Empfänger ein Audio SNR größer als 56 dB erreichen. Hierfür wird ein 500 Hz Testsignal über einen FM-Sender übertragen und das Empfangssignal mit einem Rohde & Schwarz UPD Audio Analyser untersucht. Um den 19 kHz Pilotton herauszufiltern, wird ein 15 kHz Tiefpass vorgeschaltet. Anschließend wird ein gewichtetes CCIR Filter im Audio Analyser angeschaltet, das Testsignal ausgeschaltet und der DRM+ Störsender angeschaltet. Dessen Signalpegel wurde erhöht, bis das Audio-SNR auf 50 dB abgefallen war. Der Eingangspegel der verschiedenen FM-Empfänger wurde konstant auf -52 dBm gehalten. Hinter den DRM+ Sender wurde ein Bandpassfilter geschaltet. Abbildung 6.12 zeigt die Über-

tragungsfunktion dieses Filters.

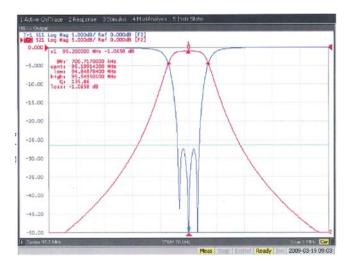


Abbildung 6.12: Übertragungsfunktion des verwendeten Bandpassfilters

In Abbildung 6.13 sind die Schutzabstände (PR) über den Frequenzversatz zwischen FM und DRM+ Sender für die drei getesteten FM-Empfänger aufgetragen. Zum Vergleich sind die Schutzabstände zwischen FM Sendern aus der ITU-R BS.641 aufgetragen.

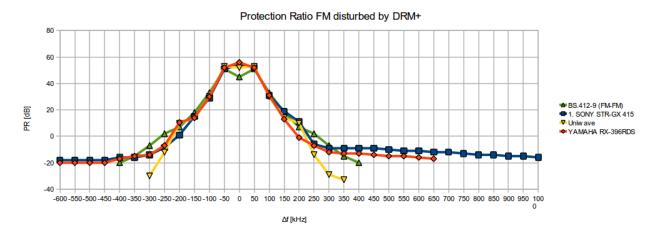


Abbildung 6.13: Protection Ratios, DRM+ stört FM

Dabei zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den verwendeten Empfängern. Beim Uni-Wave Empfänger z.B. wird schon bei einem Frequenzabstand von 300 kHz ein PR von unter -20 dB erreicht. Das heißt, dass ein FM-Sender noch störungsfrei empfangen werden kann, wenn ein DRM+ Sender in 300 kHz Abstand mit über 20 dB höherer Leistung sendet. Bei den untersuchten Sony und Yamaha Empfängern werden die -20 dB dagegen kaum erreicht, was vermutlich auf die ZF-Filter der jeweiligen Empfänger zurückzuführen ist.

Bei einem Abstand von 150 kHz sind die Ergebnisse der einzelnen Empfänger noch recht ähnlich, der DRM+ Sender muss eine um 20 dB abgesenkte Leistung gegenüber dem FM-Signal haben. Bei 200 kHz Frequenzabstand sind ca. 10 dB ausreichend.

Die Unterschiede zu den Untersuchungen im vorherigen Kapitel lassen sich durch den fehlenden CCIR-Filter und einen nicht konstanten Eingangspegel des Empfängers zurückführen.

7 DRM+ im VHF Band III

Im folgenden Kapitel werden die jetzige Hörfunksituation, Möglichkeiten der Digitalisierung im Band II und die mögliche Nutzung von DRM+ im Band III beschrieben.

Um die Funktionsfähigkeit und die Performance des DRM+ Systems im Band III zu untersuchen, wurden die relevanten Kanaleigenschaften, die sich mit höheren Frequenzen ändern, analysiert und Messungen im Feld durchgeführt.

7.1 Motivation zur Entwicklung von Komponenten und zur Untersuchung von DRM+ im VHF-Band III (174 - 230 MHz)

Situation der analogen UKW-Hörfunk-Nutzung

Über den Hauptverbreitungsweg für Hörfunk, dem UKW-Bereich (Band II), sind in Deutschland und Europa zwar eine relativ große Zahl von Programmen für die Hörer nutzbar, jedoch stehen für neue Programme keine wirtschaftlich nutzbaren UKW-Frequenzen zur Verfügung. Das UKW-Band ist ausgeplant und bietet daher zukünftig keine Grundlage mehr für eine medienpolitisch gewollte vielfältige Hörfunklandschaft bzw. Reichweitenverbesserungen. Eine Vergrößerung der Programmvielfalt, die auch neuen Programmanbietern überhaupt eine Chance auf Programmverbreitung bietet, sowie eine qualitative und quantitative Verbesserung der Ausstrahlungsbedingungen privater Programme gegenüber denen des öffentlich-rechtlichen Rundfunks, sind nur in anderen Frequenzbändern möglich.

Situation von Digital Radio (DAB+, Eureka 147) im VHF-Band III

In der Regional Radiocommunication Conference 2006 (RRC-06) wurde das gesamte VHF-Band III (174 - 230 MHz) dem digitalen Rundfunk zugewiesen. In Deutschland ist eine ausschließliche Nutzung durch den digitalen Hörfunk mit bis zu acht DAB+-Bedeckungen zum mobilen/portablen und indoor-Empfang mit einer nationalen, einer regionalen und sechs landesweiten bzw. länderübergreifenden Versorgungen geplant.

Mit DAB+ und Sendeleistungen, die einen guten portabel indoor Empfang gewährleisten, lassen sich Programmangebote inklusive neuer Zusatzdienste realisieren, welche die heutigen UKW-Angebote deutlich an Anzahl und Attraktivität übersteigen können. Mit den in Deutschland kurzfristig vorgesehenen drei DAB+ Bedeckungen könnten rein rechnerisch ca. 45 Hörfunkprogramme in jeder Region angeboten werden.

Wird im Zuge einer Digitalisierung des Hörfunks angestrebt, die bestehenden UKW-Verbreitungsgebiete und Verbreitungsinteressen von bundesweit bis regional/lokal zu berücksichtigen, so wird schnell deutlich, dass dies mit DAB+ allein nicht kosten- und ressourceneffizient zu realisieren ist, wenn sowohl die Regionalisierungspraxis landesweiter Veranstalter (öffentlich-rechtlich und privat) als auch das Interesse an regional/lokalen Verbreitungsgebieten insgesamt in die Planung mit einbezogen werden. Die Verbreitung von digitalem Hörfunk in Regionen mit einem geringeren Kapazitätsbedarf, wie dies in ländlichen Regionen der Fall ist, aber auch die Verbreitung von regionalen und lokalen Programmangeboten im Allgemeinen, ist mit DAB+ in den meisten Gebieten kaum wirtschaftlich und frequenzökonomisch abzubilden. Mit dem digitalen Hörfunksystem DAB+ sind bundesweite und landesweite Hörfunkversorgungen sowie Ballungsraumversorgungen mit einer großen Programmanzahl kosten- und ressourceneffizient möglich. Die Versorgung von Regionen mit geringerem und insbesondere einem regionalen und lokalen Programmangebot sowie Möglichkeiten der regionalen Programmauseinanderschaltung ist mit DAB+ nicht realisierbar.

Nutzung von DRM+ im UKW-Band II

Wie in Kapitel 6 bereits ausgeführt, haben Laboruntersuchungen und Feldtests in Hannover und Kaiserslautern ¹ gezeigt, dass die Umstellung eines analogen UKW-Senders auf DRM+, verbunden mit einem erkennbaren Reichweitengewinn, verträglich machbar wäre. Allerdings wird derzeit kein Programmveranstalter dafür seinen analogen UKW-Sender abschalten. Für eine Einplanung von DRM+ zusätzlich zu den analogen Aussendungen in den UKW-Bereich II stehen keine ausreichenden freien Frequenzkapazitäten zur Verfügung, so dass nur einige wenige Programmanbieter im UKW-Band eine Simulcastaussendung durchführen könnten. Weiter ist für die digitale Planung erschwerend, dass derzeit nach wie vor Frequenzen für analoge Aussendungen koordiniert werden. Darüber hinaus nimmt auch die Flugsicherung eine ablehnende Haltung gegenüber digitalen Aussendungen im UKW-Band II ein und begründet diese mit potenziellen, aber nicht nachweisbaren, Störpotentialen gegenüber dem Flugfunk (Instrumenten-Lande-Systeme etc.).

Man kann also feststellen, dass es eine Reihe von kritischen Argumenten gegen eine kurzfristige Einplanung von digitalen Hörfunksystemen im UKW-Bereich zusätzlich zur analogen Nutzung gibt, zumal auch seitens der öffentlich-rechtlichen und privaten Programmanbieter an eine Reduktion oder gar Einstellung des analogen Hörfunks im UKW-Bereich heute nicht gedacht wird. Derzeit besteht also im nationalen Rahmen keine realistische Möglichkeit, zusätzlich zu den analogen Aussendungen im UKW-Band II digitale Aussendungen im Rahmen eines Hörfunk-Regelbetriebs zu ermöglichen.

Nutzung von DRM+ im VHF-Band III

Aufgrund der Tatsache, dass DRM+ kurzfristig im UKW-Band II nicht genutzt werden kann, und auch wegen der beginnenden Diskussionen über die künftige (Teil-) Nutzung des VHF-Bands III für andere Dienste als Rundfunk, wäre der Ausweg DRM+ auch im VHF-Band III einzusetzen.

Das bedeutet, dass zusätzlich zur großflächigen Versorgung mit Hörfunkprogrammen über DAB+ auch der regionalisierte und lokale Hörfunk über DRM+ im VHF-Band III verbreitet werden könnte. Auf Grund dieser beschriebenen Argumente wurden im Rahmen des Modellversuchs in Phase 3 die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Untersuchungen durchgeführt,

¹Ergebnisse der Untersuchungen in Kaiserslautern siehe www.drm-radio-kl.eu/

die eine Einplanung von DRM+ ins Band III ermöglichen.

7.2 Untersuchung der Kanaleigenschaften in Band III

Da das DRM+ System für Frequenzen von 30-174 MHz standardisiert ist wurden die Parameter untersucht, die bei Nutzung des Systems bei höheren Frequenzen relevant sein könnten.

7.2.1 Auswirkung der Empfängergeschwindigkeit auf den DRM+ Empfang

Da der Radioempfang häufig mit bewegtem Empfänger, zum Beispiel im Fahrzeug, stattfindet, ist die maximale Empfängergeschwindigkeit ein wichtiger Parameter eines Systems. Die Dopplerverschiebung f_d hängt von der Empfängergeschwindigkeit v folgendermaßen ab:

$$f_d = f_0 \frac{v}{c} cos(\alpha) \tag{7.1}$$

Hier ist c die Lichtgeschwindigkeit und α der Winkel zwischen der Einfallsrichtung der Strahlung und der Bewegungsgeschwindigkeit. In Mehrträgersystemen entstehen durch die Bewegung des Empfängers Dopplerverschiebungen der einzelnen OFDM- Träger. Wenn Bewegung des Empfängers mit Mehrwegeausbreitung kombiniert ist, kann der Effekt auftreten, dass Pfade aus verschiedenen Richtungen frequenzabhängige Dopplerverschiebungen erzeugen, wodurch die Orthogonalität der OFDM-Träger untereinander zerstört wird und es zu Intercarrier Interference (ICI) kommt. Dieses ICI kann als ein additives weißes Rauschen behandelt werden [27]. Eine Näherungsberechnung der normalisierten Leistung der Interferenzen P_{ICI} im Falle eines klassischen (Jakes) Kanalmodells ist in [28] folgendermaßen angegeben:

$$P_{ICI} \leqslant \frac{1}{12} (2\pi f_d T_s)^2 \tag{7.2}$$

 T_s isr hierbei die Symboldauer von 2,5 ms. In Abbildung 7.1 (a) ist P_{ICI} über die maximalen Dopplerverschiebenungen angegeben.

Zusätzlich hängt die maximal zulässige Dopplerverschiebung $f_{dopplerMax}$ von der Pilotzellenverteilung ab [29]. Abbildung 7.2 zeigt die vertikale Pilotzellenverteilung des DRM+ Systems.

Die Kanalschätzung des DRM+ System funktioniert, indem die Änderung der dem Empfänger bekannten Pilotzellen gemessen wird, die dazwischen liegenden Werte werden daraus interpoliert und mit Hilfe dieser Übertragungsfunktion die Auswirkungen des Kanals aus dem Empfangssignal herausgerechnet. Mit einer Symboldauer von $T_s=2,5$ ms wird der Kanal wie in Abbildung 7.2 zu sehen ist, in Zeitrichtung alle $4*T_s=10ms$ gemessen, woraus sich eine Samplingfrequenz von 100 Hz ergibt. Um das Sampling Theorem einzuhalten, muss die maximale Dopplerfrequenz die Bedingung:

$$f_{dopplerMax} < 50Hz \tag{7.3}$$

einhalten.

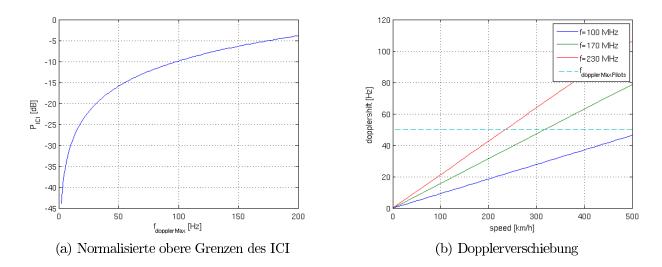


Abbildung 7.1: Auswirkung der ICI auf ein OFDM Signal, abhängig von den Empfängergeschwindigkeiten und Trägerfrequenzen

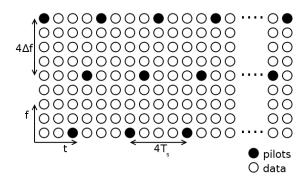


Abbildung 7.2: Verteilung der Pilotenzellen im DRM+ System

Abbildung 7.1 (b) zeigt die Dopplerverschiebungen bei verschiedenen Trägerfrequenzen über die Empfängergeschwindigkeit aufgetragen und das Limit von 50 Hz der Pilotverteilung. Dabei zeigt sich, dass eine Empfängergeschwindigkeit von 200 km/h in Dopplerverschiebungen von bis zu 42 Hz bei einer Trägerfrequenz von 230 MHz, bis zu 33 Hz bei einer Trägergeschwindigkeit von 170 MHz und bis zu 19 Hz bei einer Empfängergeschwindigkeit von 100 MHz. Dies wiederum in Abbildung 7.1 (a) eingesetzt ergibt die normierte Interferenzleistung von -17.5 dB für 230 MHz, -20 dB für 170 MHz und -24 dB für 100 MHz. In [30] werden Simulationen der DRM+ Performance in einem 'ländlichen' ('rural') Kanal bei verschiedenen Empfängergeschwindigkeiten und einer entsprechend erhöhten Störleistung gemacht. Vergleichsweise wurden die Simulationen bei einer Trägerfrequenz von 200 MHz und 100 MHz durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass bei diesem 'worst-case' Szenario bei 200 MHz ab einer Geschwindigkeit von 200 km/h die Bitfehlerrate von 10^{-4} , bei der ein Empfang noch möglich ist, gerade nicht mehr erreicht wird.

7.2.2 Flat fading

Das DRM+ System verwendet einen Bitinterleaver über 100 ms und einen Zellinterleaver über 600 ms. Bei langsamen Empfängergeschwindigkeiten und Mehrwegeausbreitung kann es zu 'flat fading', also Empfangsausfällen aufgrund von zu langen Dämpfungen des Empfangspegels, kommen. Wenn diese länger als die 600 ms des Zellinterleavers dauern, kann auch die nachfolgende Fehlerkorrektur nicht mehr arbeiten, Empfangsfehler treten auf.

Ein wichtiger Faktor dabei ist die Kohärenzzeit. Diese beschreibt die Veränderung eines Kanals über die Zeit. Ein sich langsam verändernder Kanal hat eine lange Kohärenzzeit, ein sich schnell verändernder Kanal hat eine kurze Kohärenzzeit. Ein schneller Empfänger durchfährt das durch die Mehrwegeausbreitung in der Luft liegende Interferenzmuster der elektromagnetischen Wellen schneller, was wiederum einen sich schnell verändernden Kanal und damit eine kurze Kohärenzzeit verursacht. Eine kürzere Wellenlänge, wie sie durch eine höhere Trägerfrequenz verursacht wird, ergibt eine höhere Auflösung des Interferenzmusters und damit wiederum eine kürzere Kohärenzzeit.

Da die Wellenlänge in Band III kürzer ist, sollten weniger Empfangsausfälle aufgrund von 'flat fading' auftreten.

7.3 Messungen im VHF Band III

Die DRM+ Band III Sendeanlage stand wiederum auf dem Dach der Universität Hannover und wurde mit mit 30 W ERP und vertikaler Sendeantennenpolarisation betrieben, um die Ergebnisse zu den Messungen im Band II vergleichbar zu machen. Gesendet wurde auf der Frequenz: 176,64 MHz. Die Messungen wurden in denselben Modes und Parametern wie in Band II durchgeführt (siehe Kapitel 5.1). Der Inhalt bestand wiederum aus einem Stereo Audiosignal und einer synchronen Pseudo Random Bit Sequenz, die für die Berechnung der Bifehlerrate (BER) benötigt wird. Die gemessenen Parameter waren wiederum die gleichen wie bei den Messungen in Band II.

7.3.1 Equipment

Folgendes Equipment wurde für die Messungen verwendet:

- Fraunhofer Contentserver
- RFmondial Modulator/Exciter
- Thomson Linearverstärker (VHF Amplifier Band 3, 54 dB Verstärkung) **THOMSON**
- Sendeantenne: Kathrein K 52 40 5, 5- Element Yagi Antenna (direction: 120 °)
- Empfangsantenne: Kathrein K 51 16 4 / BN 510 351, Monopol, ein Antennenfaktor von 13 dB wurde gemessen, die Antenne war wiederum in ca. 2 m Höhe auf einem Kleinbus angebracht
- HF-Frontend: Rohde & Schwarz ESVB Messempfänger, 10.7 MHz IF

- Feldstärkemessung: ESVB, BW: 300 kHz
- A/D Wandler Perseus
- RFmondial Software Empfänger

7.3.2 Messergebnisse

Messungen wurden in der Innenstadt von Hannover und auf einer radialen Route in Richtung der Hauptstrahlrichtung der Sendeantenne (vgl. Band II) mit 4- und 16-QAM Modulation durchgeführt. Dies soll einerseits die Performance des DRM+ Systems in Band III untersuchen und einen Vergleich mit den Messungen in Band II zulassen.

Messungen im städtischen Bereich

Die Messungen im städtischen Bereich wurden mit 16-QAM Modulation hinter dem Hauptbahnhof Hannovers durchgeführt. Gemessen wurde bei einer Geschwindigkeit von ca. 15 km/h um den Effekt des 'flat fadings' zu untersuchen. Zum Vergleich sind die Messergebnisse der Messung in Band II mitgeplottet.

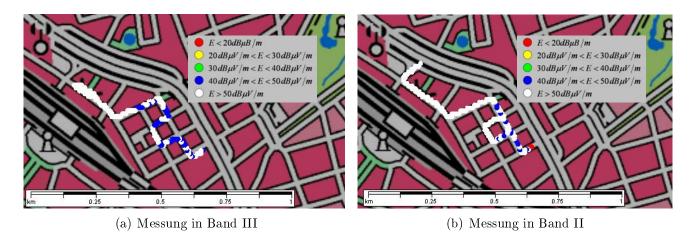


Abbildung 7.3: Feldstärke in der 'dense urban' Umgebung (Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

Ein Vergleich der empfangenen Feldstärken in Abbildung 7.3 und 7.5 zeigt bei der Messung in Band III etwas niedrigere Ergebnisse als in Band II, was auf die frequenzabhängige Freiraumausbreitung zurückzuführen ist. Da die Feldstärke in beiden Fällen noch meist über 50 $dB\mu V/m$ war, war der Empfang fast fehlerfrei. Unterschiede bezüglich der Fehler durch 'flat fading' konnten auch bei Versuchen mit der Addition von zusätzlichem Rauschen, was einer Absenkung der Sendeleistung entspricht, um Fehler für einen Vergleich zu erzeugen, nicht festgestellt werden.

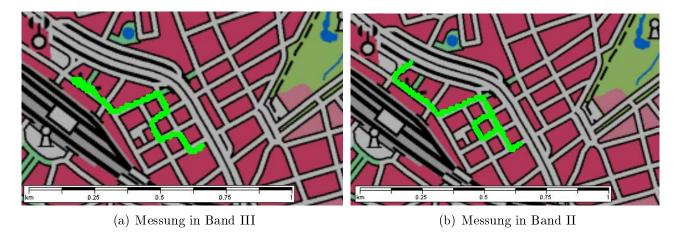


Abbildung 7.4: Audiostatus in der 'dense urban' Umgebung (grün: Audio OK, rot: ein oder mehr Audiofehler, Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

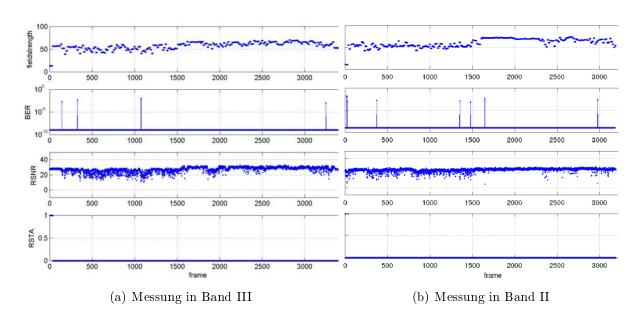


Abbildung 7.5: Messergebnisse, Messfahrt hinter dem Bahnhof ('dense urban')

Reichweitenmessungen im 16-QAM Mode

Bei der Reichweitenmessung wurde neben der 16-QAM Modulation wiederum auch der 4-QAM Mode getestet. Die Route führte wie bei den Messungen in Band II in Richtung der Hauptstrahlrichtung der Sendeantenne. Gemessen wurde auf der B65, anfangs durch die Innenstadt Hannovers, anschließend durch ländliches Gebiet und durch einige Dörfer.

Abbildung 7.6 zeigt die im 16-QAM Mode gemessene Feldstärke. In Abbildung 7.7 ist der empfangene Audiostatus geplottet. Im Vergleich zu der Messung in Band II (Abbildung 5.16) treten hier zum Beispiel in Ilten weniger Audiofehler auf. Dies kann daran liegen, dass der Frequenzbereich um die 176 MHz in Hannover nicht genutzt wird, wohingegen das FM-Band sehr stark belegt ist. Die Aussendungen in Band III wurden daher von dem umgebenden Rauschen begrenzt, die in Band II sind interferenzbegrenzt. Gemessen wurde bis zu einer Entfernung von ca. 15 km vom Sender.

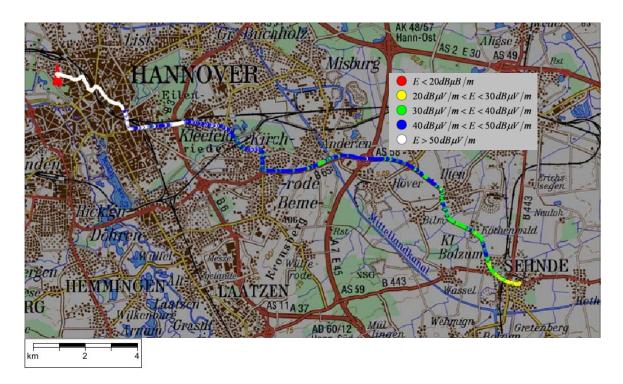


Abbildung 7.6: Feldstärke auf der B65 mit 16-QAM (Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

Abbildung 7.8 zeigt die Feldstärke gemeinsam mit der BER , dem SNR und dem Audiostatus über die frames aufgetragen. Es zeigte sich, dass der Empfang bis zu einer Feldstärke von ca. $48~dB\mu V/m$ möglich war. Das berechnete SNR an dieser Stelle war ca. 20 dB.

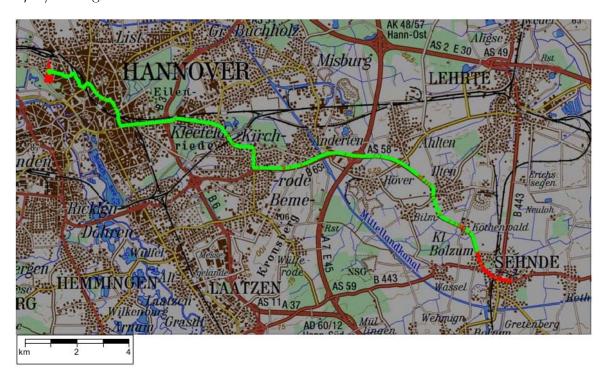


Abbildung 7.7: Audiostatus auf der B65 mit 16-QAM (grün: Audio OK, rot: ein oder mehr Audiofehler, Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

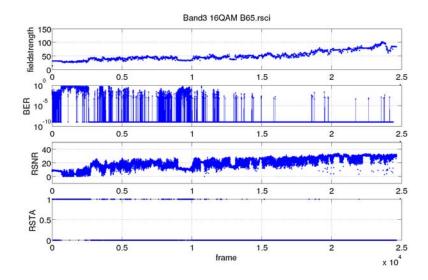


Abbildung 7.8: Messergebnisse auf der B65 im 16-QAM Mode in Band III (Messfahrt in Richtung des Senders)

Reichweitenmessung im 4-QAM Mode

Abbildung 7.9 zeigt die im 4-QAM Mode gemessene Feldstärke, 7.10 den Audiostatus.

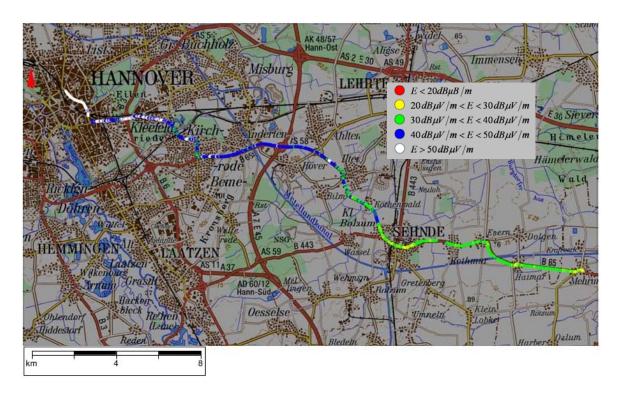


Abbildung 7.9: Feldstärke auf der B65 mit 4-QAM (Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

Abbildung 7.11 zeigt die gemessenen Werte wiederum im Vergleich. Ein Empfang war möglich bis zu einer Feldstärke von ca. 35 $dB\mu V/m$ bei einem SNR von ca. 12 dB. Ein Unterschied zu den Messungen im Band II in Kapitel 5.5.5 war hier kaum feststellbar. Gemessen wurde bis zu einer Entfernung von ca. 30 km vom Sender.

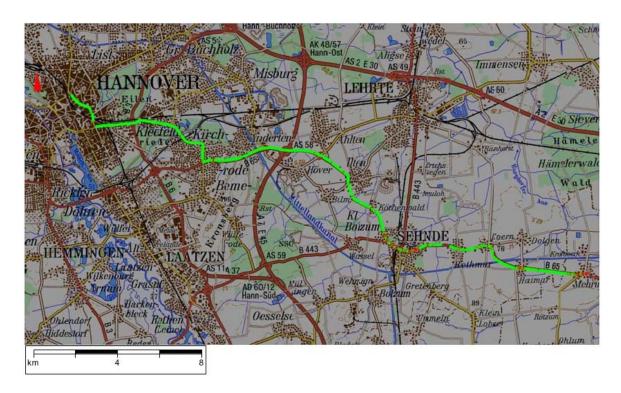


Abbildung 7.10: Audiostatus auf der B65 mit 4-QAM (grün: Audio OK, rot: ein oder mehr Audiofehler, Kartenmaterial: Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung)

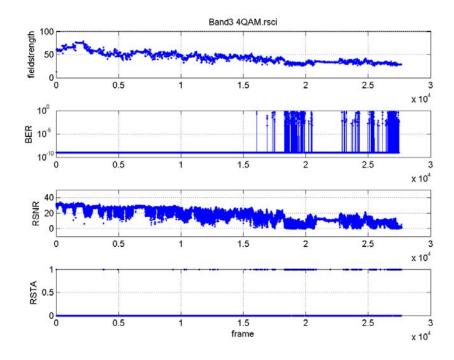


Abbildung 7.11: Messergebnisse auf der B65 im 4-QAM Mode in Band III

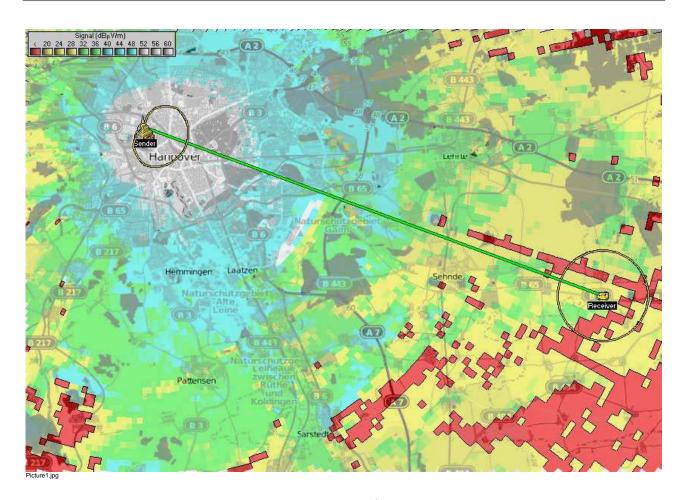


Abbildung 7.12: Feldstärkeprognosen in Band III, (Kartenmaterial: Openstreetmap, CC-BY-SA Lizenz [4])

7.3.3 Versorgungsprognosen

Feldstärkeprognosen wurden mit dem Programm Radiomobile ² durchgeführt. Die Prognosen wurden mit den Messungen verglichen, um eine möglichst passende Einstellung der Parameter zu erhalten. Abbildung 7.12 zeigt die Feldstärkeverteilung, die mit 30 W ERP mit der Yagiantenne in vertikaler Polarisation berechnet wurde. Auch hier passten die Einstellungen, die auch für Band II verwendet wurden am besten zu den Messergebnissen: 95% der Orte (location), 95% der Zeit (time) und 50% der 'situations'. Die Umgebung wurde zu 10% Stadt (city) gesetzt.

Wird davon ausgegangen, dass ab ca. 35 $dB\mu V/m$ ein Empfang im 4-QAM Mode möglich ist, entspricht dies der Fläche vom Sender bis zur Hälfte der grünen Fläche, bei 16-QAM reduziert sich die Fläche auf ca. 1/3 der blauen Fläche, bei einer Feldstärke bis ca. 48 $dB\mu V/m$.

²http://www.cplus.org/rmw/english1.html

7.4 Grundlegende Überlegungen zur Einplanung von DRM+ in das Band III

7.4.1 Einplanung von DRM+ in das bestehende Frequenzraster im Band III

Der bei der Regional Radiocommunication Conference (RRC-06) für die Übertragung von digitalem Rundfunk vorgesehene Frequenzbereich erstreckt sich von Kanal 5 (174 MHz) bis Kanal 12 (230 MHz). Jeder 7 MHz breite Kanal ist in 4 Blöcke mit je 1,75 MHz unterteilt. Ziel war es, dass in jedem Block ein DAB/DAB+/DMB Multiplex übertragen werden kann und weiterhin die Möglichkeit besteht, digitales terrestrisches Fernsehen (DVB-T) in diesem Frequenzbereich zu übertragen.

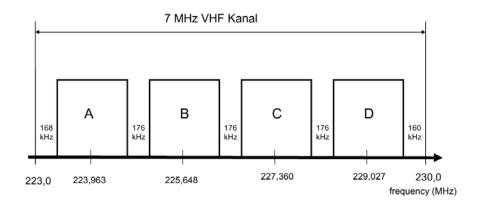


Abbildung 7.13: Aufteilung der Blöcke im Kanal 12

Abbildung 7.13 zeigt die Aufteilung der Blöcke am Beispiel von Kanal 12.

Durch die Nutzung von nur einem DAB+ Block, unterteilt in 15 DRM+ Blöcke (vgl. Abb. 7.14), wird es möglich, einen Großteil des lokalen und regionalisierten digitalen Hörfunks in Niedersachsen abzubilden ohne dabei auf bestehende, historisch gewachsenen UKW-Strukturen aufzubauen. Dabei kann jeder Programmanbieter seinen eigenen DRM+ Block (entsprechend einer Frequenz bei UKW, jedoch mit max. vier Services, Audio oder Daten) nutzen und seinen eigenen Versorgungsbereich umsetzen, ohne mit anderen Programmanbietern Absprachen durchzuführen oder Kompromisse einzugehen.

7.4.2 Prinzipielle Überlegungen zur Frequenzplanung

Im Folgenden wird beispielsweise für Niedersachen eine Frequenzplanung zur Übertragung von digitalem terrestrischen Hörfunk unter Berücksichtigung von DAB+ und DRM+ Aussendungen vorgestellt. Diese Frequenzplanung ist prinzipieller Natur und soll ausschließlich die grundlegenden Möglichkeiten zur Realisierung von bundesweitem, landesweitem und lokalem/regionalem Hörfunk darstellen. Die Frequenzblöcke bei der DRM+ Planung sind willkürlich gewählt, die Wiederholabstände sind rechnerisch nicht verifiziert.

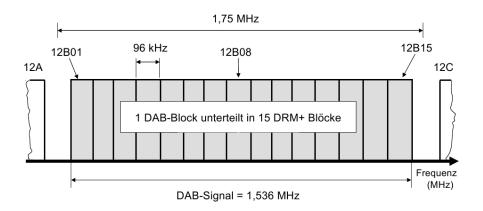


Abbildung 7.14: Aufteilung eines DAB+ Blocks in 15 DRM+ Blöcke

Gemäß dem heutigen Planungsstand wird zur Verbreitung vom digitalem terrestrischen Hörfunk mit dem System DAB+ der bundesweite Multiplex im Kanal 5C und der landesweite Multiplex im Kanal 10A in Niedersachsen verbreitet werden (Abbildung 7.15).



Abbildung 7.15: DAB+ Planung in Niedersachsen, überregionale Multiplexe

Soll nun ein Programm mit regionalen Auseinanderschaltungen übertragen werden, eignet sich hierfür die Übertragung über das System DAB+ nicht, wenn davon ausgegangen wird, dass die einzelnen unterschiedlichen Regionalfenster nicht gleichzeitig in einem DAB-Multiplex aus wirtschaftlichen und ressourcensparenden Gründen übertragen werden. In Abb. 7.16 ist eine Regionalstruktur, bestehend aus 9 Regionen, die beispielsweise durch Veranstalter 1 genutzt wird, dargestellt.

Die Aussendungen erfolgen im VHF-Kanal 12 in den Unterblöcken 12B01 bis 12B07. Bei der Verbreitung des niedersächsischen landesweiten Programmteils erhalten sämtliche Senderstandorte das gleiche Signal, bei der regionalen Auseinanderschaltung erhalten die den einzelnen DRM+ Blöcken (12B01 bis 12B07) zugeordneten Senderstandorte jeweils das für die Region bestimmte Programm analog zur UKW-Verbreitung. In diesem Datenstrom kann der Veranstal-

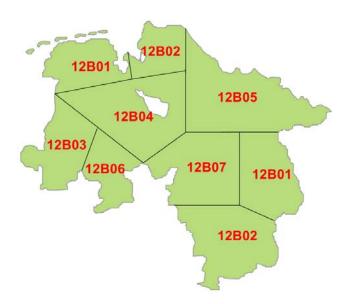


Abbildung 7.16: DRM+ Planung in Niedersachsen, regionaler Multiplex

ter bis zu vier verschiedene Services (Audioprogramme oder Daten) übertragen. Ebenso wäre es möglich, wenn sich aus wirtschaftlichen Gründen zwei verschiedene Programmanbieter die Kapazitäten eines DRM+ Blocks untereinander aufteilen, sodass beide je ein Hörfunkprogramm und auch Datendienste verbreiten können. Dazu ist es jedoch erforderlich, dass beide Programmanbieter den gleichen Ausbaugrad und die gleiche Regionalisierungsstruktur nutzen.

Aus Abb. 7.17 ist die frequenztechnische Aufteilung für die Regionalisierung eines anderen Veranstalters zu ersehen. In diesem Fall besteht der Bedarf des Programmveranstalters 2 in der Regionalisierung mit 6 Regionen. Zusätzlich jedoch sollen Bereiche angrenzender Bundesländer versorgt werden, es soll also analog zu den UKW-Überreichweiten ein Overspill in benachbarte Bundesländer realisiert werden. Die Realisierung dieser Zusatzversorgung benachbarter Länder erfolgt durch die Planung zusätzlicher DRM+ Sender, über die dann nur das jeweilige Programm übertragen wird.

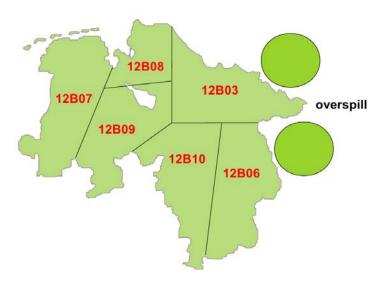


Abbildung 7.17: DRM+ Planung in Niedersachsen, regionaler Multiplex mit Overspill

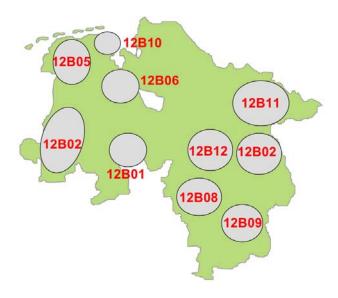


Abbildung 7.18: DRM+ Planung in Niedersachsen, regionaler Multiplex

Zur Umsetzung des lokalen Hörfunks werden - wie aus Abb.7.18 ersichtlich, ebenfalls DRM+Blöcke des Kanals 12B genutzt. Jeder Programmanbieter kann hierbei selber für sich, bezogen auf das Verbreitungsgebiet, die Sendeparameter wählen. In einem DRM+ Block können auch hierbei bis zu vier verschiedene Services (Hörfunkprogramme oder Daten) übertragen werden, sodass sich beispielsweise zwei Programmanbieter einen Block teilen könnten. Durch Veränderung der Nutzdatenrate hin zu geringeren Datenraten können dementsprechend die Sendeleistung und somit auch die Kosten der Verbreitung gesenkt werden.

7.4.3 Möglichkeiten der Sendernetzplanung für DRM+

Da sowohl DAB/DAB+ als auch DRM+ verträglich nebeneinander im Band III einplanbar sind, ergeben sich durch die Nutzung des gleichen Frequenzbereichs (VHF Band III, 174 bis 230 MHz) Chancen, auch die gleichen Sendeantennenanlagen zu nutzen. In Abb. 7.19-7.21 sind DAB/DAB+ Gleichkanalnetze (SFN) im Kanal 5C dargestellt. Über jeweils dieses DAB/DAB+ Netz können, je nach Datenrate und sonstiger Nutzung des Multiplexes, 10 bis 16 Hörfunkprogramme übertragen werden. Sämtliche Programme haben das gleiche Verbreitungsgebiet in diesem Gleichkanalnetz. Zusätzlich können über diese oder über eine Auswahl von DAB/DAB+ Sendestandorten über entsprechende Weichen auch DRM+ Programme abgestrahlt werden. Diese DRM+ Aussendungen sind in der Leistung variierbar, d.h. sie können auf den jeweiligen individuellen Versorgungsbereich angepasst werden. In dem in Abb. 7.19 dargestellten DAB/DAB+ SFN-Netz, bestehend aus vier DAB/DAB+ Standorten, verbreiten in Ergänzung zu DAB/DAB+ zwei lokale Hörfunkveranstalter an verschiedenen Orten ihr Programm.

Entsprechen die durch DAB/DAB+ genutzten Senderstandorte nicht der Struktur des regionalen/lokalen Hörfunks, so ist es möglich, wie in Abb. 7.20 dargestellt, zusätzlich im DAB/DAB+ Bereich DRM+ Sendestellen einzurichten. Somit können wiederum lokale und regionale Programmveranstalter, unabhängig und losgelöst von anderen Programmanbietern, über das System DRM+ ihr Programm ebenfalls im Band III verbreiten. Die Realisierung

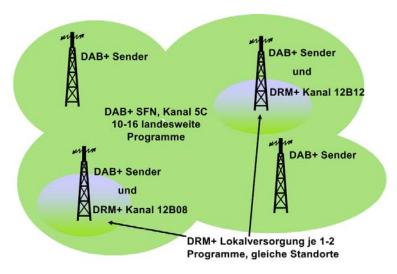


Abbildung 7.19: DRM+ Lokalversorgung von bestehenden DAB+ Standorten

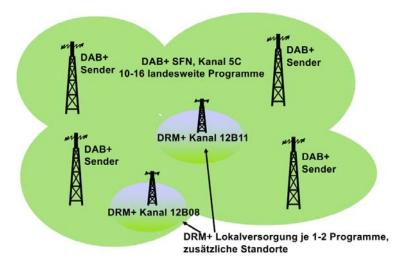


Abbildung 7.20: DRM+ Lokalversorgung von separaten Standorten

der Sendeantennenanlagen ist relativ einfach, da, bedingt durch eine 'grüne Wiese Planung im Band III' komplizierte Diagramme oder Einzüge vorerst nicht beachtet werden müssen. Auf vorhandene geeignete Bauten im Versorgungsgebiet können relativ einfache, statisch eher unbedenkliche, Sendeantennen aufgebaut werden (z.B. Groundplane Antennen).

Soll in einer großen Region (z.B. in einem Bundesland) sowohl ein überregionales als auch ein regionalisiertes und lokales Programmangebot verbreitet werden, so bietet sich die Senderstruktur in Abb. 7.21 an. Es werden von jedem Senderstandort im Versorgungsbereich über DAB/DAB+ überregionale, nicht auseinanderschaltbare, Programme sowie über das System DRM+ auf verschiedenen Kanälen, flächendeckend, regional auseinanderschaltbare Programme abgestrahlt. Darüberhinaus können auch lokale Angebote von den bestehenden oder neuen Standorten über DRM+ verbreitet werden. Durch die schmale Bandbreite eines DRM+ Signals ist die erforderliche Sendeleistung bei gleichen Verbreitungsgebiet gegenüber einer DAB/DAB+ Aussendung mit einer Vielzahl von Programmen geringer.

Durch die Mischnutzung von Senderstandorten zur Verbreitung von digitalem Hörfunk sowohl

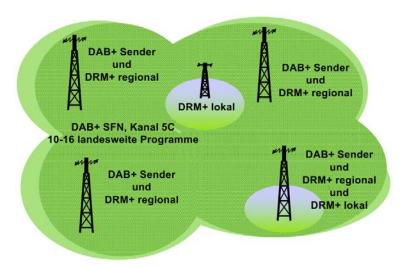


Abbildung 7.21: DRM+ Versorgung mit regionalisiertem und lokalem Programm

mit dem System DAB/DAB+ als auch mit dem System DRM+ lassen sich sowohl überregionale als auch regionale und lokale Strukturen abbilden. Bei gemeinsamer Nutzung von Senderstandorten ist von Einspareffekten bei der Sendeantennenanlage und bei den Heranführungsleitungen auszugehen.

8 Zusammenfassung

Im Folgenden werden die einzelnen Abschnitte des Modellversuchs zusammengefasst.

8.1 Zusammenfassung DRM im 11-m-Band

Zusammenfassend läßt sich sagen, dass der Empfang von DRM im 11-m-Band mit einer 64-QAM Modulation bei Datenraten von 21-26,5 kbps bis zu einem SNR von ca. 16 dB möglich ist. Dies entspricht einer Feldstärke von ca. 40 $dB\mu V/m$. Je nach eingestellter Coderate war der Empfang mit dem 80 Watt Sender mit einer Antennenhöhe von 70 m bis zu einer Entfernung von ca. 12-16 km möglich. Interessant war hierbei, dass zwischen Mode A und B, anders als bei anderen Feldtest, nur geringe Unterschiede festzustellen waren. Dies kann an Hannovers flacher Umgebung mit recht wenig dicht bebauten Gegenden liegen. Der Vorteil von Mode A ist eine höhere Bitrate.

Die Prognose-Modelle eignen sich nur teilweise für die Vorhersage der Signalstärke von DRM im 11-m-Band. Während Berechnungen mit der ITU-R 1812 sehr nah an den gemessenen Werten liegen, kommt es bei den anderen zu größeren Abweichnungen. Eine genauere Analyse der Vorhersagefehler der ITU-R 1546 wurde von der Universität des Baskenlandes (UPV/EHU) Mithilfe der aufgezeichneten Messdaten durchgeführt und ist in einer gemeinsamen Veröffentlichung zusammengefaßt [8].

Trotz Sonnenfleckenminimum kam es zu Raumwellenausbreitung und das Signal aus Hannover wurde an verschiedenen weit entfernten Orten empfangen. Bei höherer Sonnenaktivität muss mit deutlich mehr Ionosphärenausbreitung gerechnet und eine entsprechende Frequenzplanung unter den Sendern im 11-m-Band durchgeführt werden.

Der Einsatz von DRM im 11-m-Band ist daher nur beschränkt zu empfehlen, da entweder eine komplizierte weltweite Frequenzplanung, bei der nur noch ein Bruchteil der verfügbaren Frequenzen nutzbar wären, durchgeführt werden muss. Einzelne Störungen, die im Extremfall über Stunden andauern könnten, müssen in Kauf genommen werden. Der Einsatz von Frequenzhopping könnte diese Störungen verringern, allerdings kommt es dabei zu Sendeunterbrechungen im Bereich von 3-17 Sekunden.

Lokaler Hörfunk mit DRM im 11-m-Band ist prinzipiell möglich, durch Nutzung von Mode B, insbesondere in topographisch ungünstigen Gebieten, ist allerdings die Datenrate bei 9 kHz HF-Bandbreite (europäisches Frequenzraster) eingeschränkt, wodurch eine im Vergleich zu UKW hörbar schlechtere Audioqualität erzielt wird. Flache Regionen wie z.B. Hannover ermöglichen den Einsatz von Mode A, wodurch geringfügig höhere Datenraten erzielt werden können.

Eine weitere Erhöhung der Datenrate, also eine deutliche Verbesserung der Audioqualität ist nur durch Nutzung größerer HF-Bandbreiten (20 kHz, amerikanisches Frequenzraster) möglich.

94 Zusammenfassung

Dadurch wird jedoch die Frequenzplanung erschwert, da dann nur noch 21 Kanäle im 11-m-Band zu Verfügung stehen.

Für den werbefinanzierten Hörfunk in Europa eignet sich das System im 11-m-Band also eher nicht, mögliche Anwendungen wären z.B. Campusradios.

8.2 Zusammenfassung des Feldtests in Band II

Der DRM+ Feldtest auf der Frequenz 95,2 MHz zeigt, dass sich DRM+ für den lokalen Rundfunk eignet. Gemessen wurde mit horizontaler und vertikaler Polarisation der Sendeantenne in verschiedenen Umgebungen. Einerseits mit einem Signal mit 16-QAM Modulation und hoher Bitrate, mit dem 2-3 Audiostreams und zusätzliche Datendienste übertragen werden könnten und mit einem Signal mit 4-QAM Modulation und geringerer Bitrate, ausreichend für einen Audiostream und Datendienste.

Ausgewertet wurden die Feldstärke, die Bitfehlerrate, ein berechnetes SNR und der Status des Audiodecoders. Dabei zeigte sich, dass bei 16-QAM Modulation der mobile Empfang in 2 m Höhe über Boden ab einer Feldstärke von ca. 46 $dB\mu V/m$ möglich war. Das entsprechende SNR beträgt etwa 18 dB. Bei der 4-QAM Modulation ist ein Empfang ab einer Feldstärke von ca. 30 $dB\mu V/m$ bei einem SNR von ca. 10 dB möglich. In einer Umgebung mit starkem Fading wird mehr Feldstärke benötigt als in offener Umgebung bei Sichtverbindung zum Sender.

Zum Vergleich: Ein FM-Stereo Signal benötigt laut [31] eine Feldstärke von 66 $dB\mu V/m$ in städtischer Umgebung in einer Höhe von 10 m (+ 10 dB in 1.5 m Höhe). Die SNR Werte sind etwas höher, als die Simulationergebnisse in [24] (7.3 dB für 4-QAM im 'urban channel' bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h und 15.4 für 16-QAM). Diese Simulationen wurden jedoch auch mit optimaler Kanalschätzung und ohne Implementierungsverluste gemacht.

Die Untersuchung der Verträglichkeit zwischen DRM+ und FM zeigen, dass für den Schutz des FM Signals die Leistung eines DRM+ Signals bei einem Abstand von 150 kHz von einem FM Stereosignal um 20 dB gegenüber der Leistung des FM Signals abgesenkt werden muss. Bei einem Abstand von 200 kHz genügt ein Absenken der Leistung um 10 dB.

8.3 Zusammenfassung zur Nutzung von DRM+ in Band III

Technische Möglichkeiten

Die theoretischen Untersuchungen zur technischen Verwendbarkeit von DRM+ in Band III zeigen, dass in Band III, bis zu Empfängergeschwindigkeiten von 200 km/h der Empfang möglich ist. Bei höheren Geschwindigkeiten kann es in einem 'worst-case'-Szenario zu Empfangsproblemen aufgrund von Intercarrier-Interferenzen und des 'samplings' der für die Kanalschätzung notwendigen Pilotzellen kommen. Eine Verbesserung hinsichtlich des 'flat-fading'- Verhaltens ist für höhere Frequenzen zu erwarten, konnte allerdings bei den Messungen nicht festgestellt

werden.

Messungen wurden auf der Frequenz 176,64 MHz in städtischem Gebiet und auf einer radialen Route im 4-QAM und 16-QAM Mode durchgeführt. Für ein sehr robustes 4-QAM Signal war der mobile Empfang in 2 m Höhe mit guter Audioqualität ab einer Feldstärke von ca. 35 $dB\mu V/m$ und einem SNR von ca. 12 dB, im 16-QAM Mode ab einer Feldstärke von ca. 48 $dB\mu V/m$ bei einem SNR von ca. 20 dB möglich. Die SNR Werte sind dabei etwas höher als die Simulationsergebnisse aus [24] (7.3 dB bei 4-QAM im 'urban' Kanalmodel bei 60 km/h und 15.4 für 16-QAM). Die Simulationen wurden mit optimaler Kanalschätzung und ohne Berücksichtigung von Implementierungsverlusten durchgeführt.

Insgesamt zeigten sich bei den durchgeführten Messungen keine signifikanten Unterschiede zu den Messergebnissen in Band II.

Möglichkeiten der Einplanung von DRM+ in Band III

Die Untersuchungen zur Nutzung von DRM+ im Band III (174-230 MHz) haben eindeutig die technische Umsetzbarkeit gezeigt. Zur frequenztechnischen Realisierung stehen ausreichend freie Kapazitäten für DRM+ im VHF-Band III ohne Beeinträchtigung der geplanten DAB+ Bedeckungen zur Verfügung. Bei der heute geplanten Nutzung von drei Bedeckungen mit DAB+ (eine bundesweite und zwei landesweite mit jeweils 10 - 15 Programmen) und perspektivisch von der Nutzung von zwei weiteren Bedeckungen (z.B. DMB), werden rund 75% der VHF-Band III- Kapazitäten genutzt. Es stehen im VHF-Band III also zwei bis drei DAB-Bedeckungen zur Nutzung für DRM+ zur Verfügung, also ausreichend Kapazitäten, die je nach landesrechtlichem Hörfunkkonzept für eine DRM+ Ausstrahlung genutzt werden könnten.

Ein DAB+-Block (mit 1,5 MHz Breite) könnte dann grundsätzlich in 15 DRM+ Blöcke unterteilt werden. Das heißt, in einer DAB+-Bedeckung (DAB+-Layer) können rund 15-30 DRM+ Hörfunkprogramme und zusätzlich Datendienste für die jeweilige Region verbreitet werden. Die Nutzung von DRM+ im VHF-Band III hätte gegenüber den DRM+ Planungen im UKW-Frequenzband den Vorteil, dass keine aufwändigen Nutzungs- und Übergangsszenarien analogdigital für das UKW-Band II entwickelt werden müssen und im VHF-Band III gem. RRC-06 auch andere digitale Systeme als DAB koordiniert werden können, sofern sie die Störkriterien einhalten.

Die Digitalisierung des Hörfunks im Band III mit den Hörfunksystemen DAB+ und DRM+ entspricht den Erfordernissen der Hörfunklandschaft, ist frequenztechnisch ohne Hindernisse umsetzbar und weist folgende Vorteile auf:

- skalierbares Gesamtsystem für die digitale terrestrische Hörfunkverbreitung,
- Endgerätepenetration mit Multinormgeräten einfach zu erreichen, da gleiches Empfängerdesign (Antenne, Frontend) und identischer Chiptechnologie (MPEG-4, OFDM usw.),
- DAB+ als Plattform für einheitliche großflächige Versorgungsgebiete mit vielen Programmen als ersten Schritt der Digitalisierung,
- zusätzlich über DRM+ frühzeitig den Zugang insbesondere der regionalisierten und

96 Zusammenfassung

lokalen Anbietern im Band III realisieren,

• Abbau der verbreitungstechnischen Nachteile der privaten, insbesondere der lokalen/regionalen Anbieter gegenüber den öffentlich-rechtlichen Sendern bei der analogen Verbreitung,

• das VHF-Band III steht für eine solche Nutzung sofort zur Verfügung, die nebenbei auch einen Beitrag zur 'Sicherung' des VHF-Bandes III gegenüber anderen rundfunkfremden Nutzungen leisten würde.

Abschließend läßt sich feststellen, dass die DRM-Familie, also DRM30 und DRM+, das ideale digitale Übertragungssystem für lokalen und regionalen Hörfunk für verschiedenste Hörfunkanbieter darstellt.

A Raumwellenausbreitungsprognosen

A.1 Sun Spot Number: 50

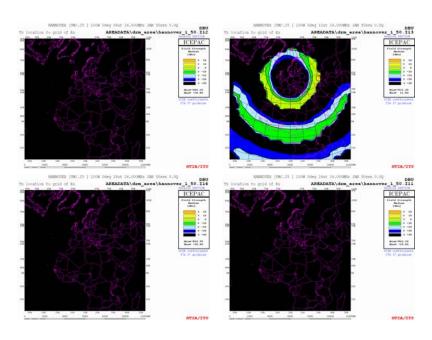


Abbildung A.1: SSN: 50, Januar, 6, 12, 18, 24 Uhr

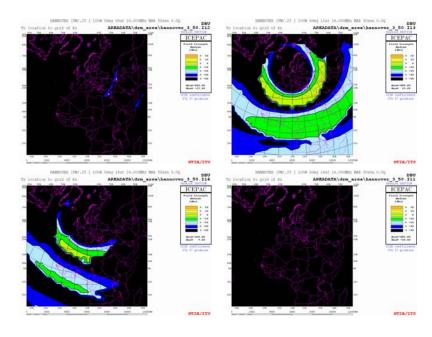


Abbildung A.2: SSN: 50, März, 6, 12, 18, 24 Uhr

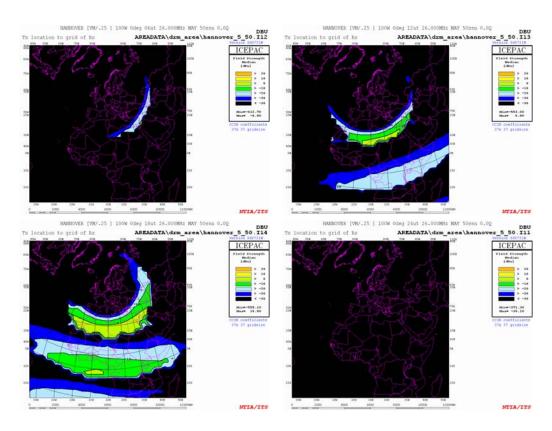


Abbildung A.3: SSN: 50, Mai, 6, 12, 18, 24 Uhr

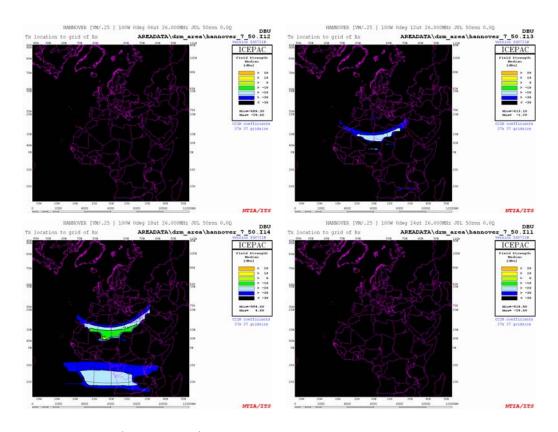


Abbildung A.4: SSN: 50, Juli, 6, 12, 18, 24 Uhr

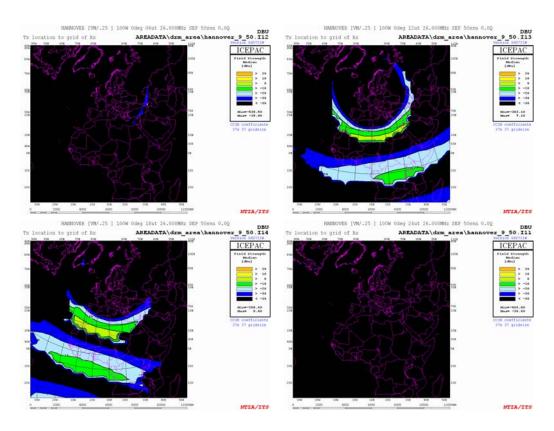


Abbildung A.5: SSN: 50, September, 6, 12, 18, 24 Uhr

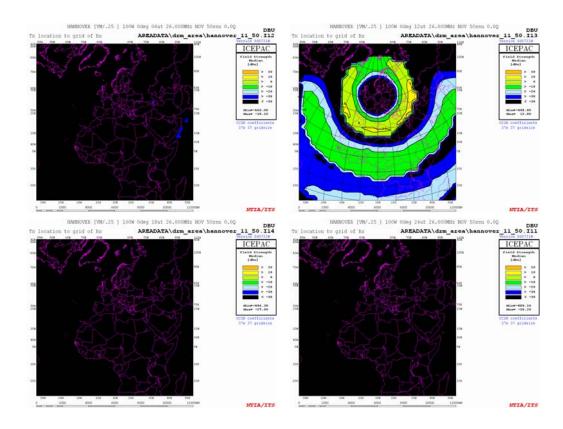


Abbildung A.6: SSN: 50, November, 6, 12, 18, 24 Uhr

A.2 Sun Spot Number: 100

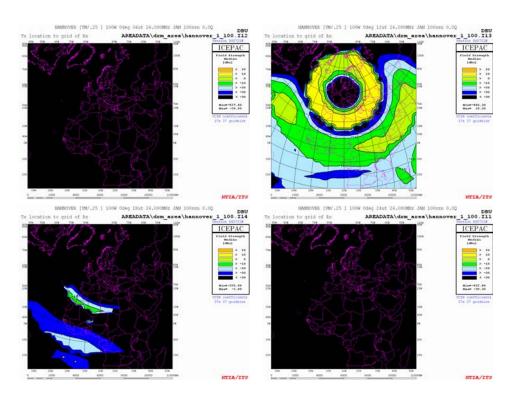


Abbildung A.7: SSN: 100, Januar, 6, 12, 18, 24 Uhr

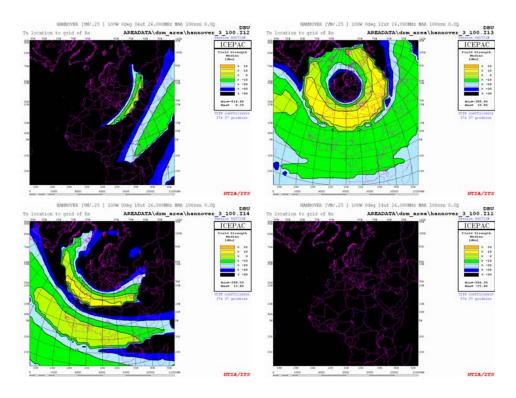


Abbildung A.8: SSN: 100, März, 6, 12, 18, 24 Uhr

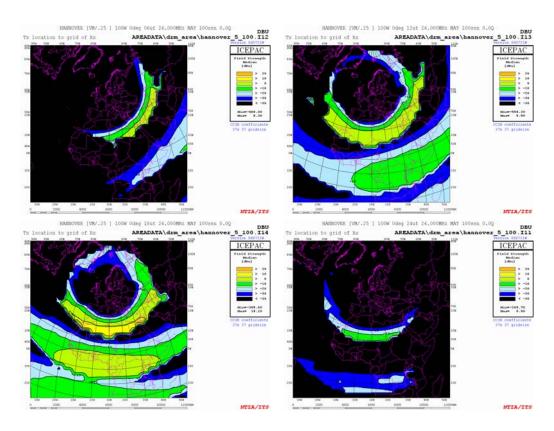


Abbildung A.9: SSN: 100, Mai, 6, 12, 18, 24 Uhr

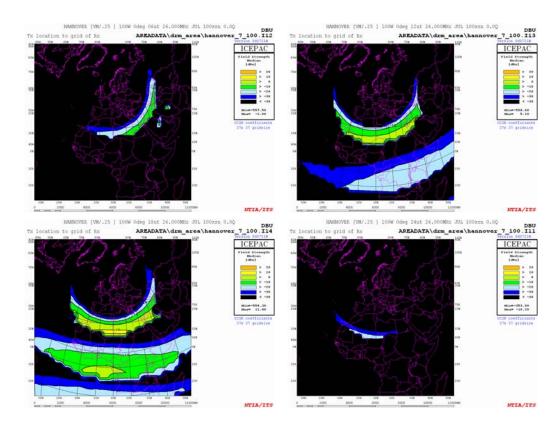


Abbildung A.10: SSN: 100, Juli, 6, 12, 18, 24 Uhr

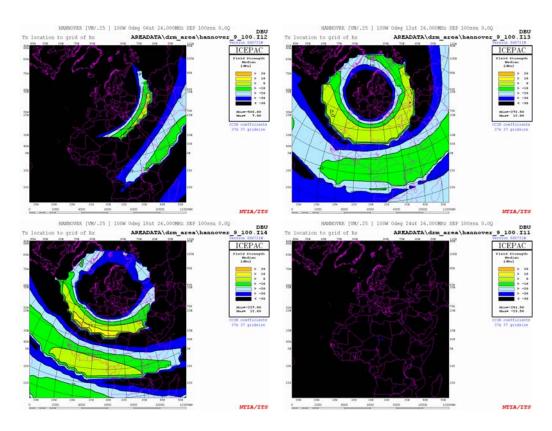


Abbildung A.11: SSN: 100, September, 6, 12, 18, 24 Uhr

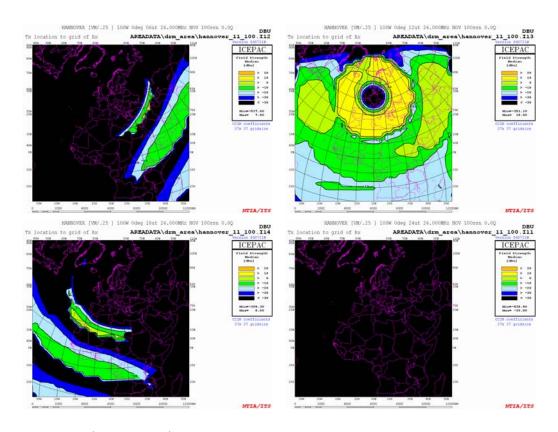


Abbildung A.12: SSN: 100, November, 6, 12, 18, 24 Uhr

A.3 Sun Spot Number: 150

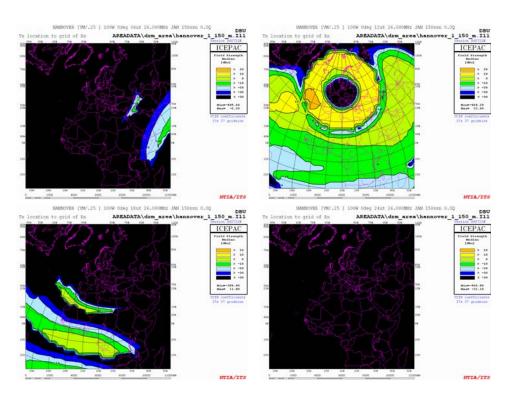


Abbildung A.13: SSN: 150, Januar, 6, 12, 18, 24 Uhr

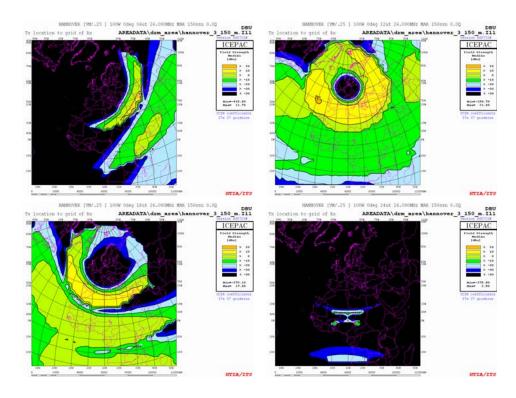


Abbildung A.14: SSN: 150, März, 6, 12, 18, 24 Uhr

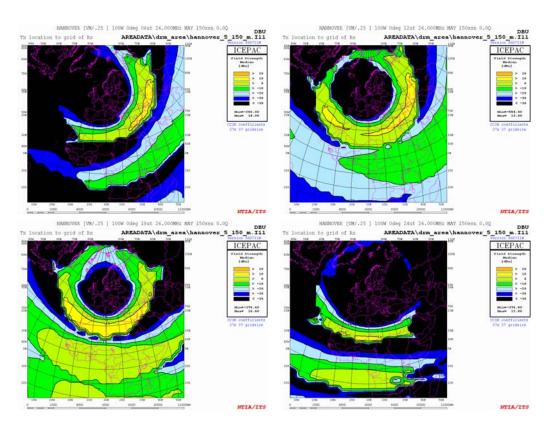


Abbildung A.15: SSN: 150, Mai, 6, 12, 18, 24 Uhr

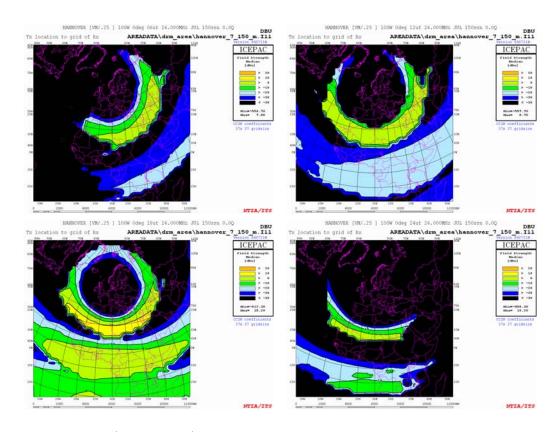


Abbildung A.16: SSN: 150, Juli, 6, 12, 18, 24 Uhr

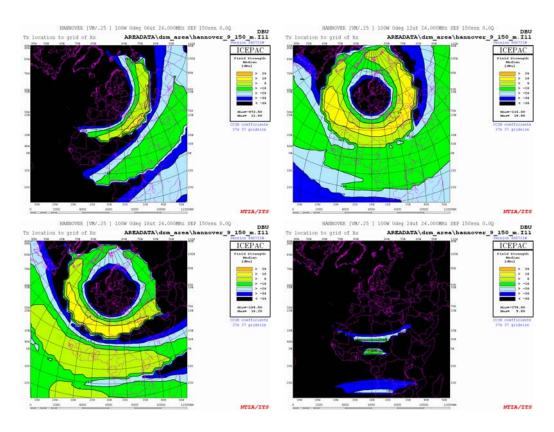


Abbildung A.17: SSN: 150, September, 6, 12, 18, 24 Uhr

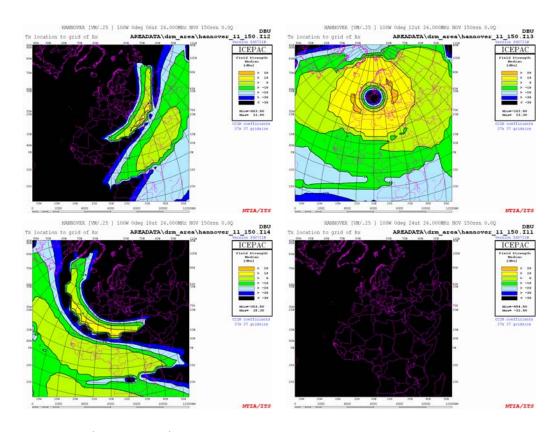


Abbildung A.18: SSN: 150, November, 6, 12, 18, 24 Uhr

A.4 Stundenweise Betrachtung

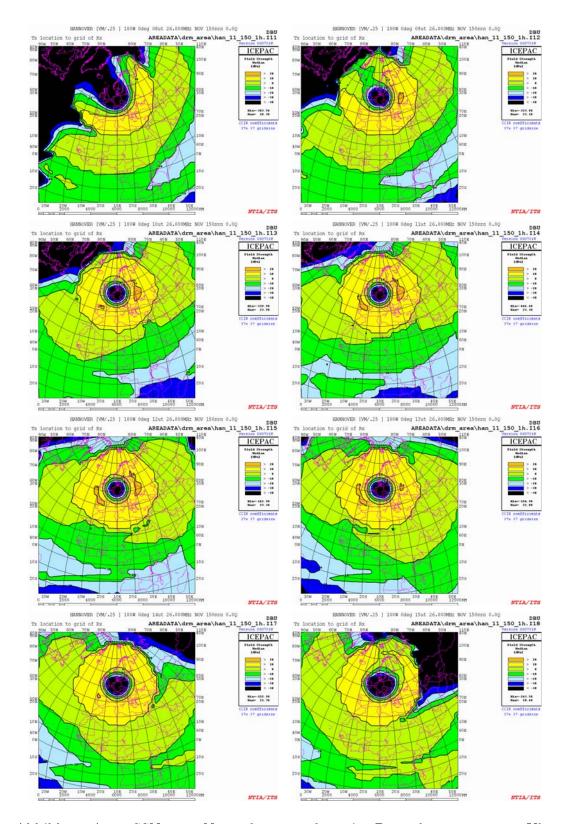


Abbildung A.19: SSN: 150, November, stundenweise Betrachtung von 8-15 Uhr

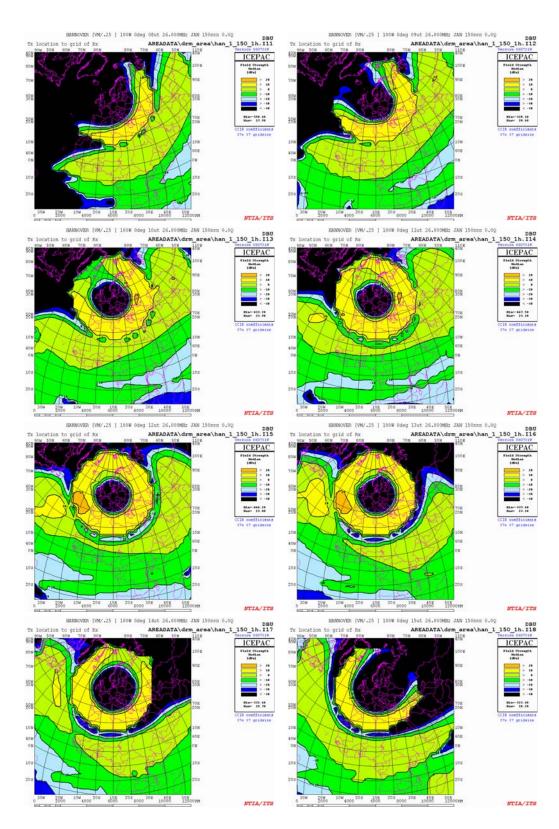


Abbildung A.20: SSN: 150, Januar, stundenweise Betrachtung von 8-15 Uhr

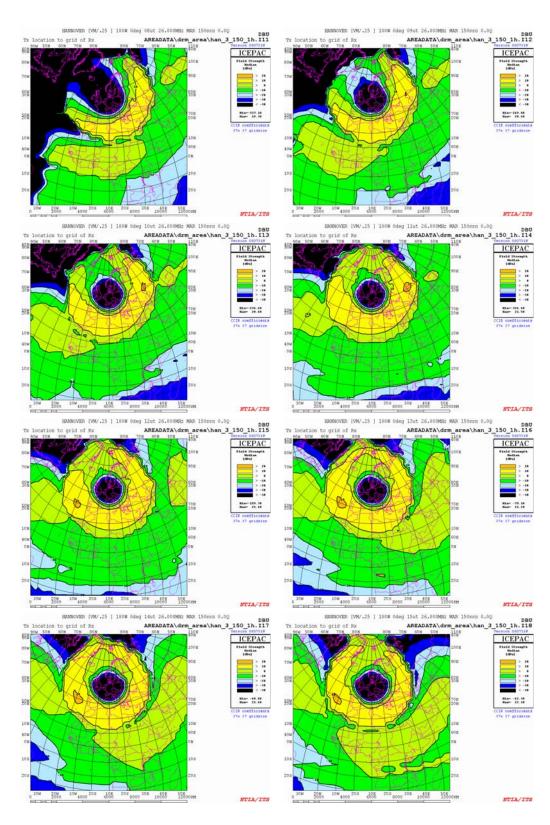


Abbildung A.21: SSN: 150, März, stundenweise Betrachtung von 8-15 Uhr

Literaturverzeichnis

- [1] F. Hofmann. Multilevel-Codierung und Kanalschätzung für OFDM in der Lang, Mittelund Kurzwelle. Shaker Verlag, 2003.
- [2] DRM Consortium. Broadcast Manual. http://drm.org/uploads/files/broadcast_manual.pdf.
- [3] DReaM Software Empfänger. http://drm.sourceforge.net.
- [4] Creative Commons Germany. http://creativecommons.org/international/de/.
- [5] Prof. Dr. Lauterbach. DRM Lokalradio im 26 MHz Bereich Durchführung und Ergebnisse des Projekts 'Campus Radio' an der Georg-Simon-Ohm-Hochschule 2002-2009. Europaforum-Verlag, 2009.
- [6] J. M. Matias, I. L. Corderi, P. Angueira, U. Gil, J. L. Ordiales, and A. Arrinda. DRM (Digital Radio Mondiale) Local Coverage Tests Using the 26 MHz Broadcasting Band. Broadcasting, IEEE Transactions on, 53(1):59-68, March 2007.
- [7] ITU. ITU-R BS.1615 Planning parameters for digital sound broadcasting at frequencies below 30 MHz. 2003.
- [8] F. Maier, I. Peña, P. Angueira, A. Tissen, and A. Waal. *DRM for Local Coverage in the* 11 m band Predictions and Measurements. 2009.
- [9] Prof. Dr. Lauterbach. Local Radio in the 26MHz Band using DRM Results of the Nuremberg Field Trial and General Considerations. http://www.ohm-hochschule.de/fileadmin/Pressestelle/Fachartikel/Lauterbach_31.pdf.
- [10] E. Costa and M. Liniger. Hybrid Propagation Models for Broadcast Coverage Predictions and Spectrum Management. *Proceedings of the International Symposium on Advanced Radio Technologies*, pages 131–137, 2007.
- [11] Harry R. Anderson. Fixed Broadband Wireless Design. 2003.
- [12] ITU. ITU-R P.1546-3 Method for point-to-predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz. 2007.
- [13] ITU. ITU-R P.370-7 VHF and UHF Propagation Curves for the Frequency Range from 30 MHz to 1 000 MHz. 1995.
- [14] TS-102 821 V1.2.1 ETSI. Distribution and Communications Protocol (DCP), Digital Radio Mondiale (DRM). 2005.
- [15] TS-102 820 V1.2.1 ETSI. Multiplex Distribution Interface (MDI), Digital Radio Mondiale (DRM). 2005-10.
- [16] TS 102 349 V1.3.1 ETSI. Receiver Status and Control Interface (RSCI), Digital Radio

110 Literaturverzeichnis

- $Mondiale\ (DRM).\ 04\ 2009.$
- [17] Analog Devices. Blackfin Embeded Processor BF534/BF536/BF537, 2008.
- [18] Analog Devices. Blackfin Embeded Processor BF531/BF532/BF533, 2008.
- [19] Inc. Audio Engineering Society. AES standard for digital audio Digital input-output interfacing. Serial transmission format for two-channel linearly represented digital audio data. 2003.
- [20] Analog Devices. AD9777. Interpolating Dual TxDAC+ $\bigcirc D/A$ Converter, 2006.
- [21] Analog Devices. ADL5385. 50 MHz to 2200 MHz Quadrature Modulator, 2006.
- [22] Hank Zumbahlen. Linear Circuit Design Handbook. ISBN: 978-0-7506-8703-4. Newnes, 2008.
- [23] Silicon Laboratories. Si570. Any-rate I2C programable XO/VCXO, 2007.
- [24] ETSI. ES 201 980, Digital Radio Mondiale (DRM), System Specification. 2009.
- [25] ETSI. TS 102 349, Digital Radio Mondiale (DRM), Receiver Status and Control Interface (RSCI). 2009.
- [26] K. Ramasubramanian and K. Baum. An OFDM timing recovery scheme with inherent delay-spread estimation. IEEE Global Telecommunications Conference, 2001.
- [27] P. Robertson and S. Kaiser. The effects of Doppler spreads in OFDM(A) mobile radio systems. IEEE Vehicular Technology Conference, 1999.
- [28] Y. Li and L. Cimini. Bound on the Interchannel Interference of OFDM in Time-Varying Impairments. IEEE Transactions on Communications.
- [29] H. Schulze and C. Lüders. Theory and Applications of OFDM and CDMA Wideband Wireless Communications. Wiley, 2005.
- [30] F. Maier, A. Tissen, and A Waal. Evaluation of the Channel Properties for a DRM+ System and Field Tests in the VHF-Band III (174-230 MHz). IEEE International Conference on Wireless and Mobile Communications, 2010.
- [31] ITU. ITU-R BS.412-9, Planning Standards for terrestrial FM sound broadcasting at VHF. 1995.